



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

GABRIEL ZILIO

**Análise estrutural, térmica e hidrodinâmica de trocadores de calor compactos de canais  
complexos fabricados por manufatura aditiva**

Florianópolis  
2025

Gabriel Zilio

**Análise estrutural, térmica e hidrodinâmica de trocadores de calor compactos de canais complexos fabricados por manufatura aditiva**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciências Térmicas

Orientadora: Profa. Dra. Talita Sauter Possamai  
Coorientador: Prof. Dr. Marcus V. V. Mortean

Florianópolis

2025

Zilio, Gabriel

Análise estrutural, térmica e hidrodinâmica de trocadores de calor compactos de canais complexos fabricados por manufatura aditiva Florianópolis 2025 / Gabriel Zilio ; orientadora, Talita Sauter Possamai, coorientador, Marcus Vinícius Volponi Morteau, 2025.

234 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Trocadores de calor compactos. 3. Manufatura aditiva. 4. Tensões termomecânicas. 5. Geometrias complexas. I. Possamai, Talita Sauter. II. Morteau, Marcus Vinícius Volponi. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

Gabriel Zilio

**Análise estrutural, térmica e hidrodinâmica de trocadores de calor compactos de canais complexos fabricados por manufatura aditiva**

O presente trabalho em nível de doutorado foi avaliado e aprovado, em SS de XX de YY, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. José Alexandre Matelli, Dr.  
Universidade Estadual Paulista

Prof. Júlio César Passos, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Edison da Rosa, 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 doutor em Engenharia e Ciências Térmicas.



Documento assinado digitalmente  
**Armando Albertazzi Gonçalves Junior**  
Data: 25/07/2025 13:29:01-0300  
CPF: \*\*\*.495.015-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em exercício



Documento assinado digitalmente  
**Talita Sauter Possamai**  
Data: 25/07/2025 11:07:36-0300  
CPF: \*\*\*.039.319-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Profa. Talita Sauter Possamai, Dra.

Orientadora



Documento assinado digitalmente  
**MARCUS VINICIUS VOLPONI MORTEAU**  
Data: 25/07/2025 11:16:48-0300  
CPF: \*\*\*.444.019-\*\*  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Marcus Vinicius Volponi Morteau, Dr.

Coorientador

Florianópolis, 2025.

## **AGRADECIMENTOS**

Obrigado aos meus pais, à minha noiva, aos meus mestres e aos meus colegas por me ajudarem a entender que durante nossa vida nós nunca devemos parar de aprender.

## RESUMO

Trocadores de calor compactos (*CHEs*, do inglês *Compact Heat Exchangers*) operam com altas temperaturas e pressões, requerendo um projeto geométrico adequado para suportar estas condições. Esses equipamentos devem ter bom desempenho termo hidráulico, enquanto suportam elevadas tensões termomecânicas. A maioria dos trabalhos estuda separadamente o comportamento termo hidráulico e estrutural. O presente trabalho propõe uma abordagem diferente sendo avaliada a resistência termomecânica e o desempenho termo hidráulico de *CHEs* fabricados por manufatura aditiva (MA). Esta é uma das primeiras pesquisas a avaliar as tensões termomecânicas transientes em trocadores de calor, além de estudar o comportamento térmico e hidrodinâmico de um novo canal com caminho complexo. Ambos os estudos empregam experimentos e modelos numéricos. Utilizou-se o processo de manufatura aditiva por fusão seletiva a laser para produzir protótipos de trocador de calor compactos em aço 316L. Investigou-se três diferentes geometrias: canal espesso, protótipo de trocador de calor fabricado via MA com 46 canais retos circulares e núcleo de trocador compacto produzido por MA composto por 348 canais complexos e 143 canais retos. Utilizaram-se seis bancadas experimentais para avaliar tensões térmicas, mecânicas e combinadas, no regime permanente e transiente, além do desempenho térmico e hidrodinâmico do núcleo. Realizaram-se no total 556 experimentos. Nas bancadas para o tubo e o protótipo induziu-se a pressurização e choque térmico simultaneamente enquanto as bancadas termo hidráulicas permitem avaliar o núcleo com arranjo de escoamento água – água e água – ar. Os valores numéricos de pico de tensão no tubo verificaram-se erros médios em relação aos experimentos de 4,7% e 6,9% para a tensão térmica, 8,1% e 8,2% para a mecânica e 9% e 8,6% para a termomecânica. No protótipo do trocador de calor, observou-se uma tensão termomecânica máxima de 36,9 MPa na superfície (experimental) e 184 MPa nos canais (numérico), com uma diferença numérica média de 2,7%. Empregou-se o modelo numérico validado para avaliação das condições de operação comuns a trocadores compactos ( $P = 200$  bar e  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ ), resultando em picos de tensão termomecânica que superam a tensão de escoamento e o limite de resistência do AISI 316L. Essa investigação demonstra que considerar os esforços termomecânicos no projeto de um CHE é crucial. Demonstrou-se no estudo térmico do núcleo que os canais complexos apresentam desempenho superior aos canais retos e aos canais zigue zague. Propuseram-se correlações para  $Nu$  do canal complexo com água em diferentes temperaturas e ar. Para as simulações térmicas o modelo diverge em média 6,6% dos experimentos e para a perda de carga, 66% no canal reto e 12% no complexo. A direção de impressão do canal tem elevada influência na perda de carga. Em razão disso, realizou-se uma segunda análise para investigar a elevada perda de carga experimental e consequente discrepância do modelo. Verificou-se na investigação que canais impressos horizontalmente à plataforma de impressão apresentam variação geométrica considerável na seção transversal, tendo sua circularidade afetada e não sendo constante ao longo de seu comprimento, resultando em um aumento na perda de carga.

**Palavras-Chave:** Trocador de calor compacto; Manufatura aditiva; Tensão termomecânica transiente; Desempenho termo hidráulico; Canal complexo.

## ABSTRACT

Compact heat exchangers (CHEs) operate at high temperatures and pressures, requiring an adequate geometric design to withstand these conditions. These devices must have good thermal-hydraulic performance, while supporting high thermomechanical loads. Most studies investigate thermal-hydraulic and structural behavior separately. This work proposed a different approach evaluating the thermomechanical strength and thermohydraulic performance of CHEs manufactured by additive manufacturing (AM). This is one of the first studies to evaluate the transient thermomechanical stresses in heat exchangers, in addition to studying the thermal and hydrodynamic behavior of a new channel with a complex path. Both studies employed experiments and numerical models. The selective laser melting additive manufacturing process was used to produce compact heat exchanger prototypes in 316L steel. Three different geometries were investigated: thick channel, heat exchanger prototype manufactured via AM with 46 circular straight channels and a compact exchanger core produced by AM composed of 348 complex channels and 143 straight channels. Six experimental benches were used to evaluate thermal, mechanical and combined stresses, in steady and transient regime, in addition to the thermal and hydrodynamic performance of the core. A total of 556 experiments were performed. Pressurization and thermal shock were performed simultaneously on the tube and prototype benches, while the thermo-hydraulic benches were configured to evaluate the core with water – water and water – air flow arrangements. The numerical values of peak stress in the tube showed average errors in relation to the experiments of 4.7% and 6.9% for thermal stress, 8.1% and 8.2% for mechanical stress, and 9% and 8.6% for thermomechanical stress. In the heat exchanger prototype, the maximum thermomechanical stress was 36.9 MPa at the surface (experimental) and 184 MPa in the channels (numerical), with an average numerical difference of 2.7%. The validated numerical model was used to evaluate operating conditions common to compact exchangers ( $P=200$  bar and  $\Delta T = 100^{\circ}\text{C}$ ), resulting in thermomechanical stress peaks that exceed the yield stress and the resistance limit of AISI 316L. This investigation shows the importance of considering thermomechanical stresses in the design of a CHE. The thermal study of the core demonstrated that complex channels outperform straight and zigzag channels. Correlations were proposed for Nu of the complex channel with water at different temperatures and air. For thermal simulations, the model diverged on average 6.6% from the experiments, and for pressure drop, 66% in the straight channel and 12% in the complex channel. The printing direction of the channel has a high influence on the pressure drop. Therefore, an analysis was performed to investigate the high experimental pressure drop and consequent discrepancy in the model. The investigation showed that channels printed horizontally to the printing platform present considerable geometric variation in the cross section, having their circularity affected and not being constant along their length, resulting in an increase in pressure drop.

**Keywords:** Compact heat exchanger; Additive manufacturing; Transient thermomechanical stress; Thermohydraulic performance; Complex channel.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 1 – Núcleo de trocador compacto com arranjo de escoamento contracorrente ( <i>PCHE</i> ).....                                                                             | 6  |
| Fig. 2 – Núcleo de trocador compacto com arranjo de escoamento cruzado e canais retangulares em bronze e em aço .....                                                          | 6  |
| Fig. 3 – Classificação de trocadores de acordo com a densidade de transferência .....                                                                                          | 7  |
| Fig. 4 – Caminhos impressos em chapas de aço para formação dos canais de um <i>PCHE</i> .....                                                                                  | 9  |
| Fig. 5 – Caminhos caóticos como alternativa para melhorar a performance térmica em células de combustível: (a) <i>C-shape</i> e (b) <i>V-shape</i> .....                       | 10 |
| Fig. 6 – Sequenciamento do processo de fusão seletiva a laser .....                                                                                                            | 12 |
| Fig. 7 – Verificação seccional de canais com diferentes diâmetros e sentido de impressão ....                                                                                  | 14 |
| Fig. 8 – Curva de <i>Woehler</i> : tensão alternada vs. número de ciclos. ....                                                                                                 | 23 |
| Fig. 9 – Diferenciação das componentes da perda de carga ao longo de uma tubulação .....                                                                                       | 28 |
| Fig. 10 – Tubo vazado de parede espessa.....                                                                                                                                   | 40 |
| Fig. 11 – Bancada experimental para avaliar tensões térmicas transientes em um cilindro: (a) Bancada equipada com os sensores; (b) Amostra instrumentada; (c) Esquemático..... | 41 |
| Fig. 12 – Bancada experimental para avaliar tensão mecânica em um cilindro: (a) Bancada equipada com todos os sensores necessários; (b) Esquemático .....                      | 45 |
| Fig. 13 – Bancada experimental para combinação de esforços térmicos e mecânicos no cilindro .....                                                                              | 46 |
| Fig. 14 – Esquemático da bancada experimental de carregamentos combinados no cilindro..                                                                                        | 47 |
| Fig. 15 – Aproximação da vista geral da bancada para melhor visualização das válvulas .....                                                                                    | 47 |
| Fig. 16 – Condições de simetria (a), carregamento (b) e local de medição da tensão equivalente (c).....                                                                        | 50 |
| Fig. 17 – Malha utilizada para simulações do cilindro com tamanho médio de 0,3 mm .....                                                                                        | 51 |
| Fig. 18 – Protótipo <i>SLMHE</i> : (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior; (d) isométrica do protótipo impresso .....                                        | 53 |
| Fig. 19 – Dimensões dos bocais utilizados para o escoamento de água.....                                                                                                       | 55 |
| Fig. 20 – Protótipo <i>SLMHE</i> com bocais para escoamento e extensômetro .....                                                                                               | 55 |
| Fig. 21 – Bancada de tensão combinada na amostra <i>SLMHE</i> .....                                                                                                            | 56 |
| Fig. 22 – Amostra de trocador de calor instrumentada.....                                                                                                                      | 57 |
| Fig. 23 – Esquema da bancada experimental para choque térmico e pressurização interna da amostra .....                                                                         | 57 |

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig. 24 – Condições do MEF: (a) protótipo completo; (b) engaste, pressão e simetria na vista inferior; (c) convecção e simetria na vista lateral..... | 59 |
| Fig. 25 – Locais de medição de tensão: (a) experimental; (b) numérica.....                                                                            | 60 |
| Fig. 26 – Malhas de elementos finitos para o protótipo estrutural <i>SLMHE</i> .....                                                                  | 61 |
| Fig. 27 – (a) Corpos de prova fabricados com <i>SS SLM 316L</i> ; (b) Experimentos de fadiga com controle de deformação .....                         | 62 |
| Fig. 28 – Arranjo de um trocador com canais complexos tridimensionais e retos.....                                                                    | 64 |
| Fig. 29 – Representação frontal (a) e lateral (b) da lâmina contendo ambos os ramais .....                                                            | 65 |
| Fig. 30 – Representação isométrica do núcleo completo com enfoque na face frontal e lateral .....                                                     | 65 |
| Fig. 31 – Núcleo com canais tridimensionais impresso via <i>SLM</i> : (a) como fabricado; (b) após tratamento térmico.....                            | 66 |
| Fig. 32 – Preparação do núcleo para os experimentos: (a) bocais abertos; (b) bocais fixados e (c) instrumentado com RTDs .....                        | 68 |
| Fig. 33 – Tratamento de imagem para os canais retos. ....                                                                                             | 69 |
| Fig. 34 – Tratamento de imagem para os canais complexos. ....                                                                                         | 69 |
| Fig. 35 – Protótipo utilizado para medição de rugosidade dos canais.....                                                                              | 70 |
| Fig. 36 – Bancada experimental térmica para água – ar: (a) fotografia; (b) esquemático.....                                                           | 71 |
| Fig. 37 – Parâmetros de temperatura e pressão medidos e identificados no trocador de calor                                                            | 72 |
| Fig. 38 – Bancada experimental térmica para água – água: (a) fotografia; (b) esquemático ...                                                          | 74 |
| Fig. 39 – Seção de teste contendo trocador e transdutores de temperatura .....                                                                        | 75 |
| Fig. 40 – Bancada experimental hidrodinâmica: (a) trocador e sensores; (b) esquemático .....                                                          | 78 |
| Fig. 41 – Região do núcleo onde é medido a perda de carga com destaque para a localização das tomadas de pressão.....                                 | 79 |
| Fig. 42 – Unidade repetitiva do núcleo complexo para simulação numérica.....                                                                          | 81 |
| Fig. 43 – Equivalência entre altura de rugosidade para diferentes situações .....                                                                     | 82 |
| Fig. 44 – Malha selecionada após análise de convergência: (a) com o domínio sólido; (b) apenas malha fluídica .....                                   | 83 |
| Fig. 45 – Modelagem dos canais para simulações hidrodinâmicas .....                                                                                   | 85 |
| Fig. 46 – Detalhes da malha selecionada para simulação hidrodinâmica: (a) canal complexo; (b) canal reto.....                                         | 86 |
| Fig. 47 – Evolução da tensão equivalente térmica no tempo para o experimento <i>c_T50_I</i> ....                                                      | 88 |
| Fig. 48 – Parâmetros de temperatura, vazão e velocidade monitorados ao longo do experimento <i>c_T50_I</i> .....                                      | 89 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 49 – Tensão térmica transiente para diferentes diferenciais de temperatura.....                                                                | 90  |
| Fig. 50 – Comparação entre o pico térmico experimental, numérico e analítico para o experimento <i>c_T50_2</i> .....                                | 91  |
| Fig. 51 – Parâmetros monitorados durante o experimento com destaque para os intervalos de obtenção de dados para comparações com modelos .....      | 94  |
| Fig. 52 – Comparação da tensão no regime permanente para os dados do experimento <i>c_T50_2_rp</i> .....                                            | 95  |
| Fig. 53 – Tensão térmica transiente para 20°C.....                                                                                                  | 100 |
| Fig. 54 – Variação da tensão termomecânica transiente com $P = 150$ bar .....                                                                       | 102 |
| Fig. 55 – Comparação do pico de tensão termomecânica para as duas pressões avaliadas ...                                                            | 105 |
| Fig. 56 – Comparação do pico de tensão termomecânica experimental e analítico.....                                                                  | 106 |
| Fig. 57 – Campo de tensões do cilindro ( <i>von Mises</i> ): (a) Tensões mecânicas; (b) Tensões térmicas e (c) Tensões termomecânicas; .....        | 109 |
| Fig. 58 – Tensão termomecânica transiente no protótipo do trocador de calor para choques de temperatura de 10°C e 20°C e pressão de 100 bar .....   | 110 |
| Fig. 59 – Tensão termomecânica transiente no protótipo do trocador de calor para choques de temperatura de 10°C e 20°C e pressão de 200 bar .....   | 111 |
| Fig. 60 – Comparação entre modelo numérico e experimento da tensão termomecânica transiente para o caso <i>p_T20P200_10</i> .....                   | 115 |
| Fig. 61 – Campo de tensões no protótipo para o caso <i>p_T20P200_4</i> : (a) vista lateral; (b) vista inferior .....                                | 116 |
| Fig. 62 – Tensão equivalente em função do tempo: (a) posição de medição; (b) tensão termomecânica e (c) parcelas térmicas e mecânicas isoladas..... | 118 |
| Fig. 63 – Tensão térmica transiente máxima na parede entre canais: (a) transversais; (b) longitudinais .....                                        | 119 |
| Fig. 64 – Tensão térmica transiente em função do tempo nas regiões críticas para tensão térmica .....                                               | 120 |
| Fig. 65 – Tensão termomecânica em diferentes regiões para temperatura de 120°C.....                                                                 | 121 |
| Fig. 66 – tensão térmica transiente para $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ e $t = 1.54$ segundos.....                                                  | 121 |
| Fig. 67 – Avaliação da ruptura/vida infinita para cada corpo de prova em função da tensão alternada.....                                            | 124 |
| Fig. 68 – Curva <i>S – N</i> referente ao aço inoxidável <i>SLM 316L</i> e <i>ASME 316L</i> .....                                                   | 125 |
| Fig. 85 – Variação da rugosidade ao longo de um canal .....                                                                                         | 127 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 70 – (a) Taxa de transferência experimental, analítica e numérica para ar no ramal reto; (b) Coeficiente global de transferência de calor vezes área .....                                                                                                                                       | 130 |
| Fig. 71 – Campo de temperatura no painel do trocador de calor: (a) sólido; (b) fluídos .....                                                                                                                                                                                                          | 131 |
| Fig. 72 – Comparação do número de Nusselt do canal reto obtido por correlações, método das resistências e modelo numérico .....                                                                                                                                                                       | 133 |
| Fig. 73 – Comparação da primeira lei para a taxa de transferência da água e do ar .....                                                                                                                                                                                                               | 134 |
| Fig. 74 – (a) Taxa de transferência de calor experimental em função de $Re$ ; (b) Comparação entre taxa experimental e numérica; (c) Taxa de transferência de calor experimental e numérica em função de $Re$ ; (d) Coeficiente global de transferência de calor vezes área em função de $Re$ . ..... | 138 |
| Fig. 75 – Campo de temperatura no modelo numérico com parâmetros do experimento $T50-ac9$ : (a) sólido; (b) fluido .....                                                                                                                                                                              | 139 |
| Fig. 76 – Comparação entre canais complexos em retos: (a) coeficiente global de transferência de calor; (b) Nusselt .....                                                                                                                                                                             | 141 |
| Fig. 77 – Comparação da taxa de transferência do ramal frio e quente para os experimentos .....                                                                                                                                                                                                       | 143 |
| Fig. 78 – $Th = 50^{\circ}C$ : (a) taxa de transferência de calor; (b) coeficiente global de transferência de calor vezes área .....                                                                                                                                                                  | 144 |
| Fig. 79 – Comparação da taxa de transferência de calor experimental e numérica e razão entre resistências térmicas para o conjunto $afr4$ : $Th = 60^{\circ}C$ e $Rec = 2300$ .....                                                                                                                   | 145 |
| Fig. 80 – Campo de temperatura na lâmina núcleo: (a) $Th = 60^{\circ}C$ , $Rec = 2325$ e $Reh = 1799$ ; (b) $Th = 60^{\circ}C$ , $Rec = 2407$ e $Reh = 7107$ .....                                                                                                                                    | 147 |
| Fig. 81 – Linhas de corrente nos canais retos e complexos para: (a) $aqc1-afr4$ ; (b) $aqc12-afr4$ ; (c) aproximação do canal complexo para $aqc12-afr4$ .....                                                                                                                                        | 148 |
| Fig. 82 – Comparação da taxa de transferência do ramal frio e quente para os experimentos .....                                                                                                                                                                                                       | 150 |
| Fig. 83 – $Th = 45^{\circ}C$ : (a) taxa de transferência de calor; (b) coeficiente global de transferência de calor vezes área .....                                                                                                                                                                  | 151 |
| Fig. 84 – Comparação da taxa de transferência de calor e razão entre resistências térmicas para o conjunto $aqr4$ : $Th = 45^{\circ}C$ e $Reh = 11500$ .....                                                                                                                                          | 152 |
| Fig. 85 – Lâmina do trocador de calor complexo com parâmetros do experimento $aqc10-aqr$ ( $Th = 45^{\circ}C$ , $Rec = 3034$ e $Reh = 11539$ ): (a) fluídos; (b) sólido .....                                                                                                                         | 153 |
| Fig. 86 – (a) $Nu/Pr^{0,4}$ em função de $Re$ ; (b) Comparação entre $Nu$ obtido no modelo numérico com a correlação proposta .....                                                                                                                                                                   | 154 |

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Fig. 87 – Comparação entre correlação de Nu proposta com demais disponíveis na literatura .....                                                                              | 155 |
| Fig. 88 – Queda de pressão do ramal complexo: (a) água; (b) ar.....                                                                                                          | 157 |
| Fig. 89 – Comparação da queda de pressão avaliada com água no ramal reto – experimental, analítico e numérico.....                                                           | 158 |
| Fig. 90 – Geometrias alternativas para investigação da divergência de perda de carga no canal reto .....                                                                     | 159 |
| Fig. 91 – Imagem de um dos canais retos utilizados para concepção da geometria ( <b>f</b> ) .....                                                                            | 160 |
| Fig. 92 – Comparação entre a queda de pressão experimental corrigida e numérica considerando a geometria <b>f</b> : (a) água; (b) ar.....                                    | 161 |
| Fig. 93 – Comparação do fator de atrito de <i>Fanning</i> experimental e numérico para a o canal reto – “ <i>st</i> ” (geometria <b>f</b> ) e complexo – “ <i>co</i> ” ..... | 162 |
| Fig. 94 – Condições de contorno e carregamento para simulação estrutural da lâmina do trocador complexo .....                                                                | 163 |
| Fig. 95 – Campo de tensão térmica na lâmina do trocador complexo com faces suportadas sem atrito: (a) canais complexos e (b) canais retos.....                               | 164 |
| Fig. 96 – Campo de tensão mecânica na lâmina do trocador complexo: (a) canais complexos e (b) canais retos.....                                                              | 165 |
| Fig. 97 – Campo de tensão termomecânica na lâmina do trocador complexo:(a) canais complexos e (b) canais retos.....                                                          | 166 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L de fabricação comum e <i>SLM</i> ..... | 13  |
| Tabela 2 – Coeficientes em função da tensão alternada (temperatura abaixo de 371 °C) .....                          | 25  |
| Tabela 3 – Correlações para o fator de atrito $f$ para canais retos.....                                            | 29  |
| Tabela 4 – Modelos empíricos para o número de Nusselt médio ( $Num$ ) de canais retos.....                          | 32  |
| Tabela 5 – Compilado de correlações propostas para Nusselt disponíveis na literatura .....                          | 34  |
| Tabela 6 – Estrutura da metodologia empregada no trabalho .....                                                     | 38  |
| Tabela 7 – Propriedades mecânicas e térmicas do cilindro .....                                                      | 40  |
| Tabela 8 – Especificação dos equipamentos e sensores utilizados .....                                               | 42  |
| Tabela 9 – Conjunto de experimentos de tensão térmica no cilindro.....                                              | 44  |
| Tabela 10 – Especificação dos equipamentos e sensores utilizados .....                                              | 45  |
| Tabela 11 – Características das amostras fabricadas para ensaios de pressurização.....                              | 52  |
| Tabela 12 – Propriedades mecânicas de peças fabricadas em aço <i>EOS 316L</i> .....                                 | 54  |
| Tabela 13 – Propriedades mecânicas e térmicas do protótipo <i>SLM</i> trocador compacto .....                       | 54  |
| Tabela 14 – Características geométricas do núcleo .....                                                             | 67  |
| Tabela 15 – Sensores utilizados na bancada água – ar .....                                                          | 72  |
| Tabela 16 – Planejamento de experimentos para a configuração água – ar .....                                        | 73  |
| Tabela 17 – Especificação dos sensores e suas respectivas incertezas de medição .....                               | 75  |
| Tabela 18 – Planejamento de experimentos alternando o ramal quente e frio .....                                     | 77  |
| Tabela 19 – Especificações dos transdutores de pressão diferencial.....                                             | 79  |
| Tabela 20 – Níveis de vazão de água e ar utilizados nos experimentos hidrodinâmicos .....                           | 80  |
| Tabela 21 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para o pico de tensão térmica transiente.....        | 92  |
| Tabela 22 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para a tensão em regime..                            | 96  |
| Tabela 23 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para a tensão mecânica ...                           | 98  |
| Tabela 24 – Vazão mássica utilizada nos experimentos termomecânicos .....                                           | 99  |
| Tabela 25 – Pico de tensão térmica para as vazões utilizadas no experimento termomecânico .....                     | 100 |
| Tabela 26 – Comparação dos picos de tensão termomecânica para $P = 100$ bar .....                                   | 103 |
| Tabela 27 – Comparação dos picos de tensão termomecânica para $P = 150$ bar .....                                   | 104 |
| Tabela 28 – Comparação dos picos de tensão termomecânica com picos sobrepostos .....                                | 107 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 29 – Valores de tensão termomecânica transiente no protótipo em comparação com os resultados numéricos – $P = 100\text{bar}$ .....   | 113 |
| Tabela 30 – Valores de tensão termomecânica transiente no protótipo em comparação com os resultados numéricos – $P = 200\text{bar}$ .....   | 114 |
| Tabela 31 – Vida em fadiga dos corpos de prova padrão para fadiga uniaxial.....                                                             | 123 |
| Tabela 32 – Diâmetro corrigido dos canais.....                                                                                              | 126 |
| Tabela 33 – Rugosidade medida no protótipo.....                                                                                             | 126 |
| Tabela 34 – Resultado experimental - ar no ramal reto e água no complexo.....                                                               | 128 |
| Tabela 35 – Resultado experimental - ar no ramal complexo e água no reto.....                                                               | 135 |
| Tabela 36 – Resultados dos experimentos com água quente no ramal complexo e fria no ramal reto para $Th = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ..... | 142 |
| Tabela 37 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para $Th = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ .....     | 149 |
| Tabela 38 – Queda de pressão avaliada nas geometrias alternativas.....                                                                      | 160 |
| Tabela 39 – Coeficientes convectivos para canais complexos e retos.....                                                                     | 163 |
| Tabela 40 – Tensão máxima e média para cada conjunto de canais e condição de contorno                                                       | 166 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                        |                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------|
| <i>ABS</i>             | <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>              |
| <i>AISI</i>            | <i>American Iron and Steel Institute</i>            |
| <i>ASME</i>            | <i>American Society of Mechanical Engineers</i>     |
| <i>ASTM</i>            | <i>American Society of Testing and Materials</i>    |
| <i>CFD</i>             | <i>Computational Fluid Dynamics</i>                 |
| <i>CHE</i>             | <i>Compact Heat Exchanger</i>                       |
| <i>DNS</i>             | <i>Direct Numerical Simulation</i>                  |
| <i>EOS</i>             | <i>Electro-Optical Systems</i>                      |
| <i>FS</i>              | <i>Full Scale</i>                                   |
| <i>ISO</i>             | <i>Internation Organization for Standardization</i> |
| <i>LES</i>             | <i>Large Eddy Simulation</i>                        |
| <i>LRF</i>             | <i>Limite de Resistência à Fadiga</i>               |
| <i>MA</i>              | <i>Manufatura Aditiva</i>                           |
| <i>MEF</i>             | <i>Método dos Elementos Finitos</i>                 |
| <i>MR</i>              | <i>Medição Realizada</i>                            |
| <i>NI</i>              | <i>National Instruments</i>                         |
| <i>NTU</i>             | <i>Number of Transfer Units</i>                     |
| <i>PCHE</i>            | <i>Printed Circuit Heat Exchanger</i>               |
| <i>PFHE</i>            | <i>Plate Fin Heat Exchanger</i>                     |
| <i>PSV</i>             | <i>Platform Supply Vessel</i>                       |
| <i>RANS</i>            | <i>Reynolds Average Navier Stokes</i>               |
| <i>RTD</i>             | <i>Resistance Temperature Detector</i>              |
| <i>sCO<sub>2</sub></i> | <i>Supercritical Carbon Dioxide</i>                 |
| <i>SLM</i>             | <i>Selective Laser Melting</i>                      |
| <i>SST</i>             | <i>Shear Stress Theory</i>                          |
| <i>SS 316L</i>         | <i>Stainless Steel 316L</i>                         |
| <i>TPMS</i>            | <i>Triply Periodic Minimal Surface</i>              |
| <i>UTS</i>             | <i>Ultimate Tensile Strength</i>                    |
| <i>3D</i>              | <i>Tridimensional</i>                               |
| <i>exp</i>             | <i>Experimental</i>                                 |
| <i>num</i>             | <i>Numerical</i>                                    |

## LISTA DE SIMBOLOS

|                     |                                        |                     |
|---------------------|----------------------------------------|---------------------|
| $A$                 | Área                                   | [m <sup>2</sup> ]   |
| $D$                 | Diâmetro                               | [mm]                |
| $D_{complexo}$      | Diâmetro – complexo                    | [mm]                |
| $D_{reto}$          | Diâmetro – reto                        | [mm]                |
| $E$                 | Módulo elástico                        | [GPa]               |
| $f$                 | Coefficiente de atrito                 | [-]                 |
| $h$                 | Coefficiente convectivo                | [W/mK]              |
| $k$                 | Condutividade térmica                  | [W/mK]              |
| $k_s$               | Altura equivalente de rugosidade       | [μm]                |
| $L$                 | Comprimento                            | [m]                 |
| $\dot{m}$           | Vazão mássica                          | [kg/s]              |
| $\dot{m}_{channel}$ | Vazão mássica do canal                 | [kg/s]              |
| $Nu$                | Nusselt                                | [-]                 |
| $P$                 | Pressão                                | [bar]               |
| $P_{co}$            | Pressão – complexo                     | [bar]               |
| $P_{st}$            | Pressão – reto                         | [bar]               |
| $Pr$                | Prandtl                                | [-]                 |
| $q$                 | Taxa de transferência de calor         | [kW]                |
| $q''_{wall}$        | Fluxo de calor na parede               | [W/m <sup>2</sup> ] |
| $R$                 | Resistência térmica                    | [-]                 |
| $Ra$                | Rugosidade média                       | [μm]                |
| $Re$                | Reynolds                               | [-]                 |
| $Rq$                | Rugosidade quadrática média            | [μm]                |
| $Rz$                | Altura de rugosidade entre pico – vale | [μm]                |
| $S$                 | Tensão equivalente                     | [MPa]               |
| $Sp$                | Tensão mecânica equivalente            | [MPa]               |
| $St$                | Tensão térmica equivalente             | [MPa]               |
| $Stp$               | Tensão termomecânica equivalente       | [MPa]               |
| $t_{complexo}$      | Espessura entre canais complexos       | [mm]                |
| $t_{reto}$          | Espessura mínima entre ramais          | [mm]                |
| $T$                 | Temperatura                            | [°C]                |

|                       |                                              |                       |
|-----------------------|----------------------------------------------|-----------------------|
| $T_a$                 | Temperatura do ar                            | [°C]                  |
| $T_b$                 | Temperatura do volume                        | [°C]                  |
| $T_i$                 | Temperatura inicial                          | [°C]                  |
| $T_s$                 | Temperatura da superfície                    | [°C]                  |
| $T_w$                 | Temperatura da água                          | [°C]                  |
| $T_{wall}$            | Temperatura da parede                        | [°C]                  |
| $u_{exp}$             | Incerteza experimental                       | [-]                   |
| $U$                   | Coeficiente global de transferência de calor | [W/m <sup>2</sup> °C] |
| $\Delta T$            | Diferencial de temperatura                   | [°C]                  |
| $\varepsilon$         | Rugosidade relativa                          | [μm]                  |
| $\varepsilon_{1,2,3}$ | Deformação da grade do extensômetro          | [μm/μm]               |
| $\varepsilon_{p,q}$   | Deformações principais                       | [μm/μm]               |
| $\theta$              | Ângulo entre deformação principal e grade 1  | [rad]                 |
| $\mu$                 | Viscosidade dinâmica                         | [Pa.s]                |
| $\sigma_{eq,vm}$      | Tensão equivalente de <i>von Mises</i>       | [MPa]                 |
| $\sigma_{p,q}$        | Tensões principais                           | [MPa]                 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                     |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | OBJETIVOS.....                                                      | 3         |
| 1.1.1    | Objetivo geral .....                                                | 3         |
| 1.1.2    | Objetivos específicos.....                                          | 4         |
| <b>2</b> | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                  | <b>5</b>  |
| 2.1      | TROCADORES DE CALOR COMPACTOS .....                                 | 5         |
| 2.1.1    | Trocador de calor de circuito impresso ( <i>PCHE</i> ) .....        | 8         |
| 2.1.2    | Trocadores de calor fabricados por manufatura aditiva.....          | 9         |
| 2.2      | MANUFATURA ADITIVA .....                                            | 11        |
| 2.2.1    | Fusão seletiva à laser ( <i>SLM</i> ).....                          | 11        |
| 2.3      | TENSÕES E DEFORMAÇÕES .....                                         | 15        |
| 2.3.1    | Tensões mecânicas.....                                              | 17        |
| 2.3.2    | Tensões térmicas.....                                               | 18        |
| 2.3.3    | Tensões termomecânicas.....                                         | 21        |
| 2.4      | FADIGA .....                                                        | 22        |
| 2.4.1    | Avaliação de fadiga de acordo com a ASME .....                      | 24        |
| 2.4.2    | Fadiga em trocadores de calor .....                                 | 26        |
| 2.4.3    | Fadiga em aço inoxidável 316L fabricado por MA .....                | 26        |
| 2.5      | ANÁLISE TERMO HIDRÁULICA DE CANAIS CIRCULARES .....                 | 27        |
| 2.5.1    | Perda de carga .....                                                | 27        |
| 2.5.2    | Térmico.....                                                        | 29        |
| 2.6      | MODELO DE ELEMENTOS FINITOS E FLUIDODINÂMICA<br>COMPUTACIONAL ..... | 34        |
| 2.6.1    | Modelos de turbulência.....                                         | 35        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA .....</b>                                            | <b>38</b> |
| 3.1      | AVALIAÇÃO ESTRUTURAL .....                                          | 39        |

|       |                                                                                      |     |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.1.1 | Cilindro.....                                                                        | 39  |
| 3.1.2 | Bancadas experimentais – Cilindro .....                                              | 40  |
| 3.1.3 | Modelo numérico – Cilindro .....                                                     | 49  |
| 3.1.4 | Protótipo estrutural <i>SLMHE</i> .....                                              | 51  |
| 3.1.5 | Bancada experimental – Protótipo estrutural <i>SLMHE</i> .....                       | 55  |
| 3.1.6 | Modelo numérico – Protótipo estrutural <i>SLMHE</i> .....                            | 58  |
| 3.1.7 | Curva tensão ( <i>S</i> ) – número de ciclos ( <i>N</i> ) do <i>SLM SS316L</i> ..... | 61  |
| 3.2   | DESEMPENHO TERMO HIDRÁULICO .....                                                    | 63  |
| 3.2.1 | Núcleo com canais complexos fabricado por <i>SLM</i> .....                           | 63  |
| 3.2.2 | Bancadas experimentais para avaliação termo hidráulica.....                          | 70  |
| 3.2.3 | Modelo numérico – Núcleo .....                                                       | 80  |
| 3.2.4 | Modelo numérico – Canais .....                                                       | 84  |
| 4     | RESULTADOS .....                                                                     | 87  |
| 4.1   | CILINDRO .....                                                                       | 87  |
| 4.1.1 | Tensão térmica transiente.....                                                       | 87  |
| 4.1.2 | Tensão térmica no regime permanente .....                                            | 93  |
| 4.1.3 | Tensões mecânicas.....                                                               | 96  |
| 4.1.4 | Tensões termomecânicas.....                                                          | 98  |
| 4.2   | PROTÓTIPO ESTRUTURAL <i>SLMHE</i> .....                                              | 109 |
| 4.2.1 | Tensão termomecânica transiente .....                                                | 109 |
| 4.3   | FADIGA.....                                                                          | 122 |
| 4.3.1 | Curva tensão ( <i>S</i> ) – número de ciclos ( <i>N</i> ) <i>SLM SS316L</i> .....    | 122 |
| 4.4   | NÚCLEO DO TROCADOR DE CALOR COMPLEXO .....                                           | 125 |
| 4.4.1 | Correção do diâmetro e rugosidade dos canais .....                                   | 125 |
| 4.4.2 | Térmico – configuração água – ar .....                                               | 127 |
| 4.4.3 | Térmico – configuração água – água.....                                              | 141 |
| 4.4.4 | Correlação de Nusselt para canal complexo .....                                      | 153 |

|       |                                                                                                                                        |     |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.4.5 | Hidrodinâmico .....                                                                                                                    | 155 |
| 4.4.6 | Estrutural.....                                                                                                                        | 162 |
| 5     | CONCLUSÃO .....                                                                                                                        | 168 |
|       | REFERÊNCIAS .....                                                                                                                      | 171 |
|       | APÊNDICE A – Tensões térmicas em cilindros espessos no regime transiente e permanente.....                                             | 178 |
|       | APÊNDICE B – Extensômetros e aquisição de dados .....                                                                                  | 186 |
|       | APÊNDICE C – Convergência de malha e compilado de experimentos para o cilindro espesso .....                                           | 191 |
|       | APÊNDICE D – Convergência de malha e compilado de experimentos para o protótipo <i>SLMHE</i> .....                                     | 195 |
|       | APÊNDICE E – Tratamento térmico realizado no núcleo de trocador de calor .....                                                         | 197 |
|       | APÊNDICE F – Fotografias utilizadas para averiguação do diâmetro dos canais .....                                                      | 198 |
|       | APÊNDICE G – Incerteza experimental combinada para taxa de transferência de calor e coeficiente global de transferência de calor ..... | 199 |
|       | APÊNDICE H – Convergência de malha e compilado de experimentos para a lâmina do trocador complexo .....                                | 203 |
|       | APÊNDICE I – Convergência de malha e compilado de experimentos para os canais.....                                                     | 210 |
|       | APÊNDICE J – Compilado dos experimentos com ar no ramal reto e água no ramal complexo .....                                            | 213 |
|       | APÊNDICE K – Compilado dos experimentos com ar no ramal complexo e água no ramal reto.....                                             | 215 |
|       | APÊNDICE L – Compilado dos experimentos com água quente no ramal complexo e água fria no ramal reto.....                               | 218 |
|       | APÊNDICE M – Compilado dos experimentos com água fria no ramal complexo e água quente no ramal reto .....                              | 225 |

## 1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor compactos (*CHEs*, do inglês *Compact Heat Exchangers*) realizam a transferência de energia térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas e são caracterizados pela elevada área de transferência de calor em pequenos volumes (Bejan e Kraus, 2003; Çengel e Ghajar, 2011; Incropera, 2007; Shah e Sekulić, 2003). Um dos principais trocadores de calor compactos existentes é o Trocador de Calor de Circuito Impresso (*PCHEs*, do inglês *Printed Circuit Heat Exchangers*), composto por um núcleo com canais semicirculares de caminho reto e/ou zigue zague. Eles podem operar em altas temperaturas e pressões de trabalho, até 900°C e 400 bar, respectivamente (Hesselgreaves, 2017).

Estudos com *PCHEs* normalmente são relacionados ao comportamento termo hidráulico do equipamento, abordando a influência de parâmetros geométricos no desempenho, como o ângulo do zigue-zague, comprimento e raio de curvatura. Alguns trabalhos, como os de Chen et al. (2019) e Ngo et al. (2007) realizaram estudos experimentais da influência do caminho do canal na transferência de calor. Entretanto, a maioria dos trabalhos utiliza modelos numéricos para avaliar o comportamento termo hidráulico de configurações de canais existentes ou novas, como pode ser visto nos trabalhos de Saeed et al. (2020), Yoon et al. (2017) e Ejaz et al. (2024).

O processo de fabricação de *PCHEs*, soldagem por difusão, permite a produção de canais semicirculares com caminhos retos, sinusoidais e zigue-zague, todos com caminhos bidimensionais (Yin et al., 2023). A produção de canais complexos com caminhos tridimensionais é difícil, e em alguns casos impossível, por tal processo de fabricação. Castelain et al. (2016) investigaram numericamente oito geometrias retangulares com caminhos complexos (tridimensionais), observando um desempenho térmico superior em comparação a canais de caminho reto.

Em razão disso, a impressão 3D ou Manufatura Aditiva (MA) surge como uma alternativa viável, visto que esta tecnologia tem maior flexibilidade geométrica de produção. Dentre os processos de manufatura aditiva, a Fusão Seletiva a Laser (*SLM*, do inglês *Selective Laser Melting*), caracterizada pelo uso de lasers e pó metálico, é uma das mais populares (Hosseini et al., 2022). A técnica *SLM* produz amostras com boa resistência mecânica, semelhante às produzidas por laminação (Alsalla et al., 2018) ou forjamento (Li et al., 2023), permitindo a produção de estruturas complexas (Manjaiah et al., 2021) e mini canais circulares (Kempen, 2014).

O uso da MA para produzir canais complexos ainda é recente, existindo poucos trabalhos que abordam este tema (Chen et al., 2025; Wang et al., 2024), fabricando e testando mini canais de caminho tridimensional. No presente trabalho desenvolveu-se e analisou-se, numericamente e experimentalmente, uma nova geometria de canal complexo de seção circular. Este canal foi baseado na geometria que teve melhores resultados no trabalho de Castelain et al. (2016).

Como mencionado anteriormente, o projeto de *PCHEs* deve considerar as características termo hidráulicas de operação, entretanto, como tais equipamentos operam com altas pressões e temperaturas de trabalho, ele também deve considerar as tensões térmicas e mecânicas envolvidas. Sui et al. (2022) e Sui et al. (2024) avaliaram termo hidraulicamente *PCHEs* operando a altas pressões (237 bar e 125 bar) e temperaturas (578°C e 344°C). No estudo de Safari et al. (2023) as condições de operação foram:  $P = 230$  bar e  $\Delta T = 230$  °C.

Nenhum dos trabalhos citados anteriormente considerou a integridade estrutural do trocador sob estas condições. De acordo com Callister (2007), a tensão mecânica é a força aplicada sobre uma área que resulta em deformação ou alteração de forma. Noda et al. (2018) definem a tensão térmica como a tensão causada por variações de temperatura em um material, levando a alterações na forma ou nas dimensões.

A tensão termomecânica combina ambas as tensões, causadas por mudanças de temperatura e cargas mecânicas. Hetnarski e Eslami (2009) enfatizam a importância dessas tensões na engenharia, visto que são cruciais para a prevenção de falhas estruturais. No entanto, mesmo sendo importante no projeto de trocadores de calor, as cargas termomecânicas transientes não são difundidas em estudos de trocadores. A maioria dos trabalhos as aborda de maneira separada, como pode ser visto nos trabalhos de Yang et al. (2021), Zilio et al. (2022) Wu et al. (2022) e Teixeira Junior et al. (2023). Mylavarapu et al. (2014), por exemplo, propuseram uma geometria de *PCHE*, definindo diâmetros de canal e espessura de parede para operar a 30 bar, negligenciando o efeito da temperatura (800°C).

Os estudos mencionados destacaram a importância das tensões térmicas e mecânicas no projeto de trocadores de calor. No entanto, a abordagem isolada não reflete a realidade, visto que ambas ocorrem simultaneamente. Por isso, um dos objetivos do presente trabalho é avaliar as tensões termomecânicas transientes na estrutura de um trocador de calor.

O uso de MA para a produção de trocadores de calor é recente, entretanto, a quantidade de trabalhos envolvendo esta tecnologia cresceu nos últimos anos, mostrando a importância dessa área de pesquisa. Neste trabalho empregou-se modelos numéricos e dados experimentais para avaliar um trocador de calor compacto obtido por impressão 3D, focando tanto no

desempenho térmico e hidráulico, bem como nas tensões térmicas, mecânicas e termomecânicas envolvidas, abordando questões ainda pouco exploradas na literatura.

Estruturou-se o trabalho em duas partes, a primeira aborda as tensões termomecânicas em um trocador de calor, e a segunda o desempenho termo hidráulico de um núcleo de trocador de calor.

Uma amostra de *CHE* com canais circulares foi fabricada por *SLM* e instrumentada para medir a deformação (tensão). Experimentos de tensão termomecânica transiente foram conduzidos na amostra, utilizando escoamento de água quente em um ramal e pressurização interna no outro. O conjunto de resultados experimentais foram comparados com o modelo numérico. Devido a boa coerência do modelo numérico, uma nova simulação foi conduzida considerando parâmetros similares às condições reais de operação de *PCHEs*,  $P = 200$  bar e  $T = 120$  °C. O estudo demonstra o pico de tensão termomecânica é crítico para operação do equipamento, atingindo magnitudes superiores a tensão de escoamento do material de fabricação.

Um núcleo de trocador compacto composto por canais complexos, utilizando uma geometria inédita de canal, foi fabricado em aço inoxidável através do método *SLM*. O núcleo foi projetado com um arranjo de fluxo cruzado, composto por 348 canais complexos em um ramal e 143 canais retos no outro. Foram realizados testes experimentais e desenvolvidos modelos numéricos para comparação e validação dos resultados. O trocador foi avaliado através de 461 experimentos, considerando operação com água – ar e água – água. Os modelos numéricos desenvolvidos apresentaram erros médios menores que 10% para o térmico e 30% para o hidrodinâmico. A influência da rugosidade e da geometria do canal na taxa de transferência de calor e na perda de carga foi averiguada. Ao final do trabalho, foram desenvolvidas correlações para o número de Nusselt da geometria de canal complexo proposta.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar tensões térmicas, mecânicas e termomecânicas no regime transiente e permanente em um trocador de calor compacto fabricado por manufatura aditiva, além de analisar o desempenho termo hidráulico de um núcleo de trocador composto por canais complexos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliação experimental, numérica e analítica de tensões térmicas, mecânicas e termomecânicas transientes em um cilindro espessos com escoamento forçado e pressurização interna;
- Analisar experimentalmente e numericamente o comportamento da tensão mecânica, térmica e termomecânica em protótipo de trocador compacto de fluxo cruzado e canais circulares para diferentes condições de carregamento (convecção e pressão) e identificar regiões críticas;
- Analisar a vida em fadiga do material através de corpos de prova fabricados via manufatura aditiva com aço inoxidável 316L;
- Estudar o comportamento termo hidráulico de um protótipo de trocador de calor por SLM com canais circulares de caminho complexo e reto nas configurações água – ar e água – água de forma experimental e numérica analisando seu desempenho térmico e hidráulico;
- Avaliar o efeito da rugosidade superficial no desempenho do trocador de calor fabricado;
- Propor uma correlação para o número de Nusselt para o canal complexo;
- Avaliar numericamente as tensões termomecânicas transientes no núcleo do trocador de calor em condições similares às de operação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TROCADORES DE CALOR COMPACTOS

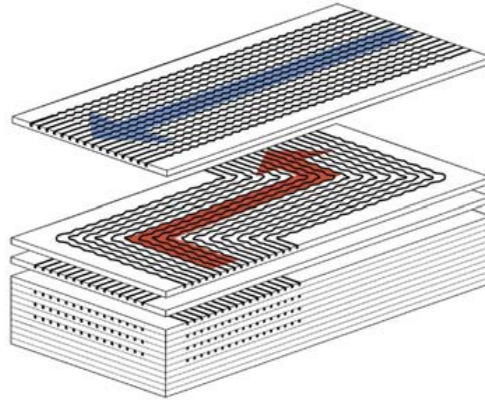
Trocadores de calor são dispositivos utilizados para transferência de energia térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas (Çengel; Ghajar, 2011). De acordo com Shah e Sekulic (2003), existem dois tipos de trocadores de calor. O primeiro, definido como regenerador, usa fluidos imiscíveis em contato direto. O segundo, mais comumente utilizado, é definido como recuperador, onde os fluidos são separados por uma parede sólida.

Recuperadores são normalmente compostos por um núcleo, que contém a superfície de transferência de calor, além de bocais de entrada e saída. A superfície de transferência é considerada direta quando está em contato direto com os fluidos de trabalho. Projetar um equipamento que tenha boa capacidade de troca de calor, com tamanho e peso adequado é um grande desafio, especialmente em setores onde o espaço tem alto custo, como no setor petrolífero. Nestes casos, tanto o transporte em navios de apoio à plataforma (*PSV – Platform Supply Vessel*) quanto a instalação desses sistemas nas plataformas de petróleo têm seus custos fortemente influenciados pelo tamanho do equipamento. Para essas aplicações são utilizados os trocadores de calor compactos que, de acordo com Hesselgreaves (2017), são dispositivos com alta densidade de área de transferência e alto coeficiente convectivo de transferência de calor.

De acordo com Bejan e Kraus (2003), o núcleo de um trocador de calor compacto pode ser tratado como uma superposição de camadas. Cada camada contém inúmeros canais, contendo as mais variadas seções transversais (retangulares, circulares, triangulares e semicirculares). As camadas são empilhadas alternadamente, sendo uma para o escoamento do fluido quente e outra para o escoamento do fluido frio. Por fim, é aplicado um processo de união para transformar as camadas independentes em um único núcleo.

Um exemplo da construção de um núcleo de trocador de calor compacto, o trocador de calor de circuito impresso (*PCHE – Printed Circuit Heat Exchanger*), é apresentado na Fig. 1. Nestes trocadores são gravados canais semicirculares em um lado da placa plana, caracterizando um dos ramais. Esse ramal é sobreposto com outra placa com canal de caminho diferente, por onde escoar o segundo fluido.

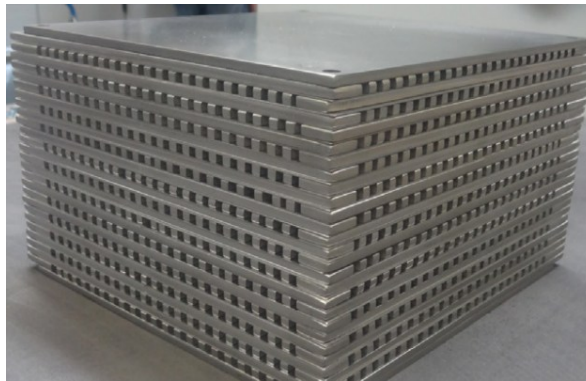
Fig. 1 – Núcleo de trocador compacto com arranjo de escoamento contracorrente (*PCHE*)



Fonte: (Pierres; Southall; Osborne, 2011).

Na Fig. 2 pode ser visualizado o núcleo do trocador de calor compacto proposto por Morteau e Mantelli (2019). A geometria é uma alternativa aos convencionais *PCHEs*, com camadas compostas por canais retangulares, soldadas por difusão.

Fig. 2 – Núcleo de trocador compacto com arranjo de escoamento cruzado e canais retangulares em bronze e em aço



Fonte: (Morteau; Mantelli, 2019).

Shah e Sekulic (2003) apresentam dois parâmetros importantes relacionados a compactação de um trocador de calor. O primeiro é a densidade de área de transferência ( $\beta$ ), calculado pela razão entre a área de transferência de calor de uma camada ( $A_s$ ) e o volume da camada de canais ( $V_{\text{lâmina}}$ ). O segundo é conhecido como compactação ( $\alpha$ ) e é determinado pela razão entre a área de troca total e o volume total do núcleo ( $V_{\text{total}}$ ).

$$\beta = \frac{A_s}{V_{\text{lâmina}}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{A_s}{V_{total}} \quad (2)$$

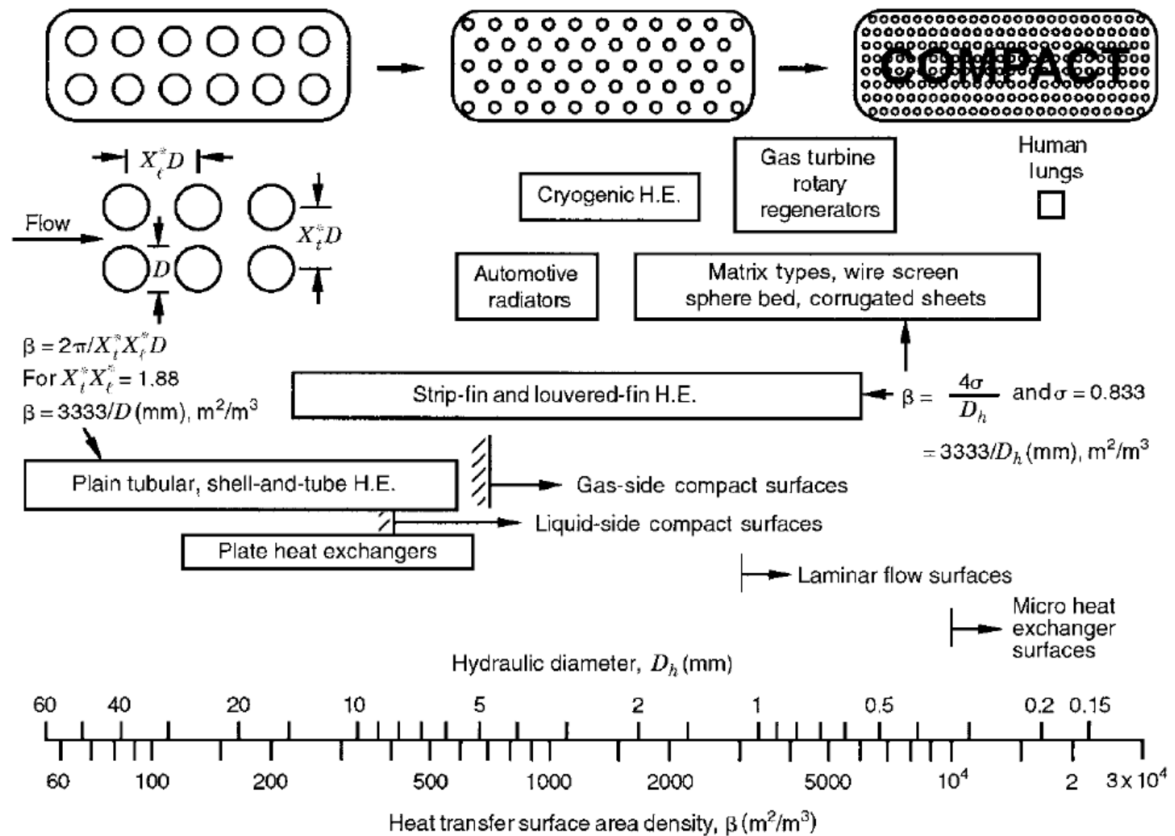
Um trocador é considerado compacto se tiver  $\beta$  maior que  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , para operação com gás, e maior que  $400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  para operação com líquidos. Na Fig. 3, vários exemplos de trocadores são apresentados juntamente com a faixa de valores de densidade superficial ( $\beta$ ) e diâmetro hidráulico do canal ( $D_h$ ). O diâmetro hidráulico é calculado por:

$$D_h = \frac{4A_{S,T}}{P} \quad (3)$$

onde  $P$  é o perímetro e  $A_{S,T}$  é a área da seção transversal.

Trocadores do tipo casco-tubo apresentam  $\beta = 100 \text{ m}^2/\text{m}^3$  enquanto alguns trocadores compactos podem apresentar um  $\beta$  maior que  $7000 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (Shah; Sekulic, 2003). Em relação ao diâmetro hidráulico, trocadores compactos operam com mini ou micro canais, operando com diâmetros menores que 3 mm.

Fig. 3 – Classificação de trocadores de acordo com a densidade de transferência



Fonte: Adaptado de Shah e Sekulic (2003).

### 2.1.1 Trocador de calor de circuito impresso (*PCHE*)

De acordo com Hesselgreaves (2017), existem diversos tipos de trocadores de calor compactos disponíveis no mercado, os mais conhecidos sendo o trocador de calor tipo placa (PHE), o trocador de calor placa aletada (PFHE) e o trocador de calor de circuito impresso (PCHE).

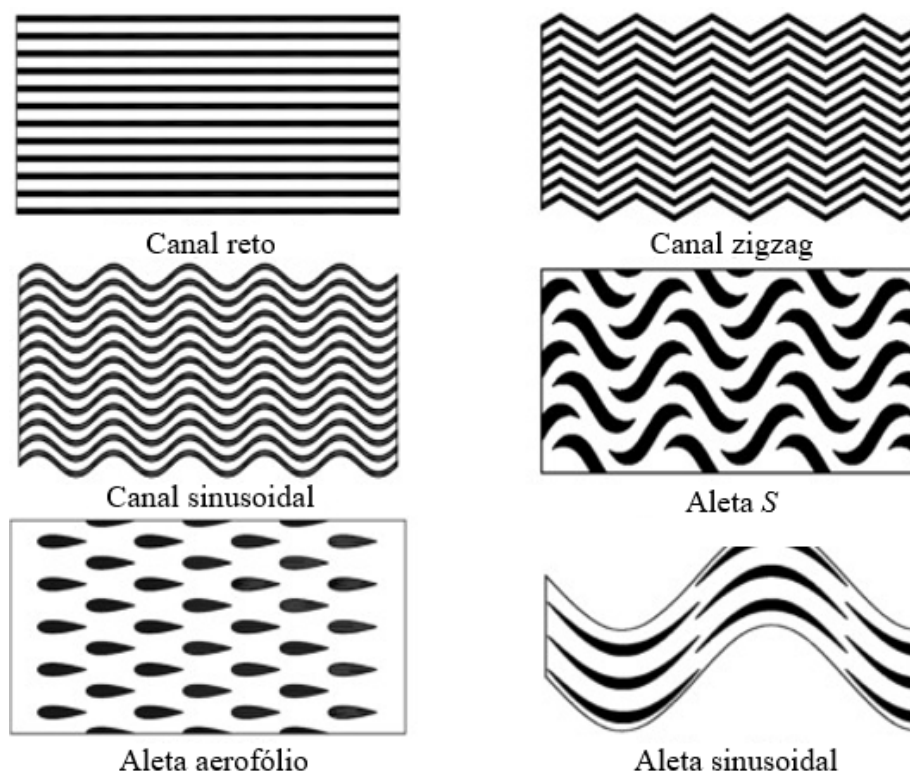
O trocador de calor de circuito impresso (*Printed Circuit Heat Exchanger - PCHE*) apresenta  $\beta$  de até 5000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. São empregados em processos que utilizam líquidos e gases, podendo operar com pressões de até 400 bar e temperaturas variando entre -200°C e 800°C. Sua estrutura é fabricada com placas de aço inoxidável e algumas ligas de titânio com níquel e também são produzidos empregando soldagem por difusão. O trocador de calor estudado no presente trabalho possui uma configuração muito semelhante ao trocador PCHE, como pode ser visto no trabalho de Zilio et al. (2022) e Da Silva et al. (2021).

Trocadores do tipo *PCHE* são utilizados em inúmeras aplicações, entre elas: armazenamento de gás natural liquefeito e unidades de regaseificação (Wang et al., 2022); reatores de alta temperatura (Kim; No, 2012); plantas de energia solar (Zhu et al., 2021); ciclos Brayton com CO<sub>2</sub> supercrítico (Saeed; Ali Awais; Berrouk, 2021); sistemas para recuperação de calor (Zhang et al., 2022); entre outras.

*PCHEs* são caracterizados, principalmente, por poderem operar com fluidos sob alta pressão, exigindo uma estrutura capaz de suportar esses esforços. Assim, parâmetros como o diâmetro dos canais e a espessura de parede devem ser considerados tanto no projeto termo hidráulico quanto na integridade estrutural do núcleo. Shah e Sekulic (2003) destacam que, além da questão estrutural, o diâmetro reduzido dos canais (menor que 3 mm) pode resultar em altas perdas de carga.

Diferentes autores (Mylavarapu et al. (2012), Yin et al. (2023), Han et al. (2023)) estudaram fatores estruturais mecânicos em *PCHE*, como impacto de espessura de parede, diâmetro e formato circular e semicircular de canais com modificações geométricas na seção de área transversal, entretanto, muitos autores recentemente focam em estudar caminhos de canais não retos para melhorar o desempenho termo hidráulico do trocador de calor. Na Fig. 4 são apresentados os diferentes caminhos que podem ser gravados em chapas de *PCHEs*.

Fig. 4 – Caminhos impressos em chapas de aço para formação dos canais de um PCHE



Fonte: Adaptado de Yang et al. (2022).

Na figura anterior, os canais estudados operam apenas no plano 2D. Isto deve-se as limitações do processo de união das camadas (soldagem por difusão) empregado na fabricação de trocadores de calor de circuito impresso. Devido as limitações apresentadas referentes aos processos de fabricação empregados atualmente, uma alternativa, que apresenta um grande potencial, é o uso da manufatura aditiva. Esta tecnologia é capaz de produzir geometrias complexas, com uma excelente precisão (Alteneiji et al., 2022).

### 2.1.2 Trocadores de calor fabricados por manufatura aditiva

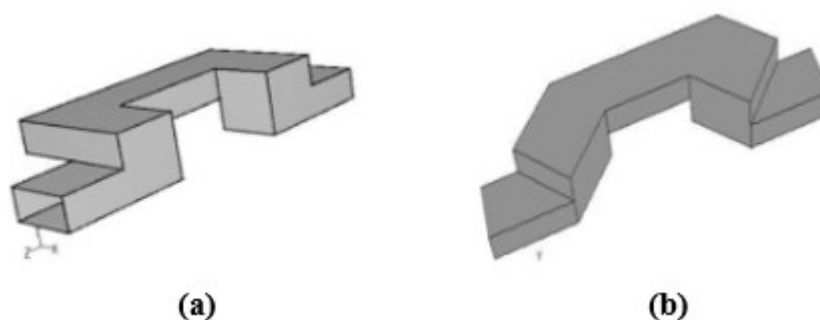
Na última década, o processo de manufatura aditiva começou a ser utilizado para fabricação de protótipos de trocadores de calor, tanto de polímero e resina como de metal, o que possibilitou o estudo de novas geometrias de canais bidimensionais (Hein; Morteau (2021), Dixit et al. (2022), El Achkar et al. (2022), Ning et al. (2022), Sabau et al. (2020)).

Trocadores fabricados por manufatura aditiva possuem uma maior flexibilidade geométrica que os trocadores *PCHEs*. As geometrias sinusoidais e zigue zague apresentadas na Fig. 4 podem ser considerados geometrias de canais complexos, no entanto, o caminho do canal

é bidimensional. A manufatura aditiva possibilita a fabricação de geometrias ainda mais complexas, considerando canais com caminhos tridimensionais.

Uma possibilidade de canal complexo é um zigue zague no plano enquanto é deslocado para cima e para baixo, como demonstrado no estudo de Castelain et al. (2016), ver Fig. 5. Em seu estudo, Castelain et al. (2016) propôs oito geometrias alternativas para melhorar o desempenho térmico de canais em células de combustível e as analisa numericamente como canais individuais, não acoplados em um trocador. Os autores constataram que as geometrias complexas possuíam uma maior capacidade de transferência de calor.

Fig. 5 – Caminhos caóticos como alternativa para melhorar a performance térmica em células de combustível: (a) *C-shape* e (b) *V-shape*



Fonte: (Castelain et al., 2016).

O estudo de Kim et al. (2016) estudou canais zigue zague com diferentes ângulos empregando CFD, assim como Meshram et al. (2016) e Yoon et al. (2017). A maioria dos estudos numéricos de canais em zigue zague para *PCHE* focaram em alterar a configuração do zigue zague (caminho do canal), principalmente com base no ângulo ou no comprimento. Contudo o uso de canais complexos tridimensionais em trocadores metálicos fabricados ainda não foi registrado na literatura, até o presente momento. Dois fatores limitantes e relevantes que podem contribuir para esta falta de protótipos deste tipo na literatura atual são as elevadas pressões de trabalho e diferenciais de temperatura, que podem ocasionar em altas tensões termomecânicas no equipamento.

Sabe-se que geometrias do tipo *TPMS* (*Triply Periodic Minimum Surfaces*) possuem elevadas taxas de transferência de calor (ver trabalho de Alteneiji et al. (2022)), entretanto não são viáveis para elevadas pressões devido a sua frágil configuração. Em contraponto, Zilio et al. (2022) demonstrou que um protótipo de trocador compacto fabricado via manufatura aditiva com canais circulares resiste até 350 bar de pressão.

Trocadores de calor compactos fabricados por fusão seletiva a laser ou sinterização a laser com canais retos já estão sendo estudados, como pode ser visto nos trabalhos de Hein e Mortean (2021), Da Silva et al. (2021) e Zilio et al. (2022). Entretanto, para o uso e equipamentos reais com canais tridimensionais complexos essa tecnologia de manufatura ainda precisa ser mais bem avaliada. Ainda não foi realizado um estudo sobre o uso da manufatura aditiva na fabricação de canais de geometria complexa, de modo a explorar suas limitações e possibilidades. Além disso, análises estruturais das tensões térmicas e mecânicas combinadas e da sua vida em fadiga ainda não foram realizadas. Uma das principais contribuições deste trabalho é investigar esses pontos, e verificar o potencial desta tecnologia para esta aplicação.

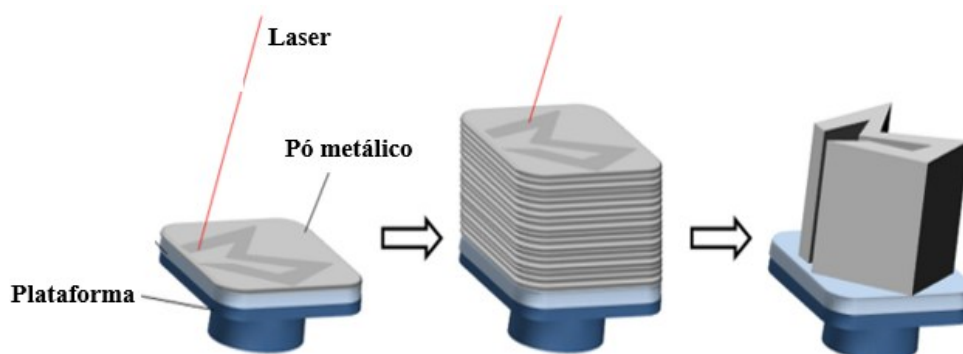
## 2.2 MANUFATURA ADITIVA

A manufatura aditiva (MA) é definida pela *ASTM (American Society of Testing and Materials)* como: “O processo de unir materiais para conceber objetos a partir de um modelo 3D, usualmente camada por camada, que é o oposto de metodologias subtrativas de fabricação”. Tecnologias de manufatura aditiva são procuradas para fabricação de geometrias que dificilmente seriam produzidas por processos de fabricação convencionais, como a usinagem (Manjaiah et al., 2021). Ela permite a fabricação de geometrias complexas, reduz custos e tempo com a montagem de componentes e pode substituir regiões de solda sem afetar as propriedades do material (Leary, 2020)(Gibson et al., 2015). Um método de MA que se destaca é a fusão seletiva à laser (*SLM – Selective Laser Melting*).

### 2.2.1 Fusão seletiva à laser (*SLM*)

A fusão seletiva a laser é uma técnica na qual uma camada fina de pó metálico é uniformemente aplicada na plataforma de impressão e exposta a um laser de alta densidade de energia para fusão e rápida solidificação. O processo é repetido até que a peça seja completamente impressa. O sequenciamento do processo é ilustrado na Fig. 6. Toda essa etapa ocorre em um ambiente de atmosfera controlada (Manjaiah et al., 2021). A deposição do pó metálico pode ser realizada de forma contínua e intermitente, evitando a concentração excessiva de calor em pequenas áreas para preservar as camadas inferiores da peça (Sarkar; Kumar; Nath, 2019).

Fig. 6 – Sequenciamento do processo de fusão seletiva a laser



Fonte: (Yap et al., 2015).

Segundo Yin et al. (2019), as partes fabricadas por *SLM* são altamente densas, com alta resistência mecânica, sendo uma boa opção para fabricação de trocadores compactos. De acordo com Suryawanshi et al. (2017), devido ao alto fluxo de calor transferido pelo laser e a constante movimentação ao longo da camada, o material é aquecido e resfriado rapidamente, resultando em uma granulação extremamente fina. Em consequência disso, espera-se uma boa resistência estrutural das peças impressas. Além disso, as propriedades mecânicas de peças fabricadas são ortotrópicas e dependem da direção de impressão (Alsalla et al., 2018).

#### 2.2.1.1 Propriedades de peças produzidas por *SLM*

Para uma análise estrutural adequada e trocadores de calor compactos produzidos por *MA* é necessário avaliar o comportamento mecânico do aço inoxidável 316L nestas aplicações. Autores apontam a diferença nas propriedades mecânicas de corpos de prova extraídos de peças fabricadas por *SLM* em aço inoxidável 316L (Suryawanshi et al. (2017), Alsalla et al. (2018), Zhang et al. (2019), Carassus et al. (2022), Li et al. (2023)) indicando uma maior resistência do matéria fabricado na direção transversal à impressão.

Desta forma, amostras produzidas por *SLM* apresentam propriedades ortotrópicas, ao contrário de metais laminados, como o AISI 316L – ver Tabela 1. No estudo de Alsalla et al. (2018) a tensão de escoamento mínima foi de 387 MPa enquanto que a norma exige um mínimo de 170 MPa. Os dados de Alsalla et al. (2018) apresentados consideram a amostra *xz* como horizontal e *zx* como vertical. Para o caso de Suryawanshi et al. (2017) são consideradas as propriedades das amostras produzidas com a estratégia *checkerboard*. Para o estudo de Zhang et al. (2019) fora considerado para os resultados horizontais a amostra impressa igualmente à *xz*.

Tabela 1 – Comparação entre as propriedades mecânicas do aço inoxidável 316L de acordo com *ASTM* e *SLM*

| Propriedades                          | Comum –<br>(ASTM<br>A240, 2022) | SLM –<br>Alsalla et al.<br>(2018) |        | SLM –<br>Suryawanshi<br>et al. (2017) |        | SLM – Zhang<br>et al. (2019) |        | SLM –<br>Carassus et<br>al. (2022) |        |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--------|---------------------------------------|--------|------------------------------|--------|------------------------------------|--------|
|                                       |                                 | Vert.                             | Horiz. | Vert.                                 | Horiz. | Vert.                        | Horiz. | Vert.                              | Horiz. |
| Massa específica (kg/m³)              | 7900                            |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Coef. de exp. térmica (1/C°)          | 0,0000162                       |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Módulo elasticidade (GPa)             | 200                             |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Poisson (-)                           | 0,3                             |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Bulk Modulus (GPa)                    | 134                             |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Módulo cisalhamento (GPa)             | 74                              |                                   |        |                                       |        |                              |        |                                    |        |
| Tensão de escoamento (MPa)            | 170                             | 387                               | 423    | 448                                   | 536    | 591                          | 609    | 450                                | 491    |
| Tensão limite de resistência<br>(MPa) | 480                             | 564                               | 695    | 528                                   | 668    |                              |        | 543                                | 605    |
| Alongamento até a fratura (%)         | 40                              | 35                                | 41     | 25                                    | 12     |                              |        | 46                                 | 21     |

Fonte: Autor (2025).

Yin et al. (2019) constataram que tratamentos superficiais melhoram o acabamento de peças fabricadas por SLM e diminuem os defeitos. Segundo os autores, o tratamento superficial aumentou o alongamento até a falha em 7% enquanto a tensão última em tração diminuiu 60 MPa. Mower e Long (2016) estudaram o comportamento mecânico e a vida em fadiga de peças fabricadas por SLM. De acordo com os autores, tratamentos superficiais promovem o fechamento de trincas, que é um mecanismo de nucleação de trincas, e aumentam a vida em fadiga do material.

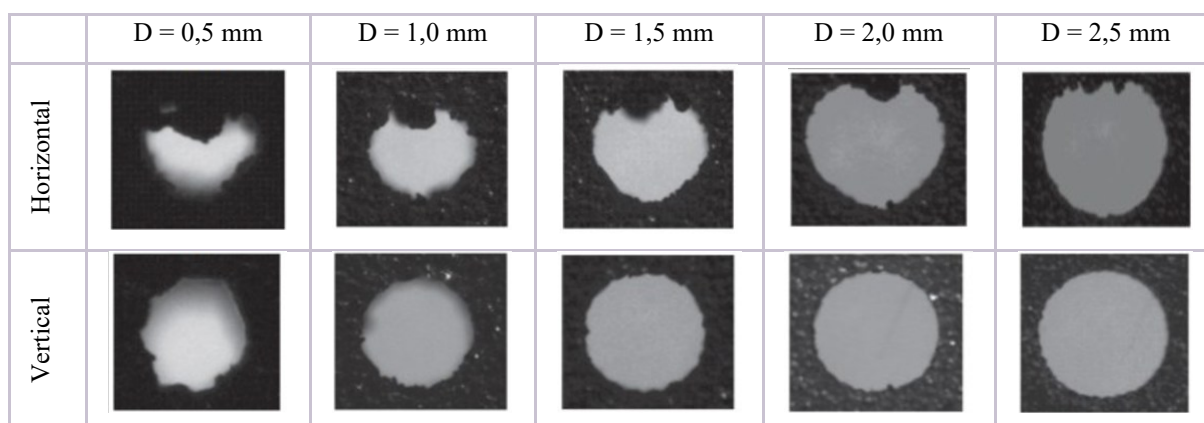
Hosseini et al. (2022) compararam duas metodologias de fusão em leito de pó: com laser (SLM) e com feixe de elétrons como fonte de energia. Ambas produziram amostras com acabamento superficial e tensões residuais semelhantes. Entretanto, aquelas produzidas por SLM apresentaram uma maior dureza superficial.

Waqar et al. (2022) estudaram a influência do pré-aquecimento e re-escaneamento na evolução de tensões residuais em *SLM SS-316L*. De acordo com os autores, o pré-aquecimento da plataforma de construção reduz consideravelmente a tensão residual enquanto o re-escaneamento não possui influência significativa. Um aquecimento de 400 °C na cama de pó e na plataforma fez com que as tensões residuais reduzissem de 353 MPa para 27 MPa e 30 MPa, respectivamente.

Além de estudos envolvendo as propriedades mecânicas de amostras produzidas por *SLM*, também existem estudos relacionados com a precisão da impressão. Kempen et al. (2014)

realizou uma pesquisa sobre a fabricação de canais circulares por meio da técnica SLM, com diâmetros variando entre 0,5 mm e 2,5 mm, para comparar a qualidade da seção transversal dos canais impressos horizontalmente e verticalmente em relação à plataforma de impressão. Na Fig. 7 são apresentadas as seções transversais de acordo com o diâmetro o canal.

Fig. 7 – Verificação seccional de canais com diferentes diâmetros e sentido de impressão



Fonte: Adaptado de Kempen et al. (2014).

Os autores constaram que os canais impressos na direção horizontal apresentaram uma qualidade de seção inferior àqueles impressos na vertical. Além disso, os autores também verificaram que os canais impressos verticalmente apresentam um arredondamento relativo abaixo de 0,05, enquanto nos horizontais entre 0,05 e 0,26. Kempen et al. (2014) que os canais possuíam melhor qualidade geométrica à medida que o diâmetro aumentava.

A qualidade inferior das seções dos canais impressos horizontalmente foi explicada pelo pó metálico não fundido. Durante a fusão dos canais horizontais, a força gravitacional faz com que o pó na parte superior do canal se desloque para baixo de modo que o material fique acumulado e não haja fusão completa. Nos canais verticais o deslizamento foi quase uniforme, afetando pouco a circularidade das seções (Kempen et al., 2014). Em razão disso, no presente trabalho decidiu-se por empregar diâmetros de pelo menos 2 mm.

Como pode ser observado nos estudos apresentados, a técnica de fusão seletiva a laser consegue produzir amostras com elevada resistência mecânica e bom alongamento, com peças produzidas em aço inoxidável tendo desempenho semelhante as produzidas por laminação (Alsalla et al. (2018)) ou forjamento (Li et al. (2023)). Além disso, ela também consegue produzir amostras com estruturas complexas (Manjaiah et al. (2021)), e até mini canais circulares (Kempen et al., 2014). Logo, esse processo de fabricação é uma boa opção para a fabricação de trocadores de calor compactos.

### 2.3 TENSÕES E DEFORMAÇÕES

O conceito de tensão é análogo ao de pressão, uma força distribuída sobre uma área. Como na maioria das situações analisadas pela Mecânica dos Sólidos, a tensão é variável ponto a ponto no interior do sólido. A tensão é definida como o limite da razão entre a força atuando (F) numa dada área (A), com a área tendendo a zero. Estas forças, agindo no interior do material representam a atração entre os átomos da rede cristalina ao longo de um plano, que transmitem os esforços ao longo do corpo, e garantem a coesão do sólido (Timoshenko; Goodier, 1987).

Adicionalmente, no caso de um corpo sólido, o material suporta não apenas esforços normais à sua superfície, mas também esforços tangenciais. Além da tensão normal é necessário definir mais duas componentes da tensão de cisalhamento, de acordo com a orientação dos eixos do sistema de coordenadas adotado. Para um sistema XYZ, sendo X o eixo normal ao plano que contém a área (designada  $A_x$ ) e Y e Z os planos coordenados que estabelecem o plano, são definidas as tensões: normal (Eq. (4)), cisalhante em Y (Eq. (5)) e cisalhante em Z (Eq. (6)).

$$\sigma_{xx} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \frac{F_x}{A_x} \quad (4)$$

$$\sigma_{xy} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \frac{F_y}{A_x} \quad (5)$$

$$\sigma_{xz} = \lim_{A_x \rightarrow 0} \frac{F_z}{A_x} \quad (6)$$

Ao material ser tensionado, a variação da distância interatômica leva a uma mudança de dimensões. Desse modo é definido o conceito de deformação específica, a partir de um campo de deslocamentos dos pontos do corpo ( $u, v, w$ ) respectivamente nas direções X, Y e Z, como deformações lineares:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (9)$$

e deformações angulares (cisalhantes):

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \quad (10)$$

$$\varepsilon_{xz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_{yz} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \quad (12)$$

No caso geral o estado de tensões e deformações em um ponto do sólido pode ser representado, respectivamente, pelo tensor de tensões e de deformações:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}; [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (13)$$

para um estado uniaxial de tensões, os tensores passam a ser:

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; [\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad (14)$$

A deformação linear na direção X é diretamente dependente da tensão aplicada em X e definida pela Lei de *Hooke* simples. As duas deformações transversais, embora não existam tensões nas direções Y e Z, surgem pelo efeito de *Poisson*.

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{E}; \varepsilon_{yy} = -\nu \varepsilon_{xx}; \varepsilon_{zz} = -\nu \varepsilon_{xx} \quad (15)$$

Para um estado qualquer de tensões, a relação entre as tensões normais e as deformações lineares é dada pela Lei de *Hooke* generalizada, que para um material isotrópico é:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (16)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (17)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (18)$$

No caso das tensões cisalhantes não existe acoplamento entre as deformações angulares, lembrando que  $\gamma_{ij} = 2\varepsilon_{ij}$ .

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} \quad (19)$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G} \quad (20)$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} \quad (21)$$

### 2.3.1 Tensões mecânicas

Um trocador de calor compacto de canais retos pode ser aproximado estruturalmente como um conjunto de tubos paralelos, como mostrado por Zilio et al. (2022). Deste modo, a teoria de vasos de pressão pode ser empregada para estudar as tensões resultantes devido ao escoamento do fluido no interior dos canais. As tensões principais em um cilindro de parede espessa pressurizado internamente com pressão  $P$  são divididas em componente radial, circunferencial e longitudinal e são apresentadas nas Eqs. (22),(23) e (24), respectivamente.

$$\sigma_r = -P \left[ \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 - 1}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (22)$$

$$\sigma_{\theta} = P \left[ \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 + 1}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (23)$$

$$\sigma_l = P \left[ \frac{1}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \right] \quad (24)$$

onde  $r_o$  representa o raio externo e  $r_i$ , o raio interno.

A combinação da componente radial com a componente circunferencial resulta em uma tensão uniforme ao longo da espessura do cilindro. Assim, a expansão ou contração no cilindro é sempre uniforme, mantendo as seções transversais planas e caracterizando um estado plano de deformações. A componente de tensão longitudinal só tem magnitude diferente de zero em cilindros com extremidades fechadas, não ocorrendo em cilindros pressurizados por escoamento interno (Timoshenko; Goodier, 1987).

Yang et al. (2021) avaliou cilindros sob pressão interna e momento fletor e concluiu que o limite de carga sofre maior influência da pressão interna do que do momento de flexão. Zhang et al. (2020) buscou encontrar um limite de carregamento plástico para uma casca cilíndrica ortotrópica sob pressão interna. Xu et al. (2022) estudaram numericamente e experimentalmente a tensão mecânica em *PCHEs* com canais semicirculares e retangulares. A tensão máxima no núcleo com canais semicirculares, retangulares e retangulares otimizados foi de 151.6 MPa, 253 MPa e 184.3 MPa respectivamente, considerando os pontos de singularidade nos cantos dos canais.

### 2.3.2 Tensões térmicas

Tensões térmicas são causadas pela diferença da expansão térmica em um material quando exposto a mudanças de temperatura. Esta tensão é o resultado da necessidade do material de se expandir ou contrair de forma uniforme, mas ser impedido de fazê-lo devidos às restrições impostas pelas propriedades mecânicas do material e sua geometria. A magnitude de tensão térmica depende do coeficiente de expansão térmica linear ( $\alpha$ ) do material, do tamanho e forma da estrutura, e da magnitude da diferença de temperatura aplicada (Johns; Neal, 1965).

De acordo com Johns e Neal (1965), as tensões térmicas ocorrem quando:

- Um corpo livre com coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) homogêneo está sujeito a uma distribuição de temperatura não uniforme;
- Um corpo livre com coeficiente de expansão térmica ( $\alpha$ ) heterogêneo está sujeito a uma distribuição de temperatura qualquer;
- Um corpo restringido sujeito a uma distribuição de temperatura não uniforme;

Tensões térmicas são esforços que devem ser considerados na análise estrutural de trocadores de calor, visto que estes apresentam uma distribuição de temperatura não uniforme. As tensões térmicas podem levar a fissuras, deformações e outros danos mecânicos no trocador, afetando a vida útil e segurança (Hetnarski; Eslami, 2009). Em trocadores de calor de calor compactos, a alta pressão de trabalho (até 400 bar - Hesselgreaves (2017)) pode gerar tensões mecânicas elevadas, no entanto, a diferença de temperatura entre os ramais também pode gerar tensões térmicas da mesma ordem de magnitude ou até maiores, como mostrado por Teixeira Júnior et al. (2023).

Noda et al. (2018) avaliou a tensão térmica, transiente e permanente, em cilindros circulares unidimensionais. Lembrando que, conforme já apresentado na seção 2.1, os canais do trocador de calor podem ser considerados como cilindros longos e vazados. As componentes de tensão térmica em cilindros são as mesmas do caso com pressão interna, dividindo-se em componente longitudinal, radial e circunferencial. A grande diferença está na força geratriz de tensão, que neste caso é a temperatura (Hetnarski; Eslami, 2009).

O primeiro passo para calcular a tensão térmica em cilindros vazados é definir o campo de temperatura ao longo da espessura do cilindro. Noda et al. (2018) apresentou um modelo transiente para a distribuição de temperatura em cilindros para a condição de temperatura inicial constante, que depende da convecção interna e externa e do tempo. Outra maneira de calcular o perfil de temperaturas no cilindro é empregando o método dos volumes finitos, como foi feito por Teixeira Júnior et al. (2023).

O equacionamento a seguir apresenta a componente radial (Eq. (26)), circunferencial (Eq. (27)) e longitudinal (Eq. (28)) das tensões térmicas no cilindro em função do campo de temperatura (Eq. (25)). O desenvolvimento das equações de tensão e também do campo de temperatura foi apresentado no **Apêndice A**. Este desenvolvimento considera a solução exata das integrais e demonstra a expressão utilizada para calcular a magnitude de tensão térmica transiente e permanente.

$$\begin{aligned}
& T(r, t) \\
& = T_a + (T_b - T_a) \left[ \frac{\ln(r/a) + \lambda/h_a a}{\ln(b/a) + \lambda/h_b b + \lambda/h_a a} \right] \\
& - \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(T_a h_a - T_b G_N h_b) f(s_n, r) e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \right] \\
& - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{s_n^2 f(s_n, r) e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \right] T_i \int_a^b f(s_n, r) r dr
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \left[ \frac{-1}{r^2} \int_a^r T(r, t) r dr + \frac{r^2 - a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b T(r, t) r dr \right] \tag{26}$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \left[ \frac{1}{r^2} \int_a^r T(r, t) r dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \int_a^b T(r, t) r dr - T(r, t) \right] \tag{27}$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1 - \nu} \left[ \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b T(r, t) r dr - T(r, t) \right] \tag{28}$$

onde  $T_a$  é a temperatura do fluido na superfície interna,  $T_b$  é a temperatura do fluido na superfície externa,  $h_a$  é o coeficiente convectivo do fluido na superfície interna,  $h_b$  é o coeficiente convectivo na superfície externa,  $r$  é a posição de interesse na seção transversal,  $b$  é o diâmetro externo,  $a$  o diâmetro interno,  $\lambda$  é a condutividade térmica do material do cilindro,  $t$  é o tempo que se deseja saber a tensão térmica transiente,  $\kappa$  é a difusividade térmica e  $s_n$  são as raízes positivas.

Marugán-Cruz et al. (2016) estudou a tensão térmica em tubos circulares sujeitos a um fluxo de calor não uniforme na direção circunferencial e homogêneo na direção axial. De acordo com os autores, o modelo analítico apresentou bons resultados para a temperatura da parede interna do cilindro, mas não prediz a distribuição de temperatura em todo o tubo para o cálculo das tensões térmicas.

Wu et al. (2022) estudaram tensões térmicas em trocadores do tipo PCHE. Os autores empregaram os parâmetros de operação de um trocador de calor real (temperatura e pressão) como dados de entrada para o modelo numérico. A tensão máxima obtida no núcleo foi de 117 MPa, abaixo do limite de escoamento do material, e ocorria na região de entrada dos canais quentes. Os autores não consideraram as tensões transientes e as tensões térmicas foram obtidas

apenas devido ao campo de temperatura permanente. Um dos objetivos do presente trabalho é realizar o primeiro estudo experimental de tensões térmicas no regime transiente em trocadores de calor compactos.

Pernica et al. (2021) estudou tensões térmicas no regime transiente em trocadores do tipo casco-tubo, comparando falhas observadas experimentalmente com um modelo numérico. Os autores destacam a importância da análise do regime transiente, uma vez que a simulação apenas do regime permanente pode subestimar os níveis de tensão. No momento do choque térmico a tensão apresenta um pico e começa a decair conforme o campo de temperatura uniformiza até atingir um valor constante no regime permanente. Os autores não consideram a influência da pressão no estudo, apenas o campo de temperatura, e sugeriram que em um estudo posterior fosse realizado para avaliar ambos os efeitos, e assim não subestimar o nível de tensão.

### 2.3.3 Tensões termomecânicas

A tensão termomecânica ( $\sigma^{tm}$ ) é a sobreposição da parcela mecânica e térmica, que para um cilindro é a soma dos exatos equacionamentos apresentados anteriormente. Portanto, cada parcela será calculada considerando a força geratriz mecânica (pressão interna) e térmica (convecções à diferentes temperaturas). A Eq. (29) é utilizado para calcular a tensão termomecânica circunferencial, a Eq. (30) a parcela radial e a Eq. (31) a parcela longitudinal.

$$\sigma_{\theta}^{tm} = \sigma_{\theta}^{rp} + \sigma_{\theta}^{tr} + \sigma_{\theta} \quad (29)$$

$$\sigma_r^{tm} = \sigma_r^{rp} + \sigma_r^{tr} + \sigma_r \quad (30)$$

$$\sigma_l^{tm} = \sigma_l^{rp} + \sigma_l^{tr} + \sigma_l \quad (31)$$

Após determinar as tensões presentes nas paredes do cilindro, é necessário verificar se estas são capazes de causar uma falha estrutural no equipamento. De acordo com o critério de *von Mises*, que avalia a máxima energia de distorção, a relação entre as componentes de tensão para que não haja falha por escoamento é apresentada na Eq. (32).

$$\sqrt{(\sigma_{\theta}^{tm} - \sigma_l^{tm})^2 + (\sigma_l^{tm} - \sigma_r^{tm})^2 + (\sigma_{\theta}^{tm} - \sigma_r^{tm})^2} \leq \sqrt{2}\sigma_{esc} \quad (32)$$

Analisando o equacionamento de tensão térmica, ver modelo de Noda et al. (2018) – **Apêndice A**, é observado que para um delta de temperatura as duas superfícies estarão sob tensões opostas, de tração e compressão. Se a superfície interna estiver a uma temperatura mais alta do que a externa, os esforços serão de tração externamente e compressivos internamente, o oposto também é válido. Para a tensão mecânica com pressurização interna, os esforços na superfície externa e interna sempre serão de tração.

Othman et al. (2019) estudaram a alta deformação plástica e trincas em juntas soldadas de tubos de um super aquecedor. Os resultados indicaram que a temperatura foi a principal razão da falha, e não a pressurização. No modelo numérico os autores observaram regiões em que as tensões excedem a tensão de escoamento. Mizokami et al. (2013) avaliou um *PFHE* quando submetido a golpes de pressão de 4,7 MPa. O modelo numérico foi avaliado em temperatura ambiente e a 600 °C. Segundo os autores, a tensão de escoamento ficou em 337 MPa e na região dos canais, a tensão ficou em 587 MPa, ultrapassando o limite de escoamento. Ambos os estudos mostram a importância de analisar as tensões termomecânicas.

Li et al. (2021) realizaram uma investigação da tensão térmica e mecânica em tubos refrigerantes trabalhando com CO<sub>2</sub> supercrítico. Os tubos estavam sujeitos a um fluxo de calor não uniforme. Através de análises analíticas e numéricas os autores avaliaram a tensão termomecânica usando o critério de *von Mises*. As tensões foram avaliadas ao longo da espessura do cilindro. Neste estudo chama-se a atenção para a variação da tensão térmica, que inverte seu comportamento próximo do centro da espessura no cilindro. A pressurização interna não apresentou grande influência sobre a tensão equivalente total. Li et al. (2021) mostrou que as tensões térmicas estão abaixo do limite de escoamento no caso de um fluxo uniforme de calor, e acima quando há fluxo não uniforme. Os autores apresentaram apenas tensões no regime permanente ao longo do raio, sob as condições de temperatura prescrita.

## 2.4 FADIGA

No tópico anterior foram apresentadas as tensões térmicas, mecânicas e termomecânicas, que caso tenham valores superiores a tensão de escoamento do material, podem resultar na falha estática do equipamento. Uma outra forma de falha é a fadiga.

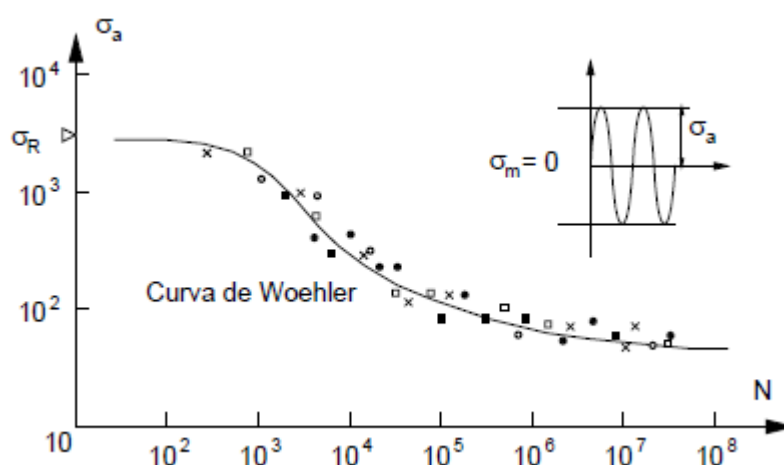
A fadiga resulta em uma fratura do material devido a uma excitação repetida. A principal causa de falha em componentes mecânicos é a fadiga do material, representando entre 50% e 90% do total de falhas. Falhas causadas por fadiga resultam de uma gradual redução na capacidade de carga do material, devido ao lento crescimento de fissuras internas originadas

pela variação de tensão. Cargas variáveis, sejam cíclicas ou não, geram a deterioração progressiva do material fazendo com que as trincas se propagem até atingirem um tamanho crítico, resultando na ruptura final (Stephens; Fuchs, 2001).

A falha por fadiga ocorre dentro de um intervalo bastante amplo de ciclos de carregamento, desde 10 ciclos até  $10^8$  ciclos. O número de ciclos que um componente resiste depende do nível de carregamento em que está exposto. Maiores solicitações, níveis de tensão, resultam em uma menor vida em fadiga (Pook, 2007). A fadiga pode ser dividida em alto ciclo e baixo ciclo. Essa divisão ocorre por razão das solicitações aplicadas. Solicitações maiores levam a falha por fadiga de baixo ciclo, ou seja, os materiais rompem após um baixo número de ciclos, normalmente porque nestes casos há demasiada deformação plástica. Solicitações menores levam a fadiga de alto ciclo, onde o material resiste a um número elevado de ciclos antes de romper (Edison da Rosa, 2002).

A análise dos limites de fadiga de materiais pode ser feita através da curva  $S-N$  (tensão vs. número de ciclos) do material, ou curva de *Woehler*, apresentada na Fig. 8. Na curva o eixo horizontal representa o número de ciclos ( $N$ ) que o material resiste, enquanto no eixo vertical são apresentadas as magnitudes de tensão alternada que o material está sujeito ( $\sigma_a$ ). A tensão alternada é sempre relacionada com a maior deformação que há no ciclo de carregamento. Para o caso representado na Fig. 8, com tensão média nula, a tensão alternada é metade da variação entre carga e descarga. Para ciclos de pressurização e despressurização, cenário típico de trocadores de calor, a tensão alternada é definida como metade da tensão equivalente no momento da pressurização máxima.

Fig. 8 – Curva de *Woehler*: tensão alternada vs. número de ciclos.



Fonte: (Edison da Rosa, 2002).

De acordo com Da Rosa (2002) existem dois tipos de comportamento dos materiais em fadiga. O comportamento tipo 1 é quando a tensão decresce com aumento de  $N$  sem limite. No comportamento tipo 2 a tensão alternada diminui até um determinado valor e permanece constante dentro de um patamar, para vidas de  $10^6$  a  $10^7$  ciclos, sendo definido neste cenário a tensão limite de fadiga ( $\sigma_f$ ).

#### 2.4.1 Avaliação de fadiga de acordo com a ASME

A análise de fadiga pode ser realizada de acordo com o código *ASME*. A norma estabelece relações devido a cargas térmicas ou mecânicas, cada uma gerando um esforço estrutural. Nas análises elásticas supõe-se que as tensões são inferiores a tensão de escoamento do material.

Para uma análise de fadiga é preciso inicialmente conhecer o ciclo de tensão que a amostra de interesse está sujeita. A variação da tensão equivalente ( $\Delta\sigma_{eq}$ ) nas regiões críticas deve ser conhecida, informação proveniente de uma análise numérica, analítica ou experimental. A partir da variação de tensão equivalente ( $\Delta\sigma_{eq}$ ) e de fatores de correção ( $K$ ), é possível estimar a tensão alternada ( $\sigma_{alt}$ ).

A análise inicia com o cálculo do limite superior da tensão equivalente ( $S_{PS}$ ), dado pela expressão:

$$S_{PS} = \max(3S, 2\sigma_{esc}) \quad (33)$$

onde  $S$  é a tensão admissível do material, definida na própria norma, e  $\sigma_{esc}$  a tensão de escoamento do material.

O primeiro fator de concentração de tensão é o  $K_f$  referente as regiões de solda concentradoras de tensão, sendo igual a 1 se todas foram mapeadas. O segundo é  $K_{e,k}$ , que representa o fator de redução de vida em fadiga e pode ser calculado através das expressões apresentadas a seguir:

$$K_{e,k} = 1 \quad \text{quando} \quad \Delta\sigma_{eq} \leq S_{PS} \quad (34)$$

$$K_{e,k} = 1 + \frac{(1-n)}{n(m-1)} \left[ \frac{\Delta S_{n,k}}{S_{PS}} - 1 \right] \quad \text{quando} \quad S_{PS} < \Delta\sigma_{eq} < mS_{PS} \quad (35)$$

$$K_{e,k} = \frac{1}{n} \text{ quando } \Delta\sigma_{eq} \geq mS_{PS} \quad (36)$$

as magnitudes dos coeficientes  $m$  e  $n$  variam conforme o material e para o aço inoxidável austenítico 316L são iguais a 1,7 e 0,3, respectivamente.

Logo, a tensão alternada cíclica, de acordo com as tensões impostas no modelo e os fatores de ajustes, é:

$$\sigma_{alt} = \frac{K_f K_{e,k} \Delta\sigma_{eq}}{2} \quad (37)$$

Ainda é necessário realizar uma conversão entre o material que está sendo analisada e o material que a norma utilizou para realizar a regressão. Essa conversão (fator  $Y$ ) é feita utilizando o módulo de elasticidade ( $E$ ) e um fator de conversão ( $C_{us}$ ).

$$Y = \frac{\sigma_{alt} E_{fc}}{C_{us} E} \quad (38)$$

onde  $\sigma_{alt}$  é a tensão alternada,  $E_{fc}$  é o módulo de elasticidade do material testado para obtenção da curva  $S-N$  (195 GPa),  $E$  é o módulo de elasticidade do material de interesse e  $C_{us}$  é um fator de conversão (de ksi para MPa) igual a 6,895.

Na Tabela 2 são mostrados os coeficientes que dependem da tensão alternada. A *ASME* determina diferentes coeficientes para uma grande variação de tensão alternada, no entanto, na Tabela 2 são apresentados dois de interesse.

Tabela 2 – Coeficientes em função da tensão alternada (temperatura abaixo de 371 °C)

| Coeficientes ( $C_i$ ) | $48 < S_a < 214$ [MPa] | $214 < S_a < 3999$ [MPa] |
|------------------------|------------------------|--------------------------|
| 1                      | 2.254510E+00           | 7.999502E+00             |
| 2                      | -4.642266E-01          | 5.832491E-02             |
| 3                      | -8.312745E-01          | 1.500851E-01             |
| 4                      | 8.634660E-02           | 1.273659E-04             |
| 5                      | 2.020834E-01           | -5.263661E-05            |
| 6                      | -6.940535E-03          | 0                        |
| 7                      | -2.079726E-02          | 0                        |
| 8                      | 2.010235E-04           | 0                        |
| 9                      | 7.137717E-04           | 0                        |
| 10                     | 0                      | 0                        |
| 11                     | 0                      | 0                        |

Fonte: (ASME - Seção VIII. Div. 2, 2020).

Por fim, a curva pode ser plotada de acordo com o equacionamento a seguir, em que  $N$  representa o número de ciclos.

$$N = 10^X \quad (39)$$

$$X = \frac{C_1 + C_3Y + C_5Y^2 + C_7Y^3 + C_9Y^4 + C_{11}Y^5}{1 + C_2Y + C_4Y^2 + C_6Y^3 + C_8Y^4 + C_{10}Y^5} \quad (40)$$

#### 2.4.2 Fadiga em trocadores de calor

Pra et al. (2018) estudaram um protótipo de *PCHE* submetido a choques térmicos de 405 °C. Considerando os níveis de tensão das regiões críticas obtidos pela simulação (1000 MPa), a amostra resistiu até 11 ciclos térmicos. Zhao et al. (2019) estimaram a vida em fadiga de um aquecedor de alta pressão. Para o cálculo das tensões alternadas e definição dos locais críticos, utilizou-se do método de elementos finitos. Durante a condição de operação mais severa, a tensão térmica ocorreu na margem dos tubos de entrada e a tensão mecânica ocorreu na entrada dos canais. Como o teste foi realizado no regime transiente, é importante destacar que os dois picos não ocorreram simultaneamente. Considerando ambos os esforços, o trocador deveria ser capaz de resistir a 5913 ciclos.

Pelliccione et al. (2019) avaliou a fadiga mecânica como modo de falha em trocadores de calor do tipo placas gaxetadas de titânio. Com base em microscopia juntamente do MEF, foi observado que as áreas com maior quantidade de trincas foram as regiões com maiores deformações. Patil e Anand (2017) estudaram a fadiga térmica em trocadores de calor casco tubo utilizando o código *ASME*. A junção tubo-placa (*tubesheet*) se mostrou crítica e resiste 341 ciclos.

#### 2.4.3 Fadiga em aço inoxidável 316L fabricado por MA

Chen et al. (2022) investigou o comportamento do aço inoxidável *SLM-316L* sobre fadiga de baixo ciclo à alta temperatura. Os autores observaram tensão de escoamento de 568 MPa para o *SLM-316L* e 289 MPa para o aço AISI 316L. Nos testes de fadiga o material apresentou amolecimento e demasiada deformação plástica nos testes. Durante os testes cíclicos

de deformação, o aço *SLM-316L* apresentou maior amplitude de tensão, o que segundo os autores, significa uma maior resistência cíclica quando comparado ao aço tradicional.

Zeng et al. (2022) investigaram as propriedades de fadiga do *SLM-316L* e estimou as curvas *S-N* do material. Os testes consideraram tensão alternada entre 90 MPa e 250 Mpa. O aço fabricado via *SLM* apresentou uma resistência a fadiga de 245 MPa. Zhou et al. (2018) estudaram os efeitos de tratamentos posteriores no comportamento de fadiga do aço 316L fabricado por métodos de fusão em leito de pó. Os autores chegaram à conclusão de que a vida em fadiga é altamente influenciada pela rugosidade superficial das amostras, enquanto tratamentos térmicos não apresentam efeito significativo na vida em fadiga.

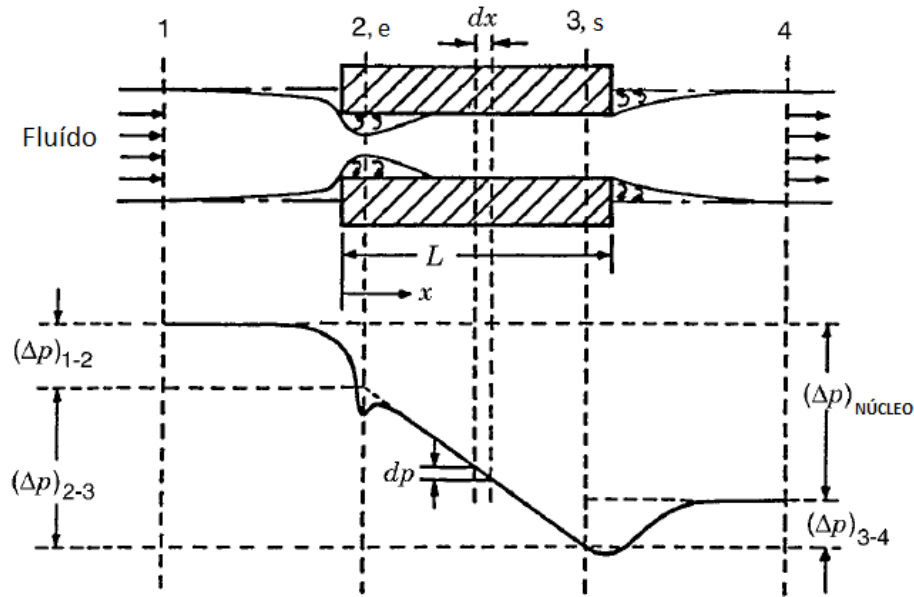
## 2.5 ANÁLISE TERMO HIDRÁULICA DE CANAIS CIRCULARES

### 2.5.1 Perda de carga

De acordo com Shah e Sekulic (2003) as condições para a utilização de correlações empíricas da perda de carga em um núcleo de trocador são: Fluido estável, incompressível e com propriedades permanentes; a densidade do fluido ser avaliada apenas na região de entrada e saída; a gravidade ser a única geradora de forças de corpo e o fator de atrito ser constante; canal reto.

A perda de carga pode ser dividida em diferentes parcelas (Fig. 9). A perda na região de entrada ( $\Delta P_{1-2}$ ) leva em consideração a contração devido a mudança da área do escoamento e a expansão posterior já dentro do canal. A parcela  $\Delta P_{2-3}$  refere-se a perda de carga ocorrida no interior dos canais, considerando a variação de pressão devido ao atrito do fluido com a parede sendo essa a parcela que tem maior contribuição no cálculo da perda de carga total, e a variação do momento. A parcela  $\Delta P_{3-4}$  considera o aumento da pressão causado pela desaceleração do escoamento que ocorre próximo ao fim do canal, além dos efeitos decorrentes da expansão na saída do canal.

Fig. 9 – Diferenciação das componentes da perda de carga ao longo de uma tubulação



Fonte: Adaptado de Shah e Sekulic (2003).

Se não for considerada a perda de carga referente aos bocais de entrada e saída, pode-se estimar a perda de carga em um núcleo de um trocador de calor utilizando a Eq. (41). O primeiro termo remete o efeito de entrada do fluido, o segundo termo remete a variação do momento, enquanto o terceiro termo considera o atrito na tubulação. O quarto termo é referente a saída de escoamento do núcleo.

$$\Delta P = \frac{G^2}{2\rho_e} \left[ (1 - \varphi^2 + K_c) + 2 \left( \frac{\rho_e}{\rho_s} - 1 \right) + f \frac{L}{D} \rho_e \left( \frac{1}{\rho} \right)_m - (1 - \varphi^2 - K_e) \frac{\rho_e}{\rho_s} \right] \quad (41)$$

$L$  representa o comprimento do canal,  $\rho_e$  a massa específica do fluido na temperatura de entrada,  $\rho_s$  a massa específica na temperatura de saída,  $f$  é o fator de atrito de Darcy no interior do canal,  $G$  o fluxo mássico (razão entre a vazão mássica e a área livre escoamento),  $\varphi$  é a razão entre a área de escoamento livre e a área frontal,  $K_c$  é o coeficiente de perda por contração e  $K_e$  é o coeficiente de perda por expansão. Os coeficientes  $K_e$  e  $K_c$  podem ser estimados com base no trabalho de Kays e London (1998).

A queda de pressão devido ao atrito é fortemente influenciada pelo regime de escoamento. O escoamento é considerado laminar quando possui um número de Reynolds

inferior a 2300, de transição quando  $Re$  encontra-se entre 2300 e 4000 e turbulento em  $Re$  superiores a 4000, para canais retos e circulares (Incropera, 2007).

Além disso, o desenvolvimento da camada limite também influencia no cálculo do fator de atrito. A camada limite hidrodinâmica estabelece a região do escoamento na qual as forças viscosas têm maior influência. Segundo Çengel e Ghajar (2011) um escoamento pode ser considerado completamente desenvolvido se o comprimento hidrodinâmico adimensional ( $L_{hid}$  – Eq. (42)) for maior que o comprimento de entrada hidrodinâmico ( $Z_{hid}$  – Eq. (43)). Para escoamentos turbulentos o comprimento de entrada é extremamente curto e o escoamento se desenvolve rapidamente, por isso são considerados completamente desenvolvidos. A Tabela 3 apresenta o fator de atrito, para canais retos e circulares, para diferentes regimes de escoamento.

$$L_{hid} = \frac{L}{DRe} \quad (42)$$

$$Z_{hid} = 0,056ReD \quad (43)$$

Tabela 3 – Correlações para o fator de atrito  $f$  para canais retos

| Escoamento                                                                   | Formulação                                                                                                                                               | Equação | Fonte                  |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------|
| Laminar, completamente desenvolvido<br>$Re_d < 2300$                         | $f = \frac{64}{Re_d}$                                                                                                                                    | (44)    | Çengel e Ghajar (2011) |
| Laminar, em desenvolvimento<br>$Re_d < 2300$                                 | $f = \frac{3,44}{\sqrt{L}} + \frac{2G_{dh} - \left( \frac{3,44}{\sqrt{L}} \right) + \left( \frac{K_{oo}}{4L} \right)}{1 + \left( \frac{C}{L^2} \right)}$ | (45)    | Shah e London (1978)   |
| Transição e turbulento, completamente desenvolvido<br>$2300 < Re_d < 10^8$ . | $\frac{1}{\sqrt{f}} = \left[ -2 \log \left( \frac{(\epsilon/D)}{3,7} + \frac{2,51}{Re_d \sqrt{f}} \right) \right]$                                       | (46)    | Colebrook (1939)       |

Observação:  $G_{dh}$ ,  $K_{oo}$ ,  $C$  são coeficientes que dependem da geometria do canal

Fonte: Autor (2025).

### 2.5.2 Térmico

A taxa de transferência de calor ( $q$ ) de um trocador pode ser definida pela primeira lei da termodinâmica, de acordo com a Eq. (47).

$$q = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (47)$$

onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica,  $c_p$  é o calor específico do fluido,  $T_e$  e  $T_s$  são as temperaturas de entrada e saída, respectivamente.

O Número de Unidades de Transferência (NTU), Eq. (48), é um parâmetro adimensional amplamente utilizado para a análise de trocadores de calor, que representa a magnitude relativa da taxa de transferência de calor comparada à taxa de variação de entalpia do fluido com menor capacidade térmica.

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (48)$$

onde  $U$  é o coeficiente global de transferência de calor,  $A$  é a área total de transferência de calor de um dos ramais e  $C_{min}$  é a capacidade térmica mínima entre o lado quente e frio.

O coeficiente global de transferência de calor pode ser expresso em função da soma das resistências térmicas de convecção, condução e incrustação (Çengel; Ghajar, 2011), desprezando a incrustação obtemos a Eq. (49):

$$\frac{1}{UA} = R_{total} = R_{conv,h} + R_{cond} + R_{conv,c} \quad (49)$$

onde  $R_{conv,h}$  e  $R_{conv,c}$  são as resistências a transferência de calor por convecção nos ramais quente e frio, respectivamente, e  $R_{cond}$  é a resistência a condução na parede que separa os escoamentos. Essas resistências podem ser calculadas de acordo com as Eqs. (50) e (51).

$$R_{conv} = \frac{1}{\eta_0 h A_{total}} \quad (50)$$

$$R_{cond} = \frac{t}{k A_w} \quad (51)$$

onde  $\eta_0$  é a eficiência global de superfície,  $h$  é o coeficiente convectivo de transferência de calor,  $t$  é a espessura da parede entre os ramais,  $A_w$  e  $k$  são a área de condução de calor e a condutividade térmica, respectivamente, e  $A_{total}$  é a área de troca de calor de cada um dos ramais.

A eficiência global de superfície ( $\eta_0$ ) em trocadores de calor compactos são comumente consideradas igual a 1. Esta aproximação foi adotada nos estudos de Hein e Mortean (2021) e Sarmiento et al. (2020).

O coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h$ ) pode ser encontrado com base no número de Nusselt ( $Nu$ ) em função do diâmetro (comprimento característico):

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (52)$$

onde  $D$  representa o diâmetro hidráulico do ramal. As correlações para número de Nusselt serão apresentadas a seguir, e para escoamentos laminares dependem do comprimento térmico adimensional ( $L_{ter}$  – Eq. (53)) e comprimento de entrada térmico ( $Z_{ter}$  – Eq. (54)).

$$L_{ter} = \frac{L}{D Re Pr} \quad (53)$$

$$Z_{ter} = 0,05 Re Pr D \quad (54)$$

Os números de Nusselt para canais retos são apresentados na Tabela 4. Estas correlações foram empregadas no trabalho de Hein e Morteau (2021), apresentando um erro médio de 3,5%.

Tabela 4 – Modelos analíticos e empíricos para o número de Nusselt médio ( $Nu_m$ ) de canais retos

| Escoamento                                                                               | Formulação                                                                                                                                                                              | Equação | Fonte                     |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|---------------------------|
| Laminar, completamente desenvolvido, canais de seção circular e fluxo de calor constante | $Nu_m = 4,364$                                                                                                                                                                          | (55)    | Hesselgreaves (2017)      |
| Laminar, hidrodinamicamente desenvolvido e termicamente em desenvolvimento               | $Nu_m = 1,953 \left(1/L_{ter}\right)^{1/3}$ para $L_{ter} \leq 0,03$<br>$Nu_m = 4,364 + 0,0722 \left(1/L_{ter}\right)$ para $L_{ter} > 0,03$                                            | (56)    | Kays e London (1998)      |
| Laminar, termicamente e hidrodinamicamente em desenvolvimento                            | $Nu_m = \left\{ 4,354^2 + 0,6^2 + \left[ 1,953 \sqrt{Pr * Re_d \left(D_h/L\right)} - 0,6 \right]^3 + \left[ 0,924 \sqrt{Re_d \left(D_h/L\right)} \sqrt[3]{Pr} \right]^3 \right\}^{1/3}$ | (57)    | Gnielinski (2010)         |
| Regime de transição<br>*canais com geometria genérica                                    | $Nu_m = (Nu_{m,lam}^6 + Nu_{m,tur}^6)^{1/6}$                                                                                                                                            | (58)    | Morteau e Mantelli (2019) |
| Turbulento                                                                               | $Nu_m = \frac{\left(f/8\right)(Re_d - 1000)Pr}{1 + 12,7 \left(f/8\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \left[ 1 + \left(\frac{D_h}{L}\right)^{2/3} \right]$                                     | (59)    | Gnielinski (1976)         |

Fonte: Autor (2025).

Um equacionamento importante (Eq. (60)) para o presente trabalho considera a temperatura de parede do canal constante ( $T_p$ ) para definir com base em modelos teóricos a temperatura de saída do fluido ( $T_s$ ), depende de parâmetros já previamente apresentados e principalmente de correlações para Nu.

$$\frac{T_p - T_s}{T_p - T_e} = \exp\left(\frac{\pi L k Nu}{\dot{m} c_p}\right) \quad (60)$$

#### 2.5.2.1 Números de Nusselt – Canais zigue zague e complexo

Os canais de trocadores de calor compactos normalmente possuem caminhos retos, como mostrado nos trabalhos de Han et al. (2023), Strobel e Morteau (2022) e Mathew e Hegab (2010). Entretanto, alguns trabalhos abordaram outras configurações de canais, tal como zigue

zague (ver Meshram et al. (2016), Saeed et al. (2020), Baik et al. (2017) e Katz et al. (2021)) e complexo (ver Lasbet et al. (2007)), que apresentaram melhor desempenho térmico.

Meshram et al. (2016) propuseram correlações para o número de Nusselt tanto para canais retos quanto em zigue zague de seção transversal semicircular, desenvolvidas inicialmente para o dióxido de carbono supercrítico ( $S\text{-CO}_2$ ). As correlações são válidas para intervalos específicos de temperatura. Yoon et al. (2017) desenvolveram correlações para escoamento laminar ( $Re < 2300$ ) empregando gás hélio como fluido de trabalho e canais em zigue zague, também com seção semicircular.

Nos trabalhos de Saeed et al. (2020), Baik et al. (2017) e Katz et al. (2021) foram desenvolvidas correlações tanto para fluidos convencionais quanto supercríticos, em canais com seção transversal semicircular e em caminho zigue zague. Saeed et al. (2020) e Katz et al. (2021) apresentam relações para os regimes de escoamento transição ( $2300 < Re < 4000$ ) e turbulento ( $Re > 4000$ ). Já as equações de Baik et al. (2017) envolve fluido convencional no regime laminar e fluido supercrítico no regime turbulento.

Kim et al. (2016) apresentou diferentes correlações para o número de Nusselt em função do ângulo de zigue zague adotado, sendo desenvolvidas para o  $\text{SCO}_2$  como fluido de trabalho e abrangendo os regimes de transição e turbulento.

A maioria dos estudos com canais zigue zague usam dados numéricos para validar as análises termo hidráulicas. Meshram et al. (2016) comparou canais retos e zigue zague e observou que para a mesma capacidade de troca, o modelo com zigue zague apresenta um volume menor. Ngo et al. (2007) comparou diferentes geometrias de caminhos, com aletas em “S” e em zigue zague para ciclos de  $\text{CO}_2$  e chegaram a conclusão de que as aletas “S” diminuem a queda de pressão em até 5 vezes com uma redução de 34% no número de Nusselt. Baik et al. (2017) comparou canais zigue zague com cantos arredondados e quebrados, observando que a queda de pressão pode ser reduzida entre 40% e 65% com o arredondamento dos cantos.

Algumas correlações para canais zigue-zague foram compiladas na Tabela 5 e utilizadas em posteriores comparações ao longo do trabalho.

Tabela 5 – Compilado de correlações propostas para Nusselt disponíveis na literatura

| Autores        | Canal e caminho            | Correlação                          | Intervalo $Re$ | Fluido |
|----------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------|--------|
| Berbish et al. | Semicircular – reto        | $Nu = 0,0228Re^{0,8}$               | 8200 – 57800   | água   |
| Saeed et al.   | Semicircular – zigue zague | $Nu = 0,08Re^{0,78}$                | 50 – 15000     | água   |
| Alvarez et al. | Retangular – zigue zague   | $Nu = 0,5656Re^{0,5424}Pr^{0,0114}$ | 1299 – 8313    | água   |
| Katz et al.    | Semicircular – zigue zague | $Nu = 0,8072Re^{0,4359}Pr^{1/3}$    | 400 – 3200     | hélio  |
| Kim e No       | Semicircular – zigue zague | $Nu = 4,089 + 0,00365RePr^{0,58}$   | < 2300         | hélio  |
| Chen et al.    | Semicircular – zigue zague | $Nu = 0,09221Re^{0,62507}$          | 2200 – 3558    | hélio  |

Fonte: Autor (2025).

Castelain et al. (2016) estudou 8 caminhos para canais de seção transversal retangular, sendo 7 de caminhos complexos e 1 de caminho reto, e utilizando o número de *Poiseville* ( $fRe$ ) verificou que todas as geometrias apresentavam este número adimensional maior do que o canal reto, assim como a razão entre *Poiseville* e *Nusselt* dos canais complexos é sempre menor do que o reto.

## 2.6 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS E FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Combinar um modelo numérico com um protótipo experimental pode ser muito vantajoso, pois proporciona confiabilidade nos resultados e permite avaliar regiões não possíveis experimentalmente. Como trocadores de calor possuem estruturas complexas, o modelo experimental torna-se custoso, especialmente ao usar impressão 3D em aço para fabricar os protótipos. Essa abordagem ajuda a identificar os locais com maiores níveis de tensão e deformação, permitindo o planejamento de um procedimento experimental coerente, cujos resultados podem ser usados para validar e, eventualmente, calibrar o modelo numérico.

A seguir, apresenta-se uma revisão sistemática de como outros autores utilizaram modelos numéricos aliados a experimentos para a análise e/ou projeto de trocadores de calor.

Ge et al. (2018) utilizaram o método de elementos finitos para validar o estado de tensões dentro de uma estrutura porosa. Os resultados mostraram que os maiores níveis de tensão ocorriam na região de entrada dos canais e aumentavam em 28% durante o regime transiente (início do ensaio).

Mizokami et al. (2013) verificaram a diferença de esforços na estrutura de trocadores expostos a gás hélio e a brasagem, condições comuns a trocadores de placas finas. O autor comparou os resultados obtidos usando o método dos elementos finitos com ensaios de golpes

de pressão. Constatou-se experimentalmente que o protótipo falharia na chapa que divide os fluxos, devido a menor tensão de escoamento do material da brasagem. Esse comportamento também foi previsto pelo modelo numérico, que apresentava a tensão máxima nessa região.

Zhao et al. (2019) utilizaram o método dos elementos finitos para estimar a vida em fadiga e melhorar o desempenho de um aquecedor de alta pressão. Durante a condição de operação mais severa, a tensão térmica máxima foi de 362 MPa, ocorrendo na margem do tubo de entrada. A tensão imposta pela pressurização dos dutos foi de 300 MPa, ocorrendo na face da câmara de água. Como o teste é realizado no regime transiente, esses picos não ocorrem simultaneamente.

Laurent et al. (2016) estudaram trocadores compactos de aço 316L, onde a falha é observada após altas deformações cíclicas devido a cargas termomecânicas. O autor desenvolveu um modelo de elementos finitos e comparou os resultados numéricos com os experimentais. Foi verificada a resposta do protótipo a diferentes ciclos de temperatura, considerando uma variação de 167 °C. O modelo previu uma resistência de 13 ciclos, enquanto no experimento os protótipos resistiram 23 ciclos. Diante dos resultados, o autor concluiu que se trata de uma boa previsão, uma vez que o modelo numérico apresentou resultados conservadores.

A dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) é a análise do fluido em movimento, designado como escoamento. Essa análise pode incluir processos de transferência de calor e outros fenômenos correlatos, utilizando métodos computacionais via simulação numérica (Zong; Wu, 2024). Análises experimentais requerem demasiado tempo e elevado custo operacional ao serem realizadas, fazendo com que a utilização da *CFD* seja adequada, devido a sua facilidade na imposição das condições de contorno somada com a economia em equipamentos e sensores específicos.

### **2.6.1 Modelos de turbulência**

Os escoamentos em trocadores no geral são turbulentos com elevados números de Reynolds. Esses escoamentos são altamente instáveis, tridimensionais e cujo processo é dependente do tempo. Nesse regime de escoamento a viscosidade passa a ter uma característica aleatória e é por essa razão que são necessárias modelos que possam prever esse comportamento, se fazendo necessário o uso de uma modelagem de turbulência (Zong; Wu, 2024).

De acordo com Wilcox (2006), destacam-se três modelagens de turbulência: *DNS* (*Direct Numerical Simulation*); *LES* (*Large Eddy Simulation*) e *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). Cada método apresenta uma característica em termos de custo computacional e os métodos estão descritos em ordem de maior custo computacional para menor. Na abordagem DNS, todas as escalas de turbulência são computadas numericamente, a partir das equações de Navier-Stokes, sem levar em consideração o fato de que as pequenas e grandes escalas de turbulência possuem características físicas diferentes. Na abordagem LES, a estratégia é de que os grandes turbilhões, afetados pelas condições de contorno e que carregam a maioria das tensões de Reynolds devem ser computados ao mesmo tempo em que as pequenas escalas de turbulência. Nos modelos que empregam a metodologia RANS, a média de Reynolds é um caso particular de filtro e é utilizada para simplificar a modelagem da sub malha. Este trabalho será focado na metodologia RANS, utilizando o modelo SST  $k - \omega$ .

As equações regentes do modelo são apresentadas nas Eq. (61) para taxa de dissipação turbulenta específica ( $\omega$ ) e na Eq. (62) para energia turbulenta ( $k$ ). Este modelo utiliza uma função auxiliar ( $F_1$ ) para fazer uma mescla entre o modelo  $k - \varepsilon$  e  $k - \omega$ . Em regiões próximas a parede ( $F_1 = 1$ ) a equação apresenta a forma do modelo tradicional  $k - \omega$  e longe da parede ( $F_1 = 0$ ), a equação retorna ao modelo  $k - \varepsilon$ .

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_j \omega)}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\rho \alpha}{\mu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 \\ &+ 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_\omega^2}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (61)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \widetilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega \quad (62)$$

A viscosidade turbulenta é dada pela Eq. (63).

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \frac{1}{\max \left( \frac{1}{\alpha^*}, \frac{SF_2}{a_1 \omega} \right)} \quad (63)$$

onde  $\rho$  é a densidade,  $U_i$  a velocidade,  $\mu$  a viscosidade,  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta,  $\sigma_k$  a constante de difusão de  $k$ ,  $\sigma_\omega$  a constante de difusão de  $\omega$ ,  $\widetilde{P_k}$  a taxa de produção de energia turbulenta,  $P_k$  a taxa de produção de dissipação turbulenta,  $\beta^*$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $a_1$  e  $\alpha^*$  são constantes do modelo,  $F_1$  é uma segunda função auxiliar e  $S$  a magnitude da deformação cisalhante.

A solução do escoamento baseado na pressão tem a restrição de conservação de massa (continuidade) do campo de velocidade alcançada através da resolução de uma equação de pressão. A equação da pressão é derivada das equações de continuidade e momento de tal maneira que o campo de velocidade, corrigido pela pressão, satisfaz a continuidade. O solucionador baseado em pressão permite solucionar o problema de fluxo de maneira segregada ou acoplada. O esquema combinado obtém uma implementação monofásica robusta e eficiente para fluxos de estado estacionário, com desempenho superior comparado aos esquemas de solução segregada.

O *YPlus* ( $Y^+$ ) é um parâmetro usado em simulações CFD para avaliar a qualidade da camada limite na superfície de um objeto ou em uma região específica de um domínio de simulação. A camada limite é caracterizada por gradientes de velocidade significativos e variações nas propriedades do fluido, como a viscosidade. A resolução adequada da camada limite é crucial para obter resultados precisos e confiáveis. O parâmetro  $Y^+$  é definido como a razão entre a espessura da camada limite ( $\delta$ ) e o tamanho de célula ( $\Delta y$ ) usada na malha discretizada.

Para valores baixos de  $Y^+$ , em torno de 1, a camada limite está sendo bem resolvida pela malha. Isso significa que a espessura da camada limite é próximo do tamanho da célula da malha. É desejável um valor baixo para simulações que envolvem fluxo turbulento. Em malhas com um  $Y^+$  alto, maior que 30, a espessura da camada limite é maior do que o tamanho da célula da malha, o que pode levar a erros e imprecisões nos resultados. É sempre importante considerar o equilíbrio entre a resolução da camada limite e o custo computacional, pois diminuir o  $Y^+$  exigirá uma malha mais refinada e, conseqüentemente, mais recursos e mais tempo de simulação.

### 3 METODOLOGIA

O estudo foi separado em duas grandes áreas: 1) Avaliação estrutural e 2) Desempenho termo hidráulico. A organização do trabalho pode ser visualizada na Tabela 6.

Tabela 6 – Estrutura da metodologia empregada no trabalho

| METODOLOGIA (3)                              |                               |                                                                 |                               |                                                     |                                                 |                                            |
|----------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| ESTRUTURAL (3.1)                             |                               |                                                                 |                               | TERMO HIDRÁULICO (3.2)                              |                                                 |                                            |
| Cilindro<br>(3.1.1)                          |                               | Protótipo estrutural<br><i>SLMHE</i><br>(3.1.4)                 |                               | Núcleo complexo fabricado via <i>SLM</i><br>(3.2.1) |                                                 |                                            |
| Bancadas<br>experimentais<br>(3.1.2)         | Modelo<br>numérico<br>(3.1.3) | Bancada<br>experimental -<br>tensão<br>termomecânica<br>(3.1.5) | Modelo<br>numérico<br>(3.1.6) | Fadiga<br><i>SLM-SS316L</i><br>(3.1.7)              | Bancadas<br>experimentais<br>(3.2.2)            | Numérico<br>núcleo -<br>Térmico<br>(3.2.3) |
|                                              |                               |                                                                 |                               |                                                     | Numérico<br>canal -<br>Hidrodinâmico<br>(3.2.4) |                                            |
| <i>Tensão<br/>térmica</i><br>(3.1.2.1)       |                               |                                                                 |                               |                                                     | <i>Térmica água<br/>e ar</i><br>(3.2.2.1)       |                                            |
| <i>Tensão<br/>mecânica</i><br>(3.1.2.2)      |                               |                                                                 |                               |                                                     | <i>Térmica água<br/>e água</i><br>(3.2.2.2)     |                                            |
| <i>Tensão<br/>termomecânica</i><br>(3.1.2.3) |                               |                                                                 |                               |                                                     | <i>Hidrodinâmica<br/>água e ar</i><br>(3.2.2.3) |                                            |

A avaliação estrutural focou em avaliar as características estruturais do equipamento de maneira experimental e numérica. Essas características foram: tensão térmica, mecânica e termomecânica nos regimes transiente e permanente, além da fadiga. O objetivo foi verificar a resistência deste equipamento em aplicações que envolvam altas temperaturas e pressões de trabalho.

A segunda etapa avaliou o desempenho termo hidráulico de um trocador de calor compacto fabricado por impressão 3D empregando canais complexos. Existem poucos estudos de trocadores de calor fabricados por este processo, entretanto, ainda não fora pesquisado nenhum trocador de calor metálico empregando canais complexos com caminho tridimensional. Este tipo de configuração de caminho aumenta consideravelmente a transferência de calor, entretanto, processos convencionais de fabricação não são capazes de produzi-los. Em razão disso, este trabalho empregou a impressão 3D para a fabricação destes canais em um protótipo.

O núcleo produzido foi testado em bancada experimental, e os resultados comparados com modelos analíticos e numéricos.

### 3.1 AVALIAÇÃO ESTRUTURAL

A avaliação estrutural foi realizada em um tubo espesso de aço, que simulam o comportamento de um canal circular de trocador, e um protótipo de trocador de calor produzido por manufatura aditiva. Serão avaliados esforços térmicos, mecânicos e combinados, assim como a fadiga de trocadores de calor compactos.

Para a análise estrutural, duas geometrias foram estudadas.

1. Cilindro espesso – Simula o comportamento de um canal;
2. Protótipo estrutural *SLMHE* – Protótipo de trocador de calor com canais retos produzido por *SLM* para avaliar a tensão termomecânica;

O objetivo principal é avaliar como o acoplamento das tensões térmicas e mecânicas atuam em um trocador de calor compacto produzido por impressão 3D.

#### 3.1.1 Cilindro

Tendo em vista a dificuldade em estudar a geometria complexa de um núcleo de trocador de calor, decidiu-se por inicialmente estudar um tubo vazado. Este tubo vazado de parede espessa simula o comportamento de um canal de trocador de calor. Devido às limitações de fabricação e de medições, o tubo foi feito com paredes espessas e com diâmetro maior que o empregado no trocador de calor.

O objetivo nesta amostra é avaliar experimentalmente, analiticamente e numericamente a tensão térmica combinada com a tensão mecânica nas paredes do tubo, avaliando tanto o regime transiente quanto o permanente. Essa avaliação permite uma caracterização dos dois esforços relevantes em trocadores, choque de temperatura e pressurização.

O tubo, de aço inoxidável AISI 316L, pode ser visualizado na Fig. 10. O diâmetro interno é de 7,55 mm, diâmetro externo de 22,44 mm e comprimento útil de 110 mm. As extremidades são utilizadas para fixação das mangueiras. Foi necessário empregar um tubo de parede grossa para gerar um gradiente significativo no campo de temperatura que varia com o tempo ao longo de sua espessura. As propriedades do tubo são apresentadas na Tabela 7.

Fig. 10 – Tubo vazado de parede espessa



Fonte: Autor (2025).

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e térmicas do material de fabricação do cilindro

|                                                                    |                       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| <b>E – Módulo de elasticidade [GPa]</b>                            | 200                   |
| <b><math>\nu</math> – Coeficiente de Poisson</b>                   | 0,3                   |
| <b>k – Condutividade térmica [W/mK]</b>                            | 14,6                  |
| <b>Cp – Calor específico [J/kgK]</b>                               | 450                   |
| <b><math>\alpha</math> – Coeficiente de expansão térmica [1/K]</b> | $1,62 \times 10^{-5}$ |
| <b><math>\rho</math> – Massa específica [kg/m<sup>3</sup>]</b>     | 7900                  |

Fonte: (ASTM A240, 2022).

### 3.1.2 Bancadas experimentais – Cilindro

#### 3.1.2.1 Tensão térmica

Para avaliar a tensão térmica em regime permanente e transiente em um cilindro espesso foi projetada uma bancada experimental, apresentada na Fig. 11a. Os elementos que compõe a bancada foram enumerados de 1 a 10. A amostra (1) é destacada na Fig. 11b, equipada com dois termopares tipo T (10) para leitura da temperatura na superfície externa e um extensômetro triaxial para leituras de deformação (9). Devido ao teste envolver mudanças de temperatura na amostra foram utilizados extensômetros triaxiais pois estes são autocompensados, significando que a deformação devido a temperatura é compensada automaticamente.

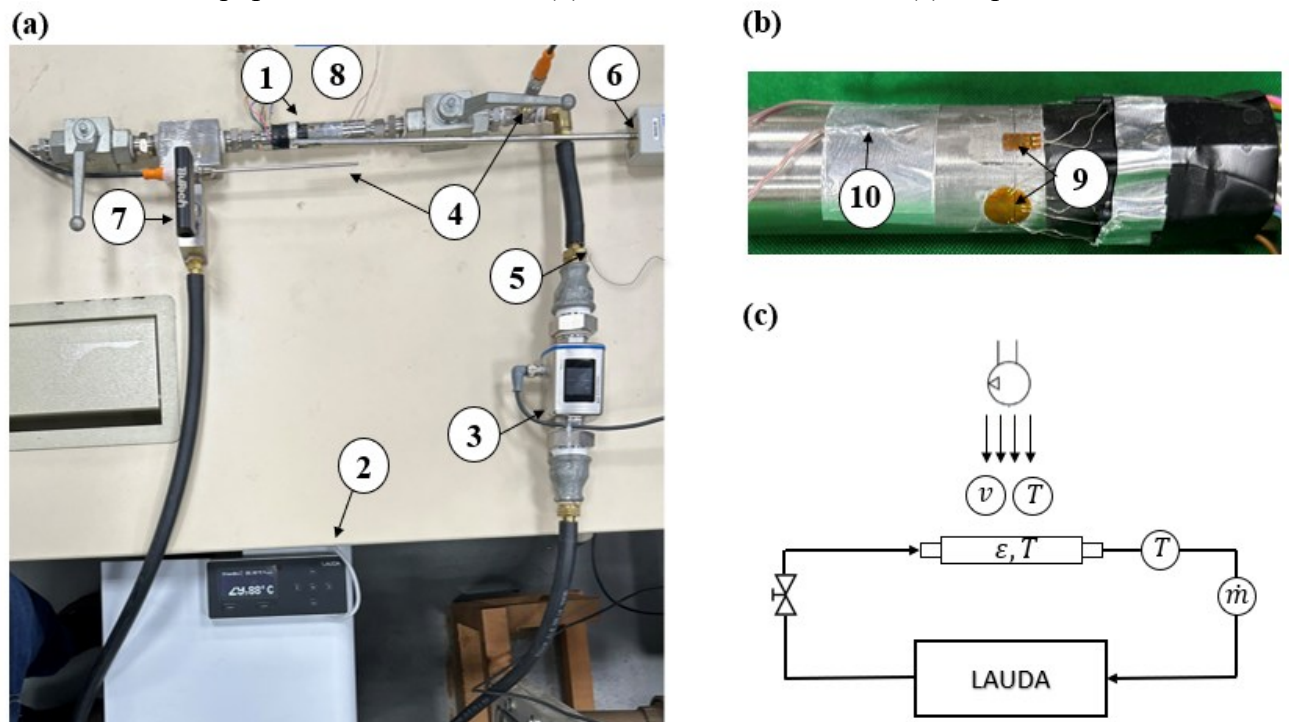
A bancada consiste em dois escoamentos, um interno com água quente, proveniente do banho térmico, e outro externo, forçado, de ar em temperatura ambiente. Um banho térmico (2) foi necessário para o escoamento interno de água quente e a leitura da vazão da água foi feita por um medidor eletromagnético (3). Em (4) são apresentados dois *RTDs* para leitura da temperatura do ar e da água. Para obter uma resposta mais rápida na leitura da temperatura da

água, e por quesitos de redundância, foi utilizado um termopar (5) no escoamento interno. O escoamento do ar forçado (8) não pode ser visto na imagem da bancada, apenas no esquemático apresentado na Fig. 11c. A velocidade do ar comprimido foi medida com um anemômetro (6). Uma válvula foi empregada para regular a vazão da água.

Com relação ao procedimento de tensão experimental, foram colados três extensômetros na amostra. Dois deles uniaxiais e alinhados com as direções das tensões principais em um cilindro (circunferencial e longitudinal), conhecidas através da literatura. Sabe-se que a componente radial da tensão é nula na superfície externa, portanto, é possível calcular a tensão equivalente de *von Mises* a partir da tensão circunferencial e longitudinal. O extensômetro roseta mede a tensão equivalente na superfície independente da direção em que é posicionado. Dessa forma, foi possível medir a tensão equivalente de *von Mises* em dois locais diferentes.

O sistema de aquisição de dados da *National Instruments* foi equipado com módulos de leitura de corrente (*NI – 9203*), *RTDs* (*NI – 9216*), deformação (*NI – 9237*) e termopares (*NI – 9211*). O equacionamento para obtenção da tensão experimental utilizando extensômetros é apresentado no **Apêndice B**, assim como os detalhes do sistema de aquisição de dados e as incertezas combinadas para a tensão.

Fig. 11 – Bancada experimental para avaliar tensões térmicas transientes em um cilindro: (a) Bancada equipada com os sensores; (b) Amostra instrumentada; (c) Esquemático



Fonte: Autor (2025).

A especificação de todos os sensores utilizados pode ser vista na Tabela 8, indicando os limites de operação e a incerteza de medição de cada um.

Tabela 8 – Especificação dos equipamentos e sensores utilizados

| Nº Item | Instrumento                      | Modelo                           | Limite de operação   | Incerteza                      |
|---------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|
| 2       | Banho termostático               | <b>LAUDA</b> PRO RP 250 E        | -45°C to 200°C       | -                              |
| 3       | Medidor de vazão eletromagnético | <b>ENDRESS+HAUSER</b> PICOMAG 1" | 750 l/min (12,5 l/s) | 0,8% MR or 0,1% FS             |
| 4       | Medidores de temperatura (RTDs)  | <b>OMEGA</b> PT100 PR-21d        | 250°C                | $\pm(0,15 + 0,002 \cdot T)$ °C |
| 5/10    | Termopares                       | <b>OMEGA</b> SERIES 5TC          | 350°C                | 1 °C                           |
| 6       | Anemômetro                       | <b>OMEGA</b> FMA904A-MA          | 25,4 m/s             | 2% FS                          |
| 9       | Extensômetro roseta triaxial     | <b>Kywoa</b> KFR-1-120-D25-16    | 2000 $\mu$ m         | 3% FS                          |

Fonte: Autor (2025).

#### 3.1.2.1.1 Procedimento experimental para obtenção da tensão térmica transiente e permanente

O objetivo do experimento é realizar um choque térmico no cilindro, de modo a avaliar o pico da tensão no regime transiente, e o valor no regime permanente. Para isso, foi aplicada a condição de convecção forçada com água quente no interior da amostra e convecção forçada de ar a temperatura ambiente na face externa.

No experimento, a amostra foi submetida a condição de escoamento cruzado de ar a temperatura ambiente proveniente do compressor durante todo o teste. Após o aparato atingir a temperatura ambiente (todos os termopares registrarem a mesma temperatura), o teste é iniciado. O procedimento continuava até que a amostra atingisse a condição de regime permanente. Durante todo este processo, o extensômetro registrava as deformações no cilindro, que depois foram aplicadas na Eq. (B3) (**Apêndice B**) para estimar a tensão na superfície da amostra.

Ao final do teste, desligava-se o sistema e aguardava ele retornar à temperatura ambiente, condição de equilíbrio térmico. Em seguida, o sistema era configurado para uma nova condição e um novo teste era realizado.

Os parâmetros medidos durante o experimento são: temperatura inicial do protótipo, temperaturas dos escoamentos interno e externo, velocidade do ar frio, vazão do fluxo quente no interior e deformação na superfície. Com base nesses parâmetros é possível calcular os coeficientes convectivos interno e externo e posteriormente comparar os resultados com modelo analítico e numérico. O sequenciamento do experimento foi:

1. Deixar todo o sistema atingir a temperatura ambiente (aproximadamente 22°C);
2. Ligar o compressor e iniciar a convecção forçada externa;
3. Aquecer a água para a temperatura desejada;
4. Abrir a válvula (7) para o choque de temperatura no cilindro;
5. Monitorar os parâmetros até que se atinja o regime permanente.

De acordo com o modelo de tensão térmica em cilindros apresentado no item 2.3.2, quando a água quente entra em contato com a superfície interna do cilindro, ocorre um diferencial de temperatura através da parede do cilindro, gerando uma tensão térmica. Essa tensão aumenta até atingir um valor máximo. Deste ponto em diante, a diferença de temperatura entre as superfícies diminui, logo a tensão também decai até atingir um valor constante na condição de regime permanente. O objetivo é comparar a tensão térmica transiente (pico) e em regime permanente do modelo teórico com os resultados obtidos nestes testes experimentais.

Foram realizados dois tipos de experimentos, o primeiro para verificar o pico de tensão térmica (regime transiente) e o segundo para avaliar a tensão no regime permanente. Nestes testes, os parâmetros variados foram: diferença de temperatura entre ramal quente e frio ( $\Delta T$ ) e velocidade do ar.

Para a análise de pico de tensão térmica, foram realizados 5 experimentos para cada diferencial de temperatura  $\Delta T$  (10°C, 20°C, 30°C, 40°C e 50°C) com velocidade de saída do ar fixa de 6 m/s, totalizando 25 testes

Para a análise do regime permanente, foram realizados 3 experimentos para cada diferencial de temperatura  $\Delta T$  (30°C, 40°C e 50°C) com a velocidade de saída do ar variando entre 6 m/s, 12 m/s e 18 m/s, totalizando 27 testes. Devido à baixa tensão térmica registrada no regime permanente, foi necessário trabalhar apenas com diferenciais de temperatura mais elevados. O ar ambiente estava sempre próximo de 22°C. A vazão da água foi medida durante todo o experimento, e seu valor foi utilizado para o cálculo do coeficiente convectivo. Os dados foram registrados até o momento em que não fosse observado variação na tensão medida.

Todo o conjunto experimental é apresentado na Tabela 9. Posteriormente, na discussão de resultados, cada experimento apresentará um código no formato  $c\_TX\_Y$ , sendo que “c”

remete à cilindro, “*T*” à temperatura, “*X*” ao valor do diferencial de temperatura e “*Y*” a ordem em que o experimento foi realizado. Por exemplo, *c\_T10\_1* remete ao primeiro experimento com diferencial de temperatura de 10°C. Para os experimentos em regime permanente a nomenclatura fica *c\_TX\_Y\_rp*.

Tabela 9 – Conjunto de experimentos de tensão térmica no cilindro

| Tensão térmica - transiente (pico)     |    |    |    |                               |    |
|----------------------------------------|----|----|----|-------------------------------|----|
| <i>Diferencial de temperatura [°C]</i> |    |    |    | <i>Velocidade do ar [m/s]</i> |    |
| 10                                     | 20 | 30 | 40 | 50                            | 6  |
| Tensão térmica - permanente            |    |    |    |                               |    |
| <i>Diferencial de temperatura [°C]</i> |    |    |    | <i>Velocidade do ar [m/s]</i> |    |
| 30                                     | 40 | 50 |    | 6                             | 12 |
|                                        |    |    |    |                               | 18 |

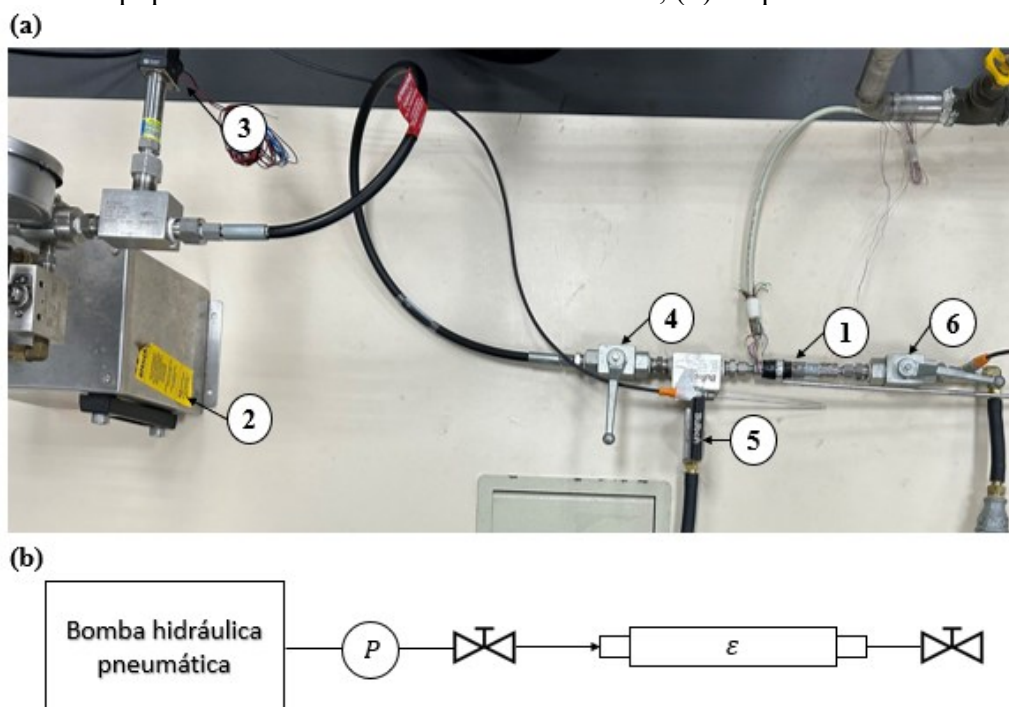
Fonte: Autor (2025).

### 3.1.2.2 Tensão mecânica

A bancada (Fig. 12) conta com o cilindro com extensômetro (1), uma bomba hidráulica pneumática (2), um transdutor de pressão (3) e três válvulas (4, 5 e 6). Nos testes, a válvula (4) permanecia aberta, enquanto as válvulas (5) e (6) estavam fechadas. Dessa forma, ocorria a pressurização no interior do tubo.

O cilindro e sua instrumentação foram detalhados na seção 3.1.2.1. A Tabela 10 apresenta as especificações da bomba, transdutor de pressão e extensômetro utilizados. Para a avaliação da tensão mecânica foram necessários dois módulos, um para leitura de corrente (*NI – 9203*) para o transdutor de pressão e outro para leitura de deformação (*NI – 9237*) medida pelo extensômetro, ambos podem ser visualizados no **Apêndice B**.

Fig. 12 – Bancada experimental para avaliar tensão mecânica em um cilindro: (a) Bancada equipada com todos os sensores necessários; (b) Esquemático



Fonte: Autor (2025).

Tabela 10 – Especificação dos equipamentos e sensores utilizados

| Nº Item | Instrumento                  | Modelo                          | Limite de operação | Incerteza |
|---------|------------------------------|---------------------------------|--------------------|-----------|
| 1       | Extensômetro roseta triaxial | <i>Kywoa</i> KFR-1-120-D25-16   | 2000 $\mu\text{m}$ | 3% FS     |
| 2       | Bomba hidráulica pneumática  | <i>HASKEL</i> MS-71             | 606 bar            | -         |
| 3       | Transdutor de pressão        | <i>ESI HIPRES</i> HP1003 SERIES | 2000 bar           | 0,5% FS   |

Fonte: Autor (2025).

#### 3.1.2.2.1 Procedimento experimental para obtenção da tensão mecânica

O procedimento de teste consistia no preenchimento do cilindro, mangueira e conexões com água. Uma vez que todo o sistema estava preenchido, a água era pressurizada com o auxílio da bomba.

Foram utilizados 4 níveis de pressão, 50 bar, 100 bar, 150 bar e 200 bar e realizados sete experimentos para cada nível. Os dados foram adquiridos por 80 segundos. No total, 28 testes foram realizados. Zilio et al. (2022) realizaram testes semelhantes. Para discussão de resultados, cada experimento apresentará um código no formato  $c\_PX\_Y$ , sendo que “c” remete

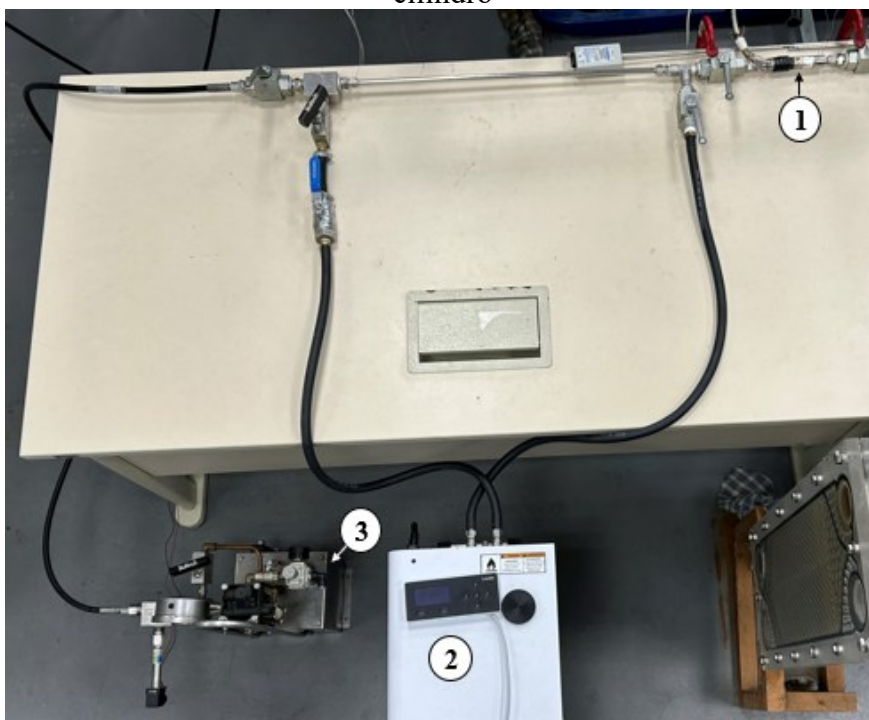
à cilindro, “ $P$ ” à pressão, “ $X$ ” a magnitude de pressão e “ $Y$ ” a ordem em que o experimento foi realizado.

### 3.1.2.3 Tensão termomecânica

Diferentes bancadas foram desenvolvidas para os experimentos de tensão térmica e mecânica no cilindro. Como um dos objetivos desta tese foi de analisar a tensão combinada, uma terceira bancada foi desenvolvida.

A bancada era composta pelo banho termostático (2), bomba hidráulica pneumática (3), sensores RTDs e termopares para medições de temperatura, extensômetros triaxiais roseta para medição de deformação, anemômetro para medição da velocidade do ar externo e do cilindro (1). A bancada pode ser vista na Fig. 13. Neste caso não foi utilizado o medidor de vazão eletromagnético, como na bancada do item 3.1.2.1, uma vez que a vazão do experimento foi menor do que o mínimo necessário para a leitura do medidor. Salienta-se que a vazão gerada pela bomba não é elevada e nem uniforme, como no banho termostático.

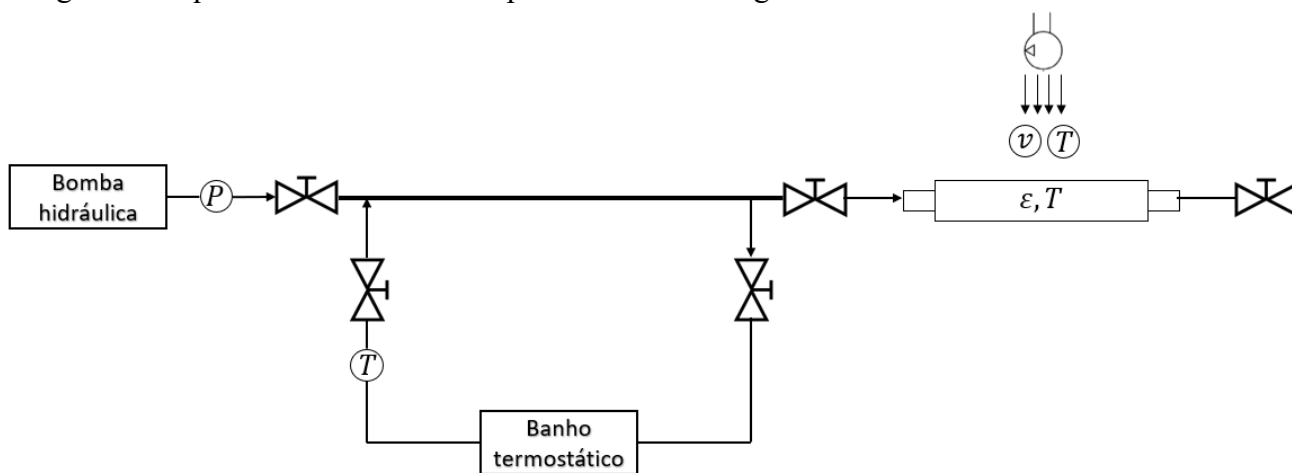
Fig. 13 – Bancada experimental para combinação de esforços térmicos e mecânicos no cilindro



Fonte: Autor (2025).

O esquemático da bancada é apresentado na Fig. 14, definindo os parâmetros medidos e os locais de medição.

Fig. 14 – Esquemático da bancada experimental de carregamentos combinados no cilindro



Fonte: Autor (2025).

### 3.1.2.3.1 Procedimento experimental para obtenção da tensão termomecânica

Para a explicação do procedimento experimental é necessária uma aproximação da visão geral da bancada da Fig. 13, com enfoque no conjunto de válvulas utilizadas. Essa aproximação pode ser visualizada na Fig. 15. Salienta-se que todas as válvulas são resistentes à altas pressões.

Fig. 15 – Aproximação da vista geral da bancada para melhor visualização das válvulas



Fonte: Autor (2025).

O primeiro passo do experimento foi fechar as válvulas (4) e (7) enquanto as válvulas (5) e (6) estavam abertas, e então iniciava-se o escoamento da água quente, proveniente do banho térmico, pela tubulação. Neste momento também, era ligado o compressor de ar para

gerar o fluxo cruzado de ar frio externo ao cilindro. Nota-se que o cilindro, a jusante da válvula (7), não era aquecido pela água e mantinha-se com a temperatura ambiente.

Posteriormente, a válvula (6) era fechada e a válvula (4) aberta, fazendo com que a água aquecida preenchesse o reservatório da bomba hidráulica pneumática, de modo a garantir o uso de água quente durante o processo de pressurização. Com o reservatório preenchido, a válvula (5) era fechada e era cessado o fluxo proveniente do banho termostático. Neste momento era realizado a pressurização da linha com água quente até a válvula (7), que se mantinha fechada. Neste ponto não havia quaisquer tensões no cilindro, térmica ou mecânica. O próximo passo era abrir a válvula (7) enquanto a válvula (8) ainda estava aberta, fazendo com que a bomba começasse a empurrar a água quente para dentro do cilindro, já induzindo um pico de tensão térmica (fluxo de água quente).

A partir deste ponto duas diferentes configurações foram avaliadas:

- **Configuração 1:** A válvula (8) era mantida aberta por 10 segundos e então fechada, ocasionando, neste momento, a pressurização interna do cilindro. Dessa forma, enquanto a tensão térmica já tinha atingido seu pico (visto que o tempo para isso é da ordem de 2 a 3 segundos) e estava decrescendo, observava-se um aumento da tensão, proveniente da tensão mecânica, oriunda da pressurização do vaso. Assim, somam-se os esforços térmicos e mecânicos experimentalmente.
- **Configuração 2:** A válvula (8) era fechada imediatamente após a abertura da válvula (7), buscando sobrepor a tensão mecânica juntamente com o máximo pico de tensão térmica. Assim, somam-se os esforços térmicos e mecânicos gerando experimentalmente uma situação de maior estresse no cilindro.

Além das válvulas mencionadas, a bancada ainda apresentava um anemômetro (10) e um RTD (11) para medir os dados do escoamento do ar proveniente do compressor (12). Os sensores foram detalhados nas seções 3.1.2.1 e 3.1.2.2.

Um parâmetro muito importante para este experimento é a vazão mássica da água quente, indispensável para os modelos de tensão térmica apresentados. Como o objetivo é realizar comparações com modelos teóricos (detalhados no item 2.3.3), foi preciso estimar este parâmetro, uma vez que por limitações do sensor, não foi possível utilizar o medidor eletromagnético.

Para isso foi utilizado um Becker, uma balança e um cronometro, método semelhante foi empregado por Morteau et al. (2016). Assumiu-se que a bomba apresentasse uma vazão fixa para determinada pressão, portanto, era necessário determinar essa vazão. Nesta investigação,

inicialmente as válvulas (5), (6) e (7) estavam fechadas e as válvulas (4) e (8) abertas, e ligava-se a bomba. Neste momento, todo o sistema até a válvula (7) estava pressurizado na pressão de teste. Então a válvula (7) era aberta e o cronometro iniciado, após 30 segundos a válvula (7) era fechada e a massa de água no Becker medida. A partir dos dados de tempo e massa, a vazão mássica foi estimada para cada pressão de teste.

As pressões utilizadas nos experimentos foram 100 bar e 150 bar, ambas com um diferencial de temperatura de 20°C. O fator limitante para o diferencial de temperatura foi a máxima temperatura de trabalho da bomba hidráulica, 45°C.

Neste experimento foram estimados o pico de tensão térmica, mecânica e a tensão combinada. Vale lembrar, que conforme descrito, no pico de tensão térmica não existia a parcela da tensão mecânica. Apenas após iniciar o decaimento da tensão térmica, que o sistema foi pressurizado, e foi estimada a tensão combinada.

Para discussão de resultados, cada experimento apresentará um código no formato  $c\_PXT\_Y$ , sendo que “c” remete à cilindro, “P” à pressão, “T” à temperatura, “X” a magnitude de pressão e “Y” a ordem em que o experimento foi realizado.

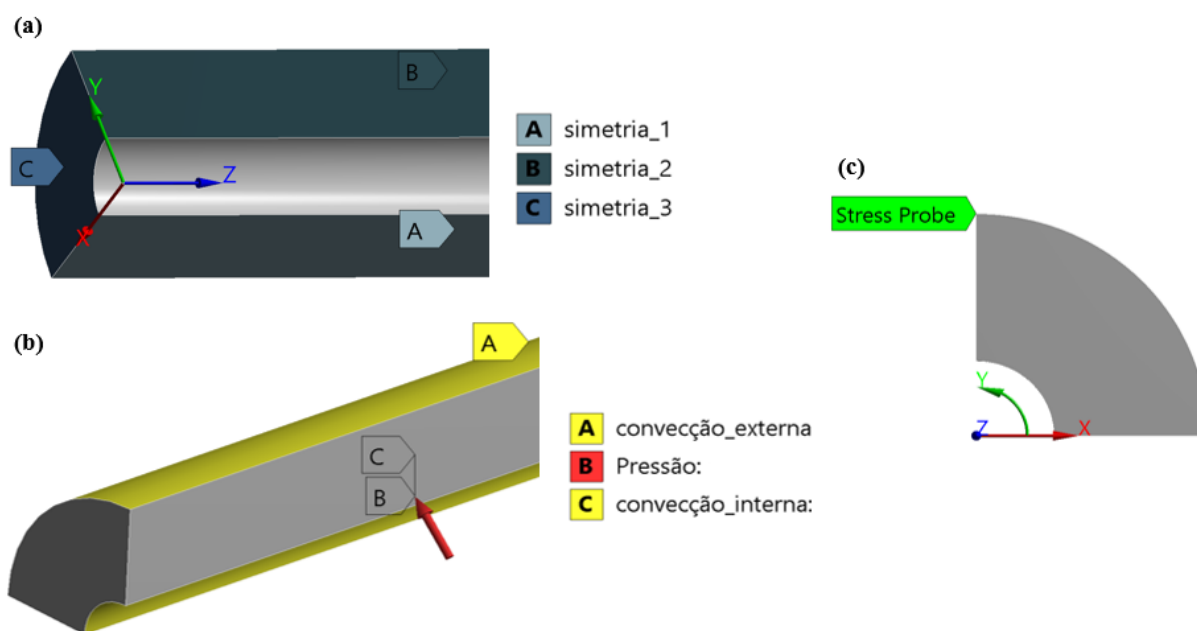
### 3.1.3 Modelo numérico – Cilindro

Para o modelo numérico do cilindro foi considerada apenas a região espessa do cilindro (ver Fig. 10) e empregado o software comercial *Ansys*.

Neste estudo foi avaliada a tensão equivalente na superfície externa (Fig. 16c) do cilindro, de modo a analisar os resultados em três vias: analítica, experimental e numérica. Visando diminuir o recurso computacional, foi modelado 1/8 do cilindro, e utilizada a condição de simetria como condições de contorno, como pode ser visto na Fig. 16a. Nas faces onde a condição simétrica é aplicada é definido automaticamente uma condição de contato sem atrito. Na Fig. 16b podem ser vistas as condições de carregamento, convecção interna e externa, assim como a pressão interna aplicada.

As devidas magnitudes ( $T$ ,  $P$ ,  $\dot{m}$  e  $h$ ) foram monitoradas durante os experimentos e utilizadas como parâmetros de entrada para o modelo numérico (**Apêndice C**). Para as simulações de tensão térmica transiente e permanente (Tabela C3), tensão mecânica (Tabela C4) e tensão termomecânica transiente (Tabela C5 e Tabela C6).

Fig. 16 – Condições de simetria (a), carregamento (b) e local de medição da tensão equivalente (c)



Fonte: Autor (2025).

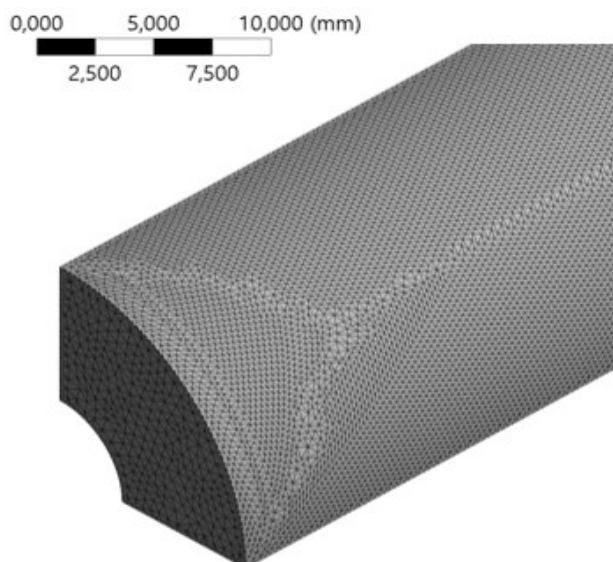
Neste modelo foi investigada a tensão térmica transiente, permanente e a tensão mecânica, assim como a combinação das duas, tensão termomecânica. Para considerar a tensão térmica transiente foi necessário empregar o módulo no *Ansys* de análise transiente térmica. Esse módulo permite avaliar os parâmetros desejados, como tensão e temperatura, em função do tempo.

As condições de contorno de convecção e pressão foram consideradas desde o momento inicial. Em  $t = 0,1s$  por exemplo, a temperatura da superfície interna no cilindro é similar à temperatura do escoamento de água quente, enquanto a temperatura da superfície externa do cilindro é a temperatura ambiente. Essa diferença abrupta de temperatura entre as duas superfícies é o que leva às tensões térmicas transientes, ou picos de tensão térmica. Esse fenômeno ocorre devido a dilatação térmica não uniforme no cilindro, como mostrado na seção 2.3.2.

Para realizar a análise da tensão de pico (transiente) foi definido um tempo total de 10 segundos, utilizando um degrau de tempo automático, com o degrau inicial e mínimo de 0,01 segundos e máximo de 0,2 segundos. Para análise do regime permanente o tempo total de simulação foi de 300 segundos com um degrau máximo de 10 segundos. Isso significa que nos momentos iniciais, onde a diferença de temperatura era maior, foram simulados mais pontos do que no regime permanente, garantindo uma boa análise da região do pico de tensão.

Foi utilizado uma malha adaptativa com tamanho médio de elemento de 0,3 mm e elementos tetraédricos para o modelo de elementos finitos (Fig. 17). A análise de convergência de malha foi realizada utilizando um dos experimentos de tensão térmica transiente com  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ , caso de maior tensão, e o procedimento é detalhado no **Apêndice C**.

Fig. 17 – Malha utilizada para simulações do cilindro com tamanho médio de 0,3 mm



Fonte: Autor (2025).

### 3.1.4 Protótipo estrutural *SLMHE*

O objetivo desta análise, assim como no caso anterior, é de investigar a tensão térmica, mecânica e a tensão combinada, tanto no regime transiente quanto no permanente.

O protótipo possui uma geometria (diâmetro e espessura de parede) semelhantes à de um trocador compacto, porém o número de canais existentes é bem inferior a quantidade de canais de um trocador de calor real. A amostra fabricada contempla um arranjo de canais cruzado, onde os canais transversais estão abertos para o ambiente e os canais longitudinais fechados. Dessa forma, é possível realizar a pressurização dos canais longitudinais e o choque térmico nos canais transversais, gerando esforços termomecânicos. A amostra foi fabricada pela UNICAMP através de uma prestação de serviço e os detalhes da configuração são apresentados na Tabela 11. Para evitar o aporte de calor localizado excessivo, foi utilizado o método de *Checkerboard* para fusão das camadas.

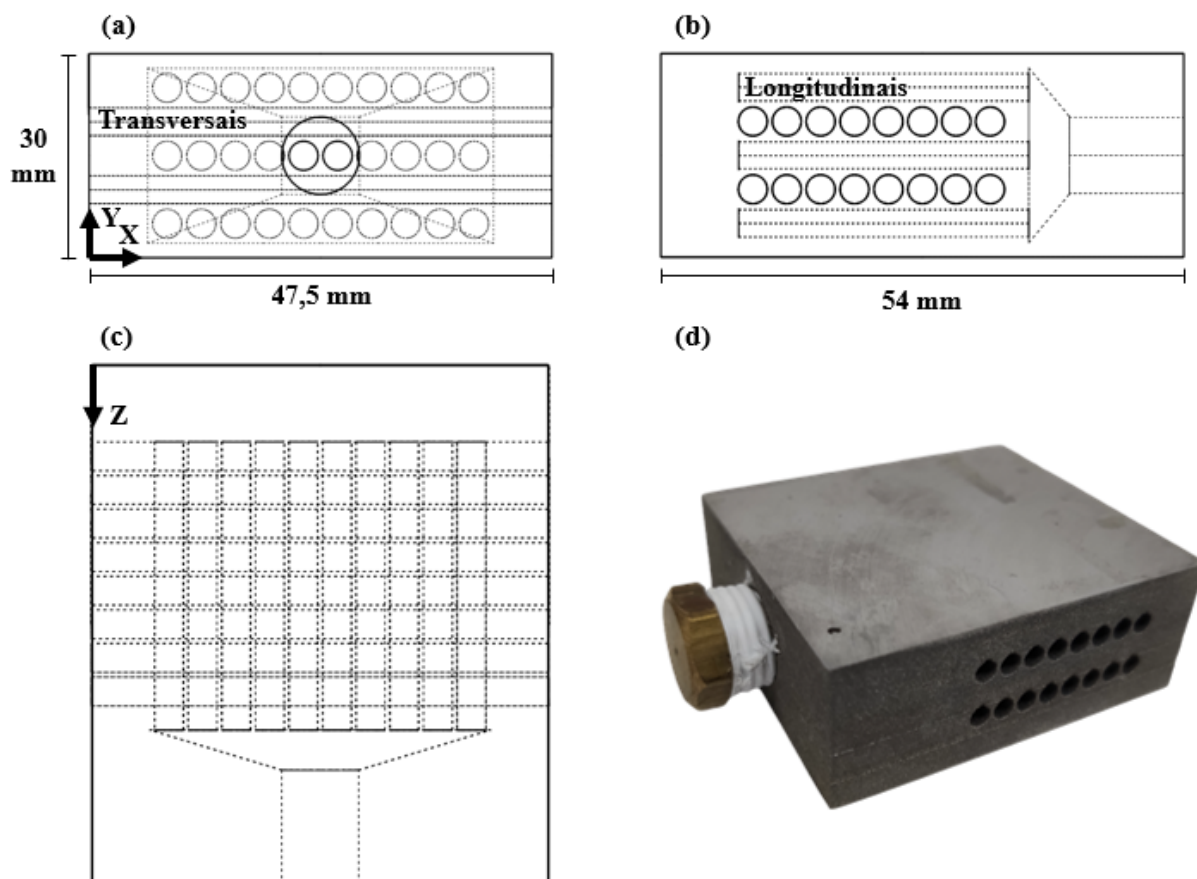
Tabela 11 – Características das amostras fabricadas para ensaios de pressurização

|                                                   |         |
|---------------------------------------------------|---------|
| <b>Arranjo</b>                                    | Cruzado |
| <b>Espessura da parede entre canais [mm]</b>      | 0,5     |
| <b>Diâmetro dos canais [mm]</b>                   | 3,0     |
| <b>Comprimento do protótipo [mm]</b>              | 54,0    |
| <b>Largura do protótipo [mm]</b>                  | 47,5    |
| <b>Altura do protótipo [mm]</b>                   | 30      |
| <b>Número de ramos longitudinais</b>              | 3       |
| <b>Número de canais em cada ramo longitudinal</b> | 10      |
| <b>Número de ramos transversais</b>               | 2       |
| <b>Número de canais em cada ramo transversais</b> | 8       |
| <b>Direção de impressão</b>                       | Y       |

Fonte: Autor (2025).

Após a impressão, as medidas externas de todas as amostras foram conferidas e não foram observadas diferenças significativas em nenhuma das medidas. Algumas não são passíveis de medição previamente ao experimento, como diâmetros e espessuras referentes ao conjunto de canais longitudinais. Na Fig. 18 são mostradas as três vistas do protótipo, ilustrando a configuração e os tamanhos, juntamente do protótipo impresso. Conforme visto na Tabela 11, ele foi impresso na direção Y, ou seja, ortogonalmente a direção dos canais (Fig. 18a).

Fig. 18 – Protótipo *SLMHE*: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) vista superior; (d) isométrica do protótipo impresso



Fonte: Autor (2025).

Ainda na revisão bibliográfica foi apresentado o estudo de Kempen et al. (2014), que relacionou o acabamento circunferencial de um canal impresso por MA com o diâmetro. Através da Fig. 7 pode ser observado que para o diâmetro máximo investigado (2,5 mm) o perímetro circunferencial não apresenta alta deformação, tanto para impressão horizontal quanto vertical, gerando canais bem-acabados. Este é o caso dessa geometria, onde o diâmetro é igual a 3 mm e ambos os ramais foram impressos paralelamente a plataforma.

Os parâmetros associados ao processo de manufatura aditiva (velocidade, potência, ângulo do laser) foram definidos pela empresa contratada para a fabricação dos protótipos e seguiram os valores padrões fornecidos pela máquina. Foi utilizado pó de aço inoxidável 316L comercializado pela *Electro Optical Systems (EOS)*. O fabricante garante que a composição química do pó de aço corresponde a definida na *ASTM F138*.

Conforme apresentado no capítulo anterior, a manufatura aditiva a laser realiza a impressão das peças por meio da sobreposição de camadas, resultando em um comportamento mecânico com características ortotrópicas. Por essa razão, o fabricante fornece as propriedades

mecânicas de corpos de prova, produzidos seguindo os parâmetros padrões fornecidos pela máquina, tanto nas direções horizontais (*X e Z*), quanto na direção vertical (*Y*), perpendicular à mesa de impressão (Tabela 12).

Tabela 12 – Propriedades mecânicas de peças fabricadas em aço *EOS 316L*

|                                     | <b>X e Z</b>            | <b>Y</b>                |
|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| <b>Módulo de elasticidade</b>       | 185 GPa                 | 180 GPa                 |
| <b>Alongamento até a fratura</b>    | 40 ± 15 %               | 50 ± 20 %               |
| <b>Tensão de escoamento</b>         | 530 ± 60 MPa            | 470 ± 90 MPa            |
| <b>Tensão limite de resistência</b> | 640 ± 50 MPa            | 540 ± 55 MPa            |
| <b>Dureza</b>                       | tipicamente 85 HRB      | tipicamente 85 HRB      |
| <b>Massa específica</b>             | 7,9 g/cm <sup>3</sup> . | 7,9 g/cm <sup>3</sup> . |

Fonte: (Electro Optical Systems, 2020).

A tensão experimental foi medida através de extensômetros, fixados em uma superfície da amostra que se encontra no plano *XZ*, fazendo com que as propriedades na direção *Y* sejam desconsideradas para as análises. As principais propriedades do material são compiladas na Tabela 13, tal como módulo elástico e tensão de escoamento, juntamente com as demais propriedades relevantes para os estudos, retiradas da *ASTM A240*.

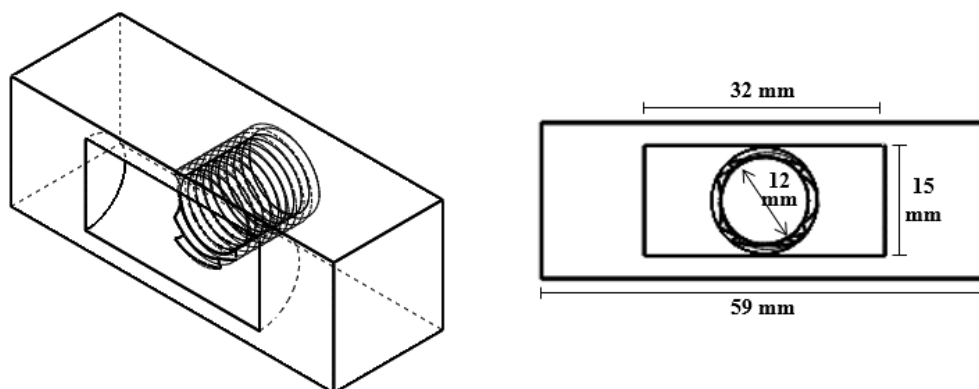
Tabela 13 – Propriedades mecânicas e térmicas do protótipo *SLM* trocador compacto

|                                                  |         |
|--------------------------------------------------|---------|
| <b>E – Módulo de elasticidade [GPa]</b>          | 185     |
| <b>v – Coeficiente de Poisson</b>                | 0,3     |
| <b>k – Condutividade térmica [W/mK]</b>          | 14,6    |
| <b>c<sub>p</sub> – Calor específico [J/KgK]</b>  | 450     |
| <b>α – Coeficiente de expansão térmica [1/K]</b> | 16,2e-6 |
| <b>ρ – Massa específica [Kg/m<sup>3</sup>]</b>   | 7900    |

Fontes: (Electro Optical Systems, 2020) e (ASTM A240, 2022).

Como especificado anteriormente, o ramal longitudinal é fechado, para permitir a pressurização do canal. Entretanto, para o ramal transversal foi necessário a confecção de dois bocais para possibilitar o escoamento de fluido no seu interior. Os detalhes e dimensões do bocal são apresentados na Fig. 19.

Fig. 19 – Dimensões dos bocais utilizados para o escoamento de água



Fonte: Autor (2025).

Os bocais foram impressos em resina *ABS* na impressora *Elegoo Jupiter 6k* com altura de camada de 0,05 mm e tempo de exposição de 3,2 segundos. Após a impressão, os bocais foram fixados na amostra de aço com uma resina epóxi estrutural. Para instalar o extensômetro é necessário que a superfície esteja limpa e uniforme, para tal, a localidade de fixação foi lixada e preparada. O protótipo com os bocais instalados e extensômetros podem ser vistos na Fig. 20. Também, na Fig. 20, chama-se a atenção para a posição do extensômetro, onde buscou-se centralizá-lo acima dos canais longitudinais e transversais.

Fig. 20 – Protótipo *SLMHE* com bocais para escoamento e extensômetro



Fonte: Autor (2025).

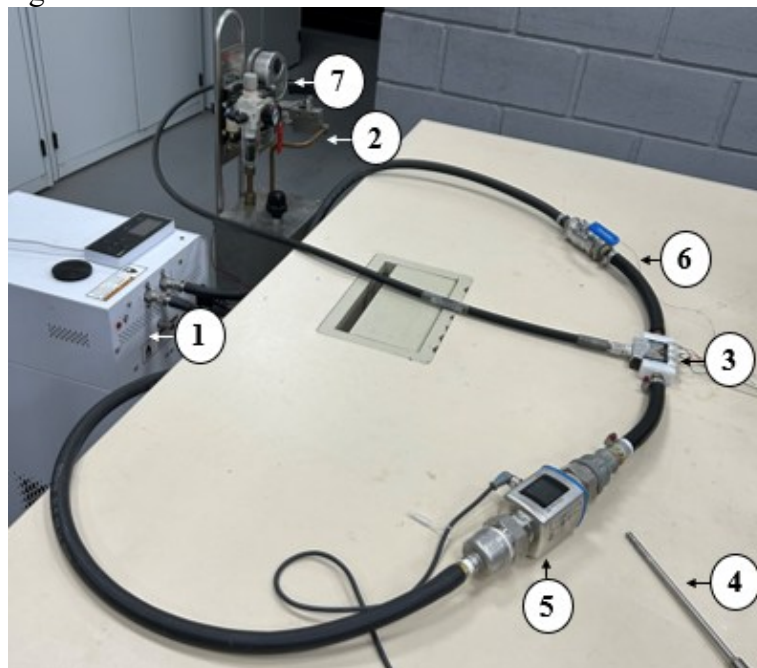
### 3.1.5 Bancada experimental – Protótipo estrutural *SLMHE*

A parte experimental competente a análise das tensões mecânicas e térmicas transientes também foi realizada em uma amostra de trocador fabricado por manufatura aditiva

(ver Fig. 18). A bancada contou com os equipamentos já apresentados nas seções anteriores. Diferentemente da análise de tensão combinada no cilindro, neste caso a tensão máxima transiente (pico) foi estimada considerando tanto a tensão térmica quanto a mecânica. Como a amostra conta com dois ramais, foi possível pressurizar um deles com água a temperatura ambiente enquanto o outro era submetido a um escoamento de água quente.

A bancada era composta por uma bomba hidráulica pneumática *Haskel MS-71* (2) e um banho termostático *Lauda PRO RP 250E* (1). Como pode ser visto na Fig. 21, a bomba tinha apenas uma entrada na amostra, uma vez que o ramal longitudinal tem um comportamento de vaso de pressão, enquanto nos canais transversais ocorria o escoamento da água proveniente do banho termostático. No caso desta bancada não foi necessário utilizar um escoamento externo à amostra. A bancada ainda contava com RTD (4), medidor de vazão eletromagnético (5), termopar (6) e transdutor de pressão (7).

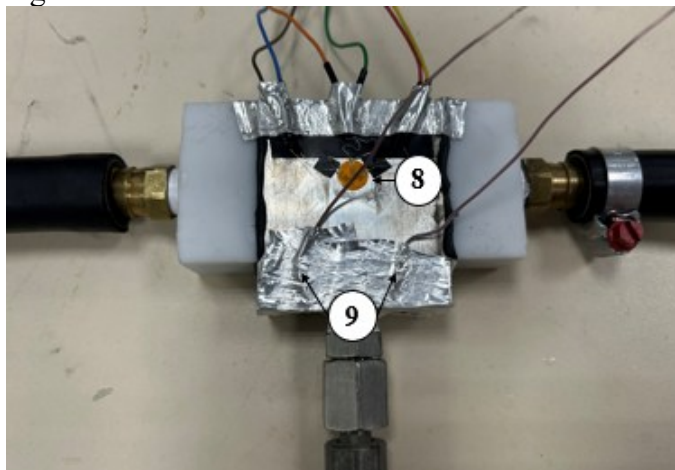
Fig. 21 – Bancada de tensão combinada na amostra SLMHE



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 22 apresenta a amostra submetida ao teste, onde pode ser visto o extensômetro roseta triaxial (8) e os termopares (9) para medição da temperatura superficial. O extensômetro foi fixado na superfície superior da amostra. As especificações dos medidores utilizados nesta bancada, e suas incertezas, foram apresentadas nas Tabela 8 e Tabela 10.

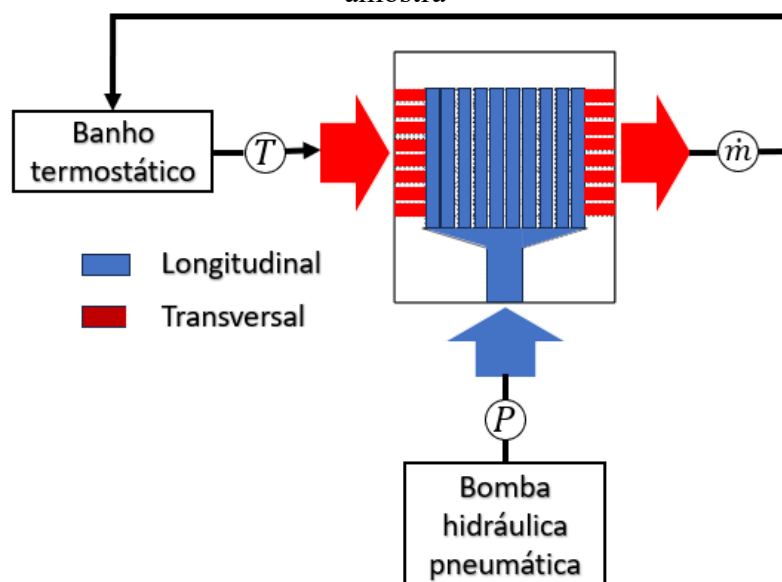
Fig. 22 – Amostra de trocador de calor instrumentada



Fonte: Autor (2024).

A Fig. 23 representa um esquemático da amostra posicionada na bancada. Destaca-se em azul a região sob pressão interna (ramal longitudinal) e em vermelho o escoamento de água quente responsável pelo choque térmico (ramal transversal), assim como o posicionamento dos sensores de pressão, vazão e temperatura.

Fig. 23 – Esquema da bancada experimental para choque térmico e pressurização interna da amostra



Fonte: Autor (2025).

### 3.1.5.1 Procedimento experimental

Inicialmente o ramal transversal (frio – azul) foi pressurizado com água a temperatura ambiente, induzindo a tensão mecânica na amostra. Em seguida, com os dados já sendo

adquiridos, a válvula do ramal quente era aberta, permitindo o escoamento de água no ramal longitudinal. Assim, tinha-se em um primeiro momento apenas a tensão mecânica, para em um segundo momento, aplicar um choque térmico e consequentemente obter a tensão termomecânica transiente.

No segundo momento do teste, os valores de deformação devido ao choque térmico somavam-se com a tensão mecânica já existente. Dessa forma, o pico térmico estava sobreposto com o degrau de tensão devido à pressão. Esse momento caracteriza as maiores tensões em um trocador de calor, pico termomecânico. Essa foi a primeira vez que ambos os esforços foram combinados experimentalmente em uma amostra de trocador de calor.

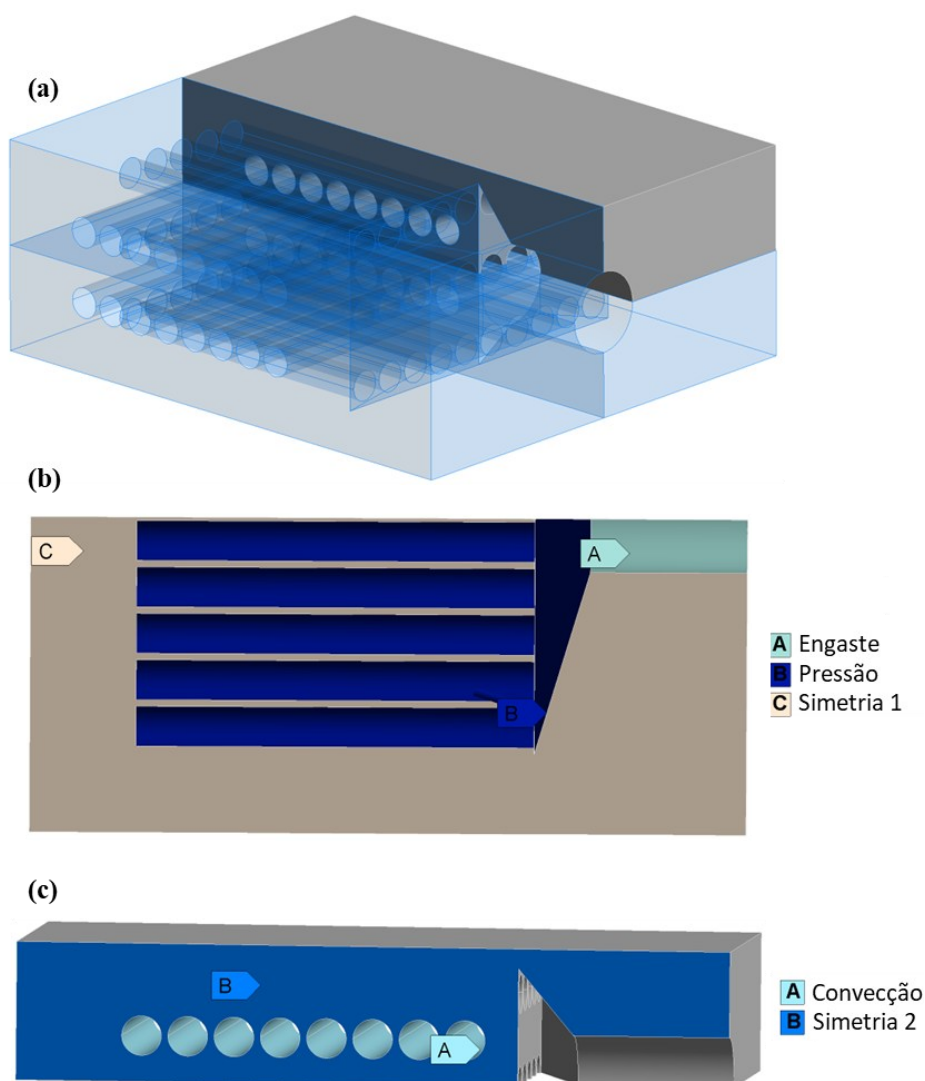
Zilio et al. (2022) mostraram que amostras semelhantes conseguiam resistir a pressões de até 350 bar. Este nível não será investigado, pois o experimento de tensão combinada apresenta níveis maiores de tensão. Em razão disso, foram definidos dois intervalos de pressão para o experimento, 100 e 200 bar. Já a parcela térmica, decidiu-se por não trabalhar com diferenciais de temperatura maiores que 20°C, de modo a obter uma equivalência entre tensão mecânica e térmica. Ainda, salienta-se que o limite de temperatura da resina ABS é de 45°C e foi tomado as providências para que a água escoando não ultrapasse este valor.

Portanto, foram definidos 2 diferenciais de temperatura: 10°C e 20°C. Dessa forma, foram realizados 10 experimentos para cada combinação de temperatura e pressão, totalizando 40 experimentos.

### **3.1.6 Modelo numérico – Protótipo estrutural *SLMHE***

O protótipo descrito na seção 3.1.4 foi discretizado e avaliado numericamente. Novamente, foi avaliado a estrutura do modelo sob as condições de pressurização e choque de temperatura (convecção forçada). O protótipo possui simetria em dois planos (Fig. 24b – C e Fig. 24c – B), ambas foram condições de contorno aplicadas no modelo. Assim como mencionado na seção do cilindro, essas condições são consideradas suporte sem atrito. A região de entrada dos canais longitudinais, onde fica a entrada da bomba hidrostática, foi considerada engastada (Fig. 24b – A). Nos canais longitudinais (Fig. 24b – B) foi definida a pressão interna, já nos canais transversais (Fig. 24c – A) foi considerada a condição de convecção forçada - escoamento interno.

Fig. 24 – Condições do MEF: (a) protótipo completo; (b) engaste, pressão e simetria na vista inferior; (c) convecção e simetria na vista lateral



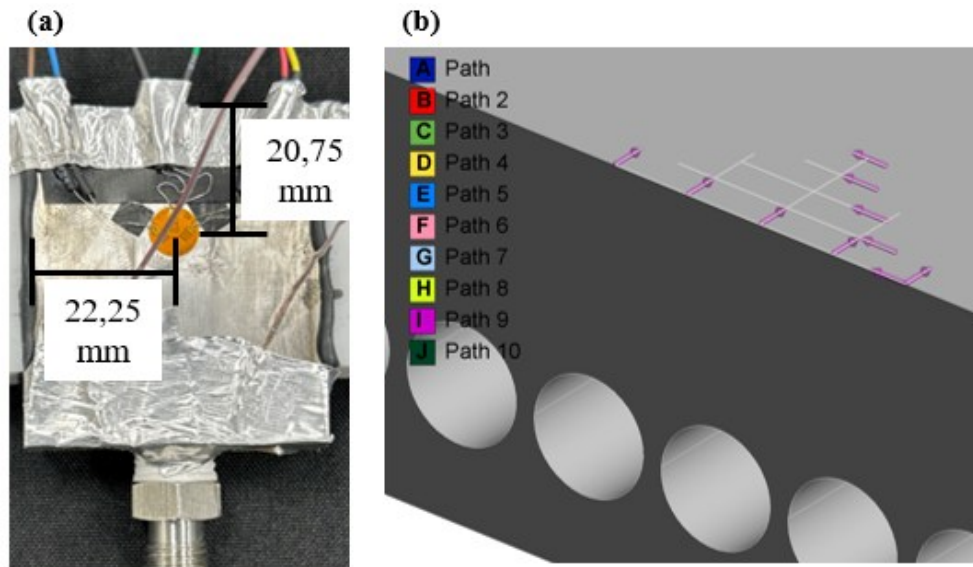
Fonte: Autor (2025).

Foram observados os valores de tensão equivalente de *von Mises* para as tensões termomecânicas no protótipo. Entretanto, diferente do cilindro onde a tensão é constante ao longo do comprimento, aqui a tensão varia com o local de medição. Portanto foi mapeada a região do extensômetro, como pode ser visto na Fig. 25a, e realizado uma análise de tensão na mesma região do modelo numérico.

Primeiro foi obtido a posição do centro do extensômetro e em seguida medido seu diâmetro, este sendo 8,11 mm. A partir destes dados, toda a região da amostra coberta pelo sensor foi avaliada no modelo por meio de 10 linhas inseridas na região de medição. A tensão é avaliada ao longo de cada uma destas linhas e para cada uma é possível obter a média de

tensão equivalente. Assim, para cada caso experimental, obtém-se uma média da tensão considerando todas as linearizações apresentados na Fig. 25b.

Fig. 25 – Locais de medição de tensão: (a) experimental; (b) numérica

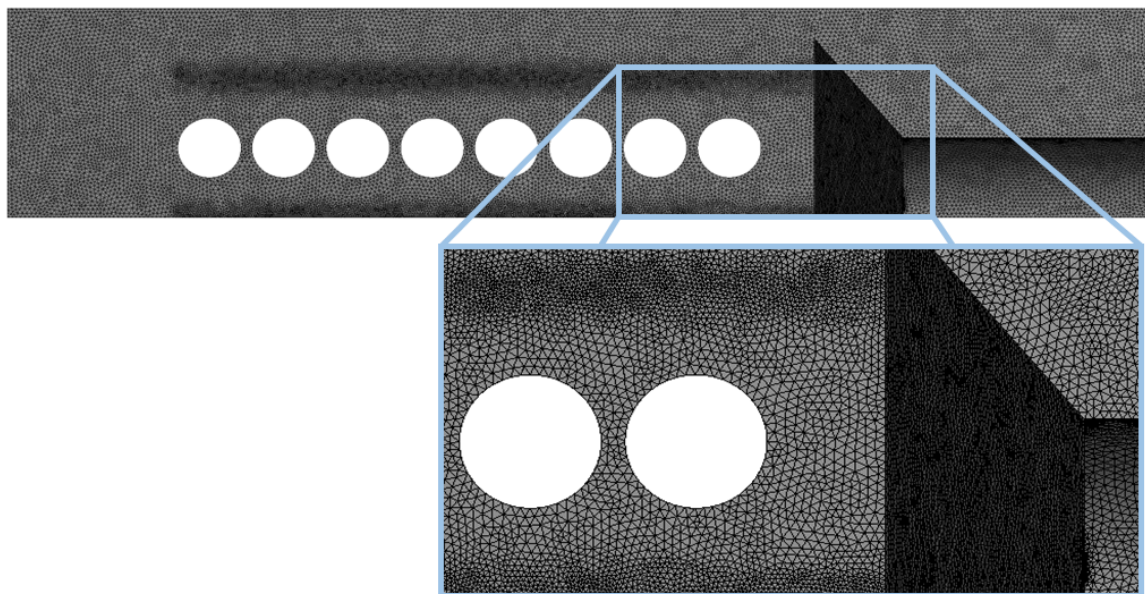


Fonte: Autor (2025).

Novamente aqui, foi preciso resolver o campo de temperatura transiente. O tempo total simulado é de 4 segundos, suficiente para atingir e passar do pico térmico. Esse valor de intervalo de tempo é definido para a comparação com o pico de tensão termomecânica, uma vez que em 4 segundos o pico já tinha sido atingido em todos os experimentos. O passo de tempo mínimo e inicial foi de 0,01 segundos e o máximo de 0,2 segundos.

A malha definida considerou função de tamanho nas proximidades e curvaturas, apresenta elementos tetraédricos de tamanho mínimo igual a  $5 \times 10^{-3}$  mm e é apresentada na Fig. 26. A análise de convergência considerou um dos experimentos e é detalhada no **Apêndice D**, assim como o compilado com os parâmetros de entrada para as simulações do protótipo (Tabela D3).

Fig. 26 – Malhas de elementos finitos para o protótipo estrutural *SLMHE*

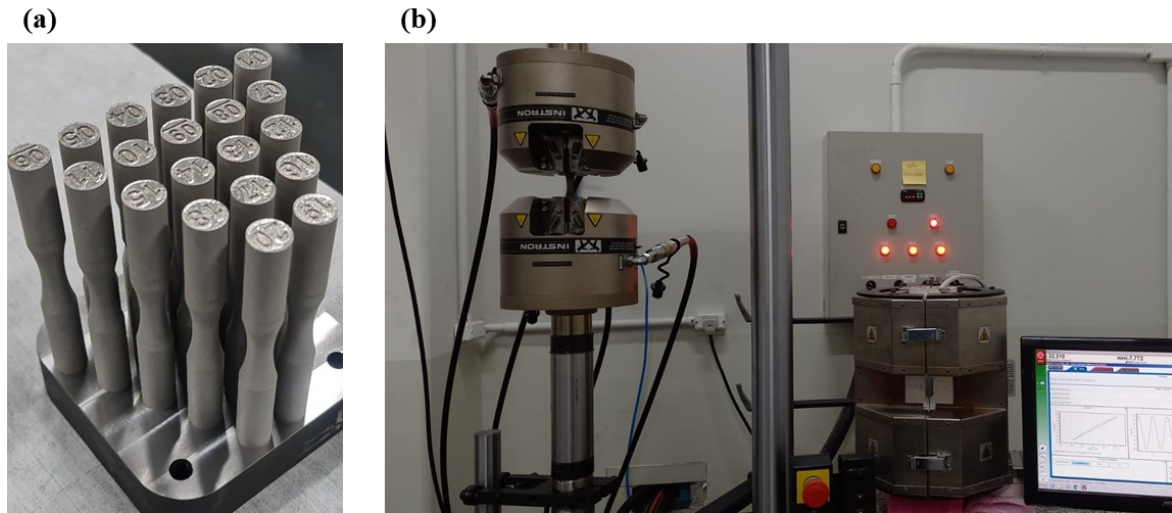


Fonte: Autor (2025).

### 3.1.7 Curva tensão ( $S$ ) – número de ciclos ( $N$ ) do *SLM SS316L*

Com o objetivo de obter a curva tensão – número de ciclos ( $S$ - $N$ ) do aço inoxidável 316L produzido pelo método de SLM, corpos de prova foram impressos na mesma máquina de impressão dos protótipos de trocador de calor. Estes foram projetados seguindo a *ASTM E466-21 (Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials – Prática normatizada para conduzir testes de fadiga axial com amplitude constante em materiais metálicos)* para avaliação de fadiga uniaxial. No total, 20 corpos de prova (ver Fig. 27a) foram fabricados e testados em uma máquina de fadiga da *Instron* (ver Fig. 27b) com as tensões alternadas variando de 200 até 460 MPa.

Fig. 27 – (a) Corpos de prova fabricados com *SS SLM 316L*; (b) Experimentos de fadiga com controle de deformação



Fonte: Autor (2025).

Para testar as amostras foi utilizado a metodologia *Staircase*, onde os espécimes são experimentados até um alto número de ciclos,  $10^7$ . O primeiro é testado com uma carga e se o rompimento não ocorrer, o teste é parado em  $10^7$  ciclos, em seguida o segundo é testado em uma tensão maior. Em contrapartida, se o rompimento ocorrer, o próximo espécime é testado em uma tensão menor. Em resumo, um teste sem rompimento é seguido por um experimento com maior tensão. Como resultado os níveis de tensão utilizados ficam alternando abaixo e acima do limite de fadiga do material ( $N_{s,f}$ ) (ASTM-STP91A-EB, 1963). De acordo com Schijve (2014), o valor médio do limite em fadiga através do método *Staircase* é razoável se são usados entre 20 e 30 espécimes.

Para obter o limite de resistência a fadiga (*LRF*) foi utilizado o procedimento apresentado nas Eqs. (64), (65) e (66), considerando o fator de convergência (*C*) e o desvio padrão (*Dp*).

$$C = \frac{n \sum i^2 N_i - (\sum i N_i)^2}{n^2} \quad (64)$$

$$LRF = S_0 + d \left( \frac{\sum i N_i}{n} + b \right) \quad (65)$$

$$Dp = 1,62d(C + 0,029) \quad (66)$$

onde  $S_0$  é o menor nível de tensão,  $d$  o incremento/decréscimo de tensão,  $N_i$  o número de falhas ou vezes em que se atingiu 10 milhões (a menor ocorrência),  $i$  é 0 para a menor tensão e sucessivamente para os incrementos,  $n$  o número total de falhas ou vezes em que se atingiu 10 milhões (menor ocorrência) e  $b$  é  $\frac{1}{2}$  para 10 milhões e  $-1/2$  para falhas.

A partir da obtenção de uma curva  $S-N$  será possível analisar a fadiga de acordo com os níveis de tensão alternada, e obter um resultado mais preciso para a vida em fadiga de amostras produzidas por *SLM*. Com a utilização das curvas  $S-N$  será avaliado o número de ciclos que o protótipo de trocador de calor produzido por *SLM* será capaz de resistir devido a tensão alternada.

### 3.2 DESEMPENHO TERMO HIDRÁULICO

Em termos de avaliação termo hidráulica será investigado uma geometria de canais de trocadores de calor que só é possível fabricar utilizando a técnica de manufatura aditiva. Um núcleo de trocador de calor compacto foi projetado com micro canais de seção transversal circunferencial com 2 mm de diâmetro. Como a grande vantagem da manufatura aditiva é possibilitar a fabricação de geometrias complexas, que outros processos não conseguem, decidiu-se por produzir um núcleo com canais de caminhos complexos, visto que estes apresentam melhor desempenho térmico (ver seção 2.5.2.1).

#### 3.2.1 Núcleo com canais complexos fabricado por *SLM*

A utilização de mini canais em trocadores de calor é uma das maneiras de melhorar o desempenho térmico, uma vez que aumenta a área de transferência de calor, apesar de também aumentar a perda de carga. Outra maneira de aumentar o desempenho térmico é utilizar canais de caminhos não retos, tais como canais zigzag, aerofólio ou complexo. A maioria dos estudos da literatura tratam de canais em zigzag (ver artigos de Baik et al (2017), Saeed et al. (2020), Meshram et al. (2016), Ngo et al. (2007) e Katz et al. (2021)), devido a facilidade de fabricação, mas não abordam canais complexos ou de caminhos tridimensionais, uma vez que até poucos anos atrás estes não eram factíveis.

No estudo de Castelain et al. (2016), o canal tipo *V-shaped* apresentou a melhor relação entre taxa de transferência de calor e perda de carga. Este canal, apresentado na Fig. 5, foi

utilizado como base para confecção do núcleo com canais complexos. A ideia foi de diminuir o número de cantos vivos em relação ao canal retangular, para minimizar fatores como concentradores de tensão e incrustação, e utilizar um canal de seção transversal circular, ver Fig. 28.

Os canais complexos fazem com que o fluido suba enquanto é deslocado para esquerda, percorra um caminho reto, e depois desça enquanto é deslocado para a direita, retornando a mesma linha inicial, semelhante ao canal *V-shape* proposto por Castelain et al. (2016), Em cada uma destas elevações há um canal reto e ortogonal passando do outro ramal, ver Fig. 28.

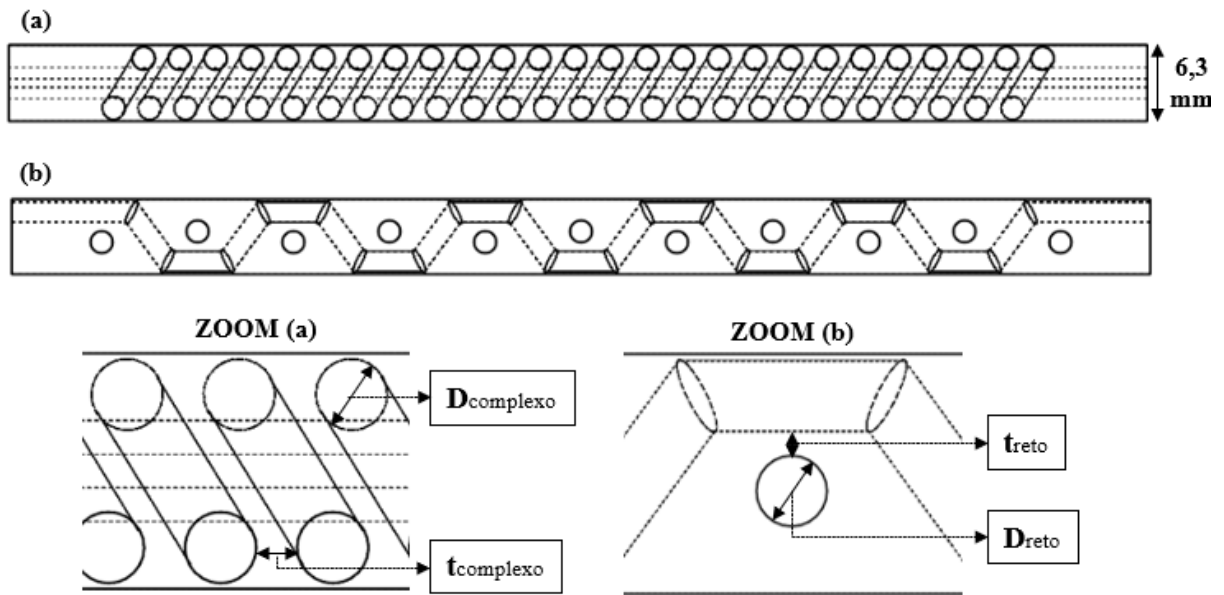
Fig. 28 – Arranjo de um trocador com canais complexos tridimensionais e retos



Fonte: Autor (2025).

Tendo em vista as limitações que o processo de manufatura aditiva possui (como a retirada do pó não fundido do interior dos canais), decidiu-se por usar uma concepção de núcleo por empilhamento de camadas. A Fig. 29 apresenta a camada de repetição do núcleo. Neste caso, tem-se um ramal com canais retos e outro com canais complexos. O ramal complexo possui um total de 26 canais e o reto um total de 11 canais, ambos produzidos com canais de seção transversal circular de 2mm de diâmetro. Assim, o ramal complexo possui uma área de transferência de calor superior ao outro ramal. Essa concepção é interessante para trocadores que operam com líquidos e gases, visto que o calor específico do primeiro é consideravelmente superior ao do segundo.

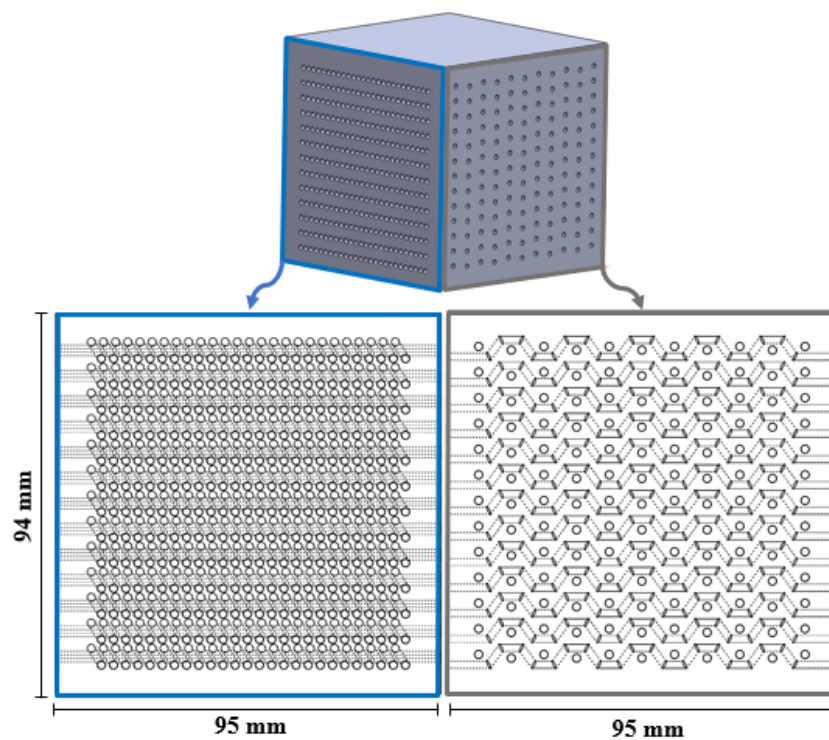
Fig. 29 – Representação frontal (a) e lateral (b) da lâmina contendo ambos os ramais



Fonte: Autor (2025).

A representação completa do núcleo é apresentada na Fig. 30, considerando 13 camadas empilhadas. O ramal complexo possui um total de 338 canais e o reto um total de 143 canais.

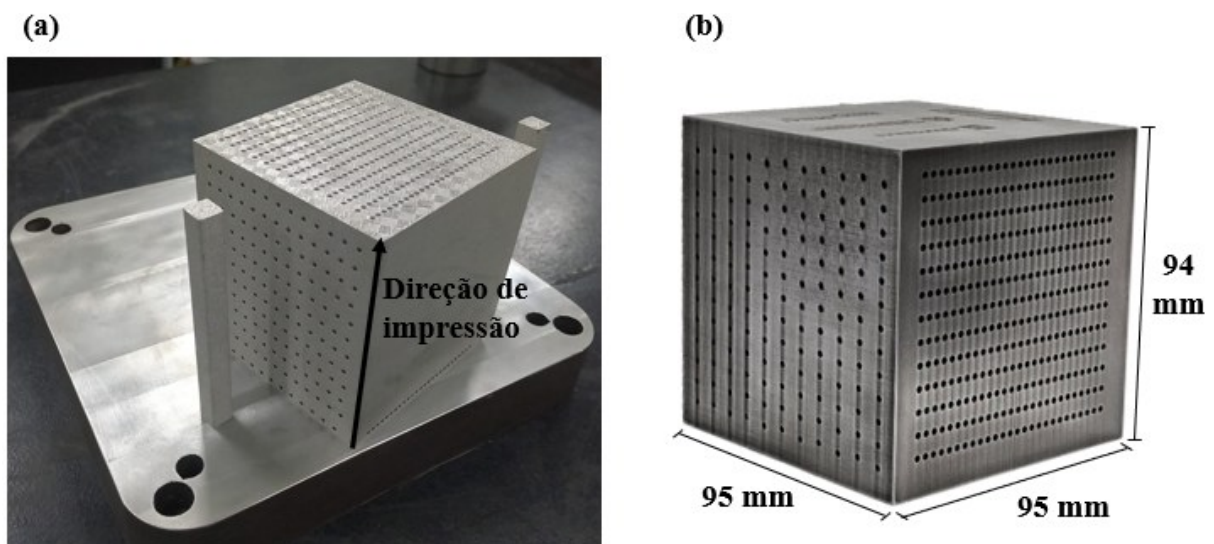
Fig. 30 – Representação isométrica do núcleo completo com enfoque na face frontal e lateral



Fonte: Autor (2025).

O núcleo foi produzido pelo processo de impressão 3D utilizando a máquina *LaserCUSING M2 SLM lab*. Na Fig. 31a é apresentado o núcleo após a fabricação e antes do tratamento térmico de alívio de tensões residuais, ainda preso a plataforma de construção. Salienta-se que a direção de impressão é aquela apresentada na Fig. 31a, onde os canais retos são impressos horizontalmente à plataforma enquanto os canais complexos na vertical. A Fig. 31b mostra o protótipo após o tratamento térmico. O núcleo apresenta um arranjo de escoamento cruzado e as dimensões relevantes do núcleo são apresentadas na Tabela 14. O tratamento de alívio de tensões obedece a curva de temperatura em função do tempo apresentada no **Apêndice E**.

Fig. 31 – Núcleo com canais tridimensionais impresso via *SLM*: (a) como fabricado; (b) após tratamento térmico



Fonte: Autor (2025).

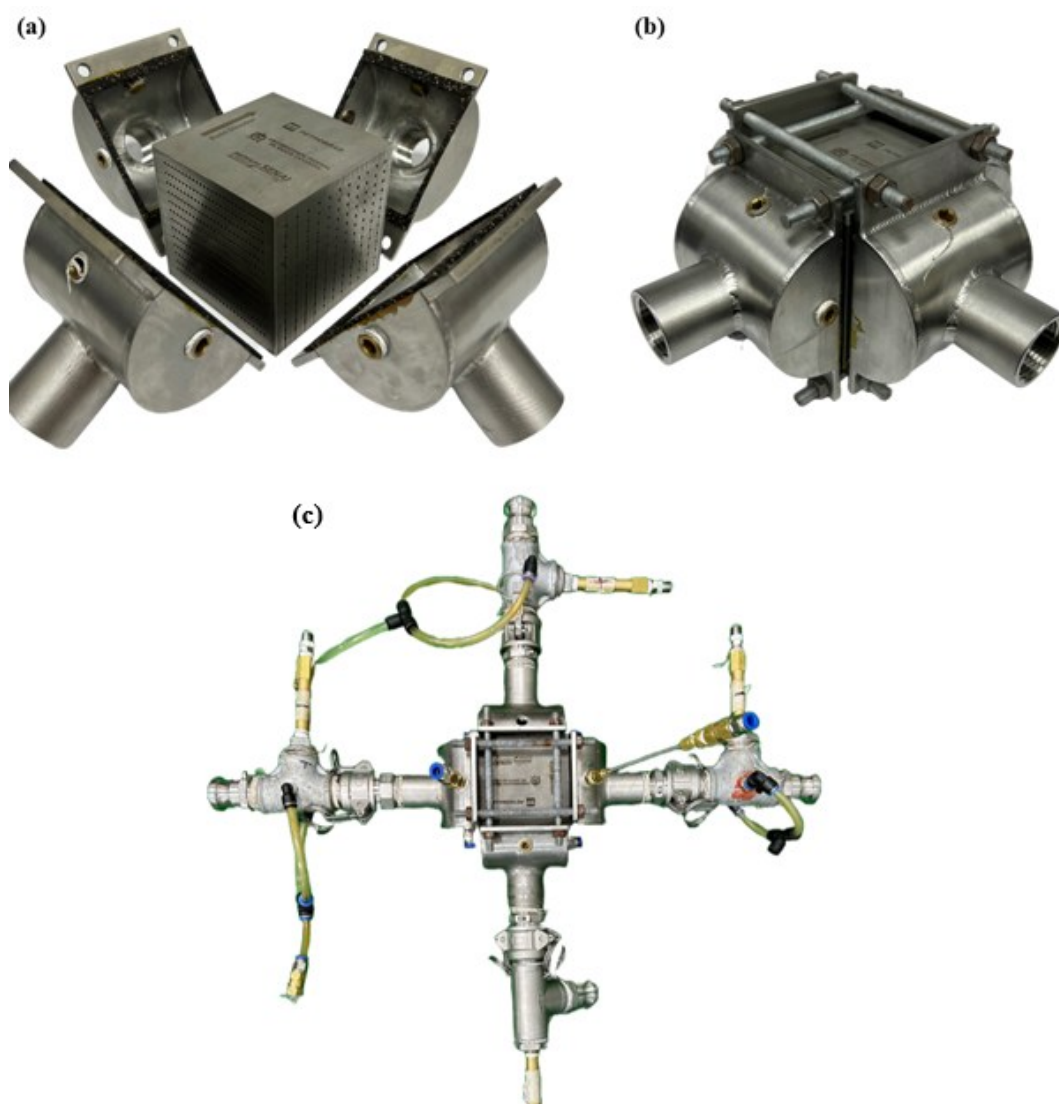
Tabela 14 – Características geométricas do núcleo

| Arranjo                                                        | Cruzado     |
|----------------------------------------------------------------|-------------|
| Diâmetro dos canais [mm]                                       | 2           |
| Espessura da parede entre canais complexos [mm]                | 1           |
| Espessura mínima de parede entre canais complexos e retos [mm] | 0,5         |
| Altura da camada [mm]                                          | 6,3         |
| Largura do núcleo [mm]                                         | 95          |
| Comprimento do núcleo [mm]                                     | 95          |
| Altura do núcleo [mm]                                          | 94          |
| Número de canais complexos                                     | 338         |
| Número de canais retos                                         | 143         |
| Área de transferência do ramal complexo [m <sup>2</sup> ]      | 0,2478622   |
| Área de transferência do ramal reto [m <sup>2</sup> ]          | 0,0793418   |
| Área de escoamento livre do ramal complexo [m <sup>2</sup> ]   | 0,000967950 |
| Área de escoamento livre do ramal reto [m <sup>2</sup> ]       | 0,000388357 |

Fonte: Autor (2025).

O intuito foi projetar um núcleo que conta com canais ao longo de toda a face e por este motivo foram projetados bocais com tirantes, que não obstruam nenhum canal. Na Fig. 32a pode ser observado o núcleo e os 4 bocais fabricados não fixados, enquanto na Fig. 32b pode ser visto o núcleo com bocais posicionados. Após a fixação dos bocais foram realizados testes de vazamento, e nenhum foi detectado. Na Fig. 32c é apresentado o núcleo já preparado para os experimentos, com as conexões rápidas de 1" e sensores de temperatura.

Fig. 32 – Preparação do núcleo para os experimentos: (a) bocais abertos; (b) bocais fixados e (c) instrumentado com RTDs



Fonte: Autor (2025).

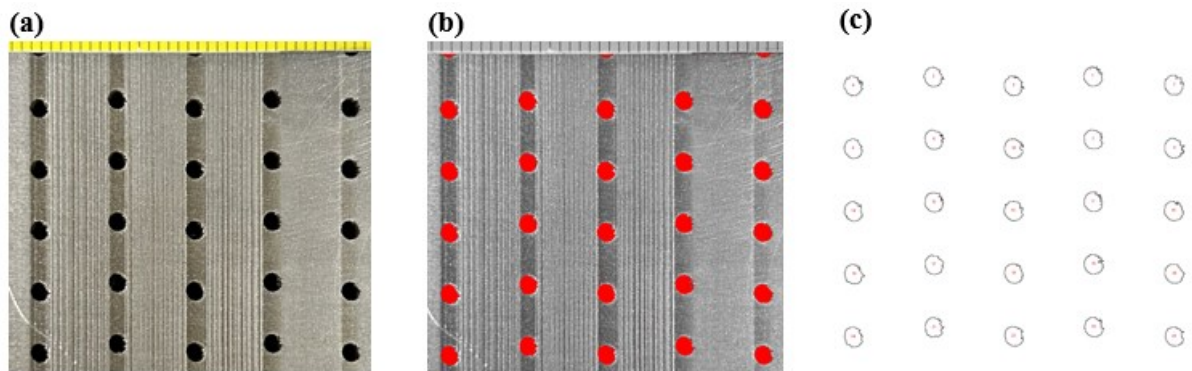
### 3.2.1.1 Correção do diâmetro dos canais

Sabe-se que a manufatura aditiva apresenta limitações geométricas na impressão de mini canais, tal como a circunferência do canal e o diâmetro do mesmo, ver Fig. 7. O diâmetro do canal foi avaliado através de um tratamento de imagem. Foram tiradas 4 fotos da face de entrada do ramal complexo e do ramal reto, de modo a registrar toda a face do protótipo. No **Apêndice F** são apresentadas estas respectivas fotos, destacando as regiões de interesse e os canais selecionados para análise.

Usando o programa *ImageJ* foram selecionados 20 canais mais centrais da imagem para análise. Todas as imagens possuem uma medição para definir a escala. O primeiro passo

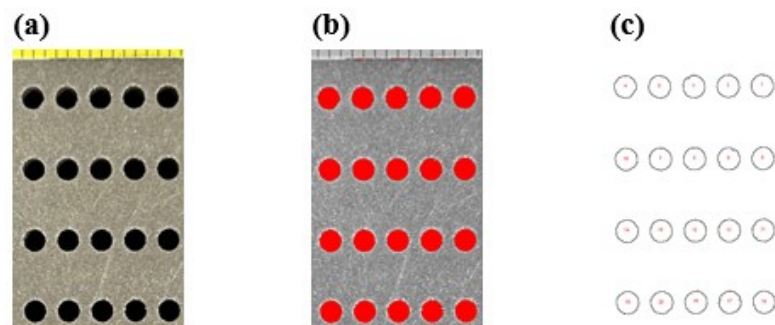
é alterar o formato da imagem para 32 bits. Através dessa aproximação a imagem é ajustada e a sombra dos canais preenchida na coloração vermelha. Por fim, a diferença entre cores significa a fronteira do que é vazado (canal) e o que é sólido, possibilitando a criação de contornos e medição de suas respectivas áreas. Neste ponto, o diâmetro corrigido é calculado baseado na área medida. Foi assumida uma circunferência perfeita para esta equivalência. Por fim é feito a média do diâmetro dos 80 canais analisados. O procedimento é exemplificado na sequência de imagem apresentada na Fig. 33 e Fig. 34 para os canais retos e complexos, respectivamente.

Fig. 33 – Tratamento de imagem para os canais retos.



Fonte: Autor (2025).

Fig. 34 – Tratamento de imagem para os canais complexos.



Fonte: Autor (2025).

### 3.2.1.2 Rugosidade dos canais

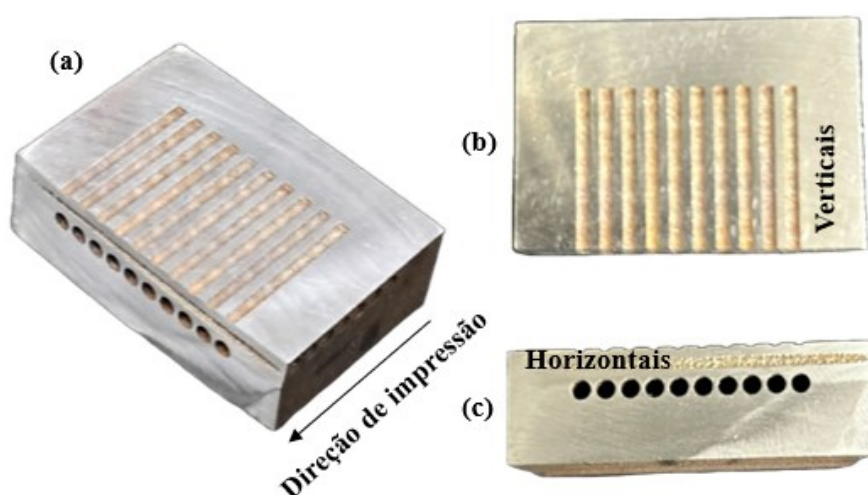
Destaca-se que os canais do trocador de calor apresentam alta rugosidade, como pode ser observado nos trabalhos de Zhao et al. (2024), Hao et al. (2023) e Nandhakumar e Venkatesan (2023). Essa rugosidade é extremamente relevante para o comportamento termo hidráulico, podendo aumentar a taxa de transferência e a perda de carga ao longo do canal.

Entretanto, não é possível realizar a medição da rugosidade do interior do canal do núcleo produzido.

Em razão disso, utilizou-se o protótipo empregado no estudo de Zilio et al. (2022) (ver Fig. 35) para realizar a medição da rugosidade. Foi realizado o corte desta amostra, de modo que meia circunferência ficasse aparente e consequentemente fosse possível medir a rugosidade no canal. Esse protótipo foi impresso na mesma máquina que o núcleo, e com os mesmos parâmetros de impressão. Conforme apresentado anteriormente, a rugosidade do canal é função, principalmente, da direção de impressão. Superfícies impressas na vertical possuem uma rugosidade menor que os impressos na horizontal, ver trabalho de Nandhakumar e Venkatesan (2023).

Para medição da rugosidade foi utilizado um rugosímetro *Mitutoyo SJ-210*. Foram avaliados 2 canais horizontais e 2 canais verticais e realizadas 3 medições em cada.

Fig. 35 – Protótipo utilizado para medição de rugosidade dos canais



Fonte: Autor (2025).

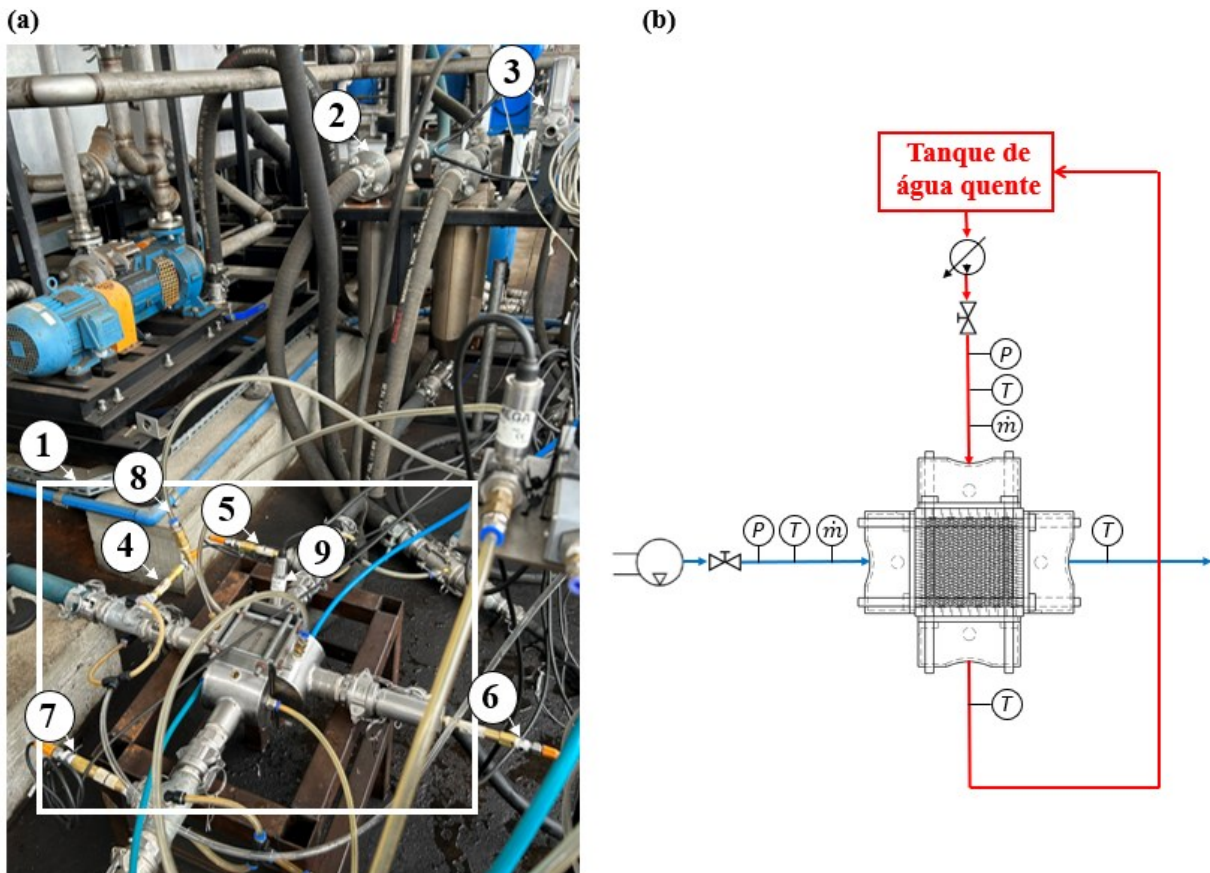
### 3.2.2 Bancadas experimentais para avaliação termo hidráulica

No total foram montadas três bancadas experimentais para realização de experimentos termo hidráulicos no núcleo de trocador complexo. Duas dessas são para avaliação térmica com configuração de fluido água – ar e água – água e outra para avaliação hidrodinâmica do ramal complexo e reto com água e ar.

#### 3.2.2.1 Térmica: água – ar

A bancada experimental para experimentos térmicos com água – ar, ver Fig. 36a, conta com uma bomba de água conectada a um tanque aquecido e um compressor de ar. A seção de teste, em (1), é composta pelo trocador aparelhado com sensores de temperatura e pressão. Ainda, dois medidores de vazão Coriolis são utilizados, um para água (2) medindo vazão mássica do ramal quente ( $\dot{m}_h$ ) e outro para o ar (3) medindo vazão mássica do ramal frio ( $\dot{m}_c$ ). Os sensores de temperatura são apontados em (4), (5), (6) e (7) e os de pressão em (8) e (9). A Fig. 36b apresenta o esquemático da bancada utilizada e os pontos de medição.

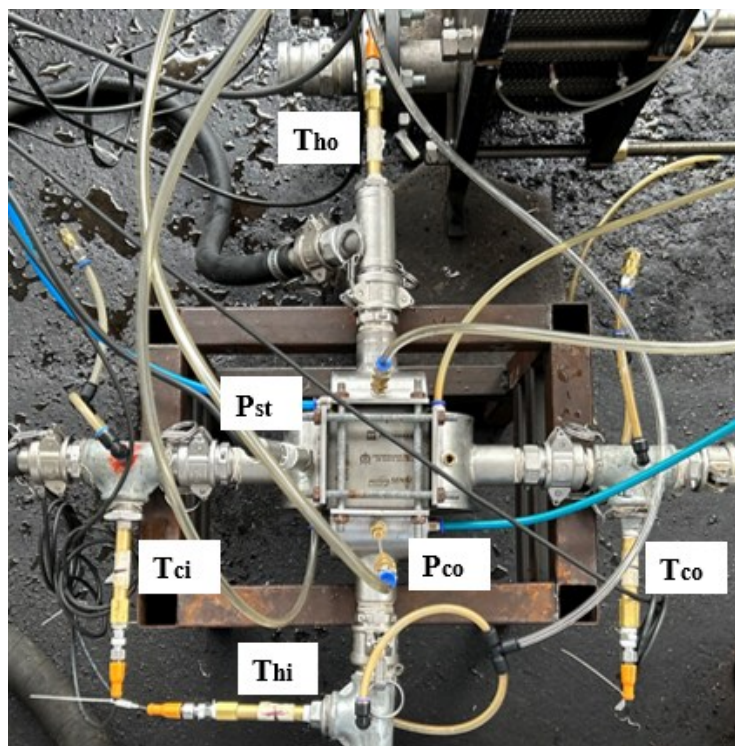
Fig. 36 – Bancada experimental térmica para água – ar: (a) fotografia; (b) esquemático



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 37 apresenta o trocador de calor e os sensores responsáveis por medir a: temperatura de entrada da água quente ( $T_{hi}$ ), temperatura de saída da água quente ( $T_{ho}$ ), temperatura de entrada do ar ( $T_{ci}$ ), temperatura de saída do ar ( $T_{co}$ ), pressão de entrada do ramal complexo ( $P_{co}$ ) e pressão de entrada do ramal reto ( $P_{st}$ ).

Fig. 37 – Parâmetros de temperatura e pressão medidos e identificados no trocador de calor



Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 15 são apresentadas as especificações dos sensores utilizados, assim como os limites de operação e as incertezas de medição. As incertezas combinadas são apresentadas no **Apêndice G**.

Tabela 15 – Sensores utilizados na bancada água – ar

| Nº Item    | Instrumentos                     | Modelo                          | Limite de operação | Incerteza                                   |
|------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------------------|
| 2          | Medidor de vazão Coriolis        | <i>EMERSON Coriolis CMF200M</i> | 24,2 kg/s          | 0,05% MR                                    |
| 3          | Medidor de vazão Coriolis        | <i>OMEGA FMC-5501GA</i>         | 2,22 kg/s          | 0,5% MR                                     |
| 4, 5, 6, 7 | Medidor de temperatura RTD PT100 | <i>OMEGA PT100 PR-21d</i>       | 250°C              | $\pm (0,15 + 0,002 \cdot T) ^\circ\text{C}$ |
| 8, 9       | Transdutor de pressão absoluta   | <i>OMEGA PX409-250GI</i>        | 250 psi (17,2 bar) | 0,08% FS                                    |

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.2.1.1 Procedimento experimental

Para a avaliação do núcleo na bancada água – ar, o ramal contendo canais complexos foi avaliado com escoamento de água e de ar, assim como o ramal de canais retos. O

experimento consistia no escoamento da água quente com vazão mássica fixa ( $\dot{m}_h$ ) na temperatura de teste. Em seguida, após todo o sistema estar aquecido, o compressor de ar era ligado e o ar comprimido começava a escoar à temperatura ambiente para o interior do núcleo. A vazão mássica da água foi a mesma para todos os testes, escoando no regime turbulento. Os testes foram realizados de modo a avaliar a transferência de calor para diferentes vazões do ar.

A vazão do ar foi variada em intervalos de 0,005 kg/s, entre vazões de 0,01 kg/s até 0,055 kg/s. Após o experimento ter atingido o regime permanente, os dados eram coletados durante 50 segundos, com uma taxa de aquisição de 10 dados por segundo. Em seguida, um novo teste era realizado com uma nova vazão de ar.

Os experimentos com água quente no ramal complexo e ar no ramal reto serão designados *wc – as*, e os experimentos com água no ramal reto e ar no ramal complexo, *ws – ac*. A Tabela 16 resume as temperaturas e vazões utilizadas nos experimentos, fazendo uma separação entre os dois conjuntos de testes que foram executados. No total, 68 experimentos foram realizados.

Tabela 16 – Planejamento de experimentos para a configuração água – ar

| <b><i>wc – as</i>: Canais complexos: água - Canais retos: ar</b> |                    |                 |                    | <b><i>ws – ac</i>: Canais complexos: ar - Canais retos: água</b> |                    |                 |                    |
|------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| <i>Thi</i> [°C]                                                  | $\dot{m}_h$ [kg/s] | <i>Tci</i> [°C] | $\dot{m}_c$ [kg/s] | <i>Thi</i> [°C]                                                  | $\dot{m}_h$ [kg/s] | <i>Tci</i> [°C] | $\dot{m}_c$ [kg/s] |
| 40                                                               | 0,7                | 22              | 0,010              | 40                                                               | 0,7                | 22              | 0,010              |
| 50                                                               |                    |                 | 0,015              | 45                                                               |                    |                 | 0,015              |
|                                                                  |                    |                 | 0,020              | 50                                                               |                    |                 | 0,020              |
|                                                                  |                    |                 | 0,025              | 55                                                               |                    |                 | 0,025              |
|                                                                  |                    |                 | 0,030              | 60                                                               |                    |                 | 0,030              |
|                                                                  |                    |                 | 0,035              |                                                                  |                    |                 | 0,035              |
|                                                                  |                    |                 | 0,040              |                                                                  |                    |                 | 0,040              |
|                                                                  |                    |                 | 0,045              |                                                                  |                    |                 | 0,045              |
|                                                                  |                    |                 | 0,050              |                                                                  |                    |                 | 0,050              |
|                                                                  |                    |                 |                    |                                                                  |                    |                 | 0,055              |

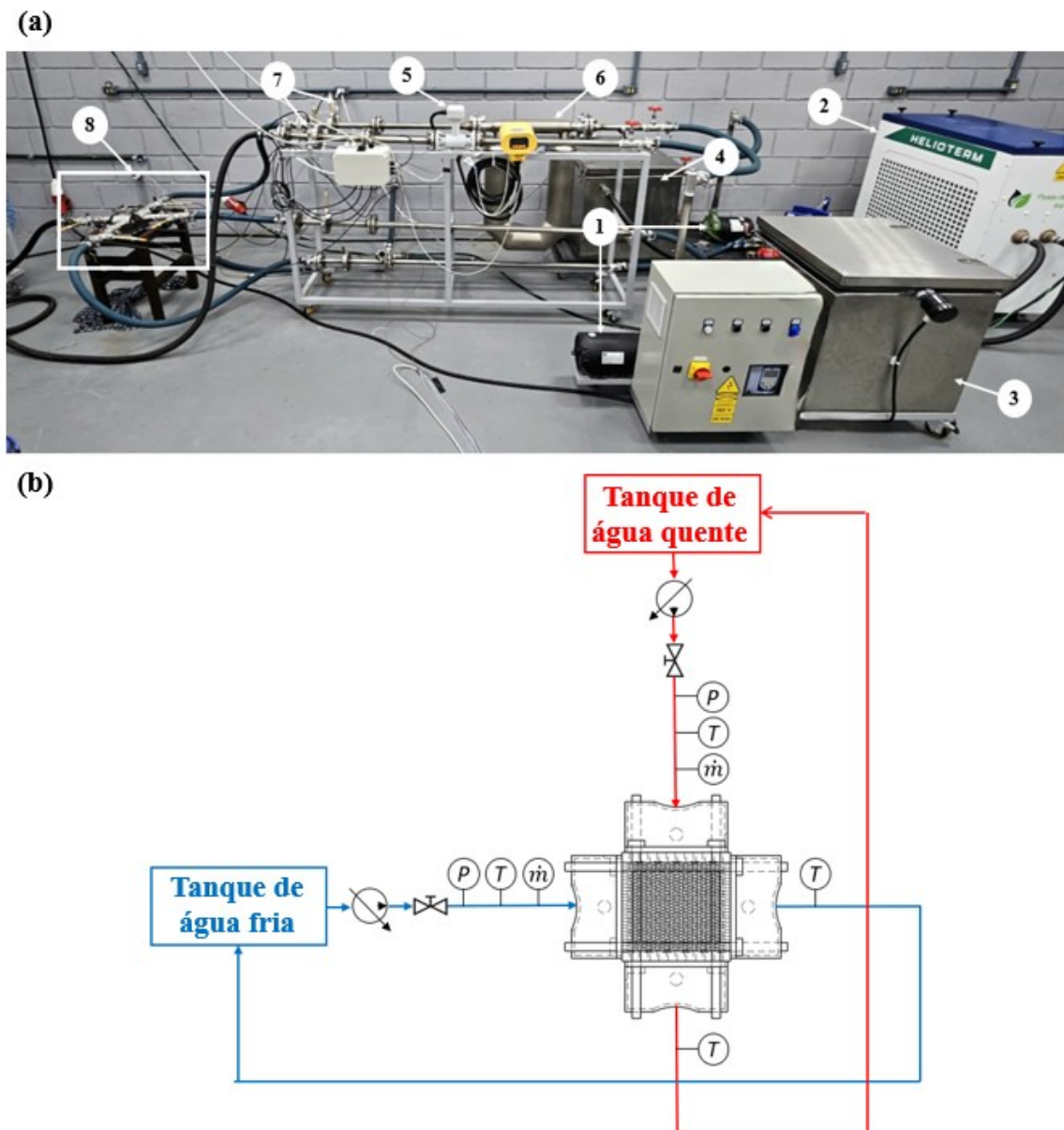
Fonte: Autor (2025).

### 3.2.2.2 Térmica: água – água

Uma segunda bancada de testes térmicos foi projetada e montada no laboratório *Thermal Fluid Flow - T2F*, para operar com água quente e fria. A Fig. 38a apresenta a bancada com o núcleo instalado e a Fig. 38b o esquemático. A bancada é composta por duas bombas hidráulicas de 1 cv (1), um *chiller* (2), um reservatório com resistências para o aquecimento da

água (3), um tanque de água fria (4), um medidor de vazão eletromagnético para água fria (5), um medidor de vazão mássica Coriolis para água quente (6), dois transdutores de pressão absolutos (7) e a seção de testes contendo o trocador de calor e sensores de temperatura RTDs (8). O sistema de aquisição de dados é da fabricante *National Instruments* e contém módulos de leitura de corrente (NI – 9203) e RTDs (NI – 9216).

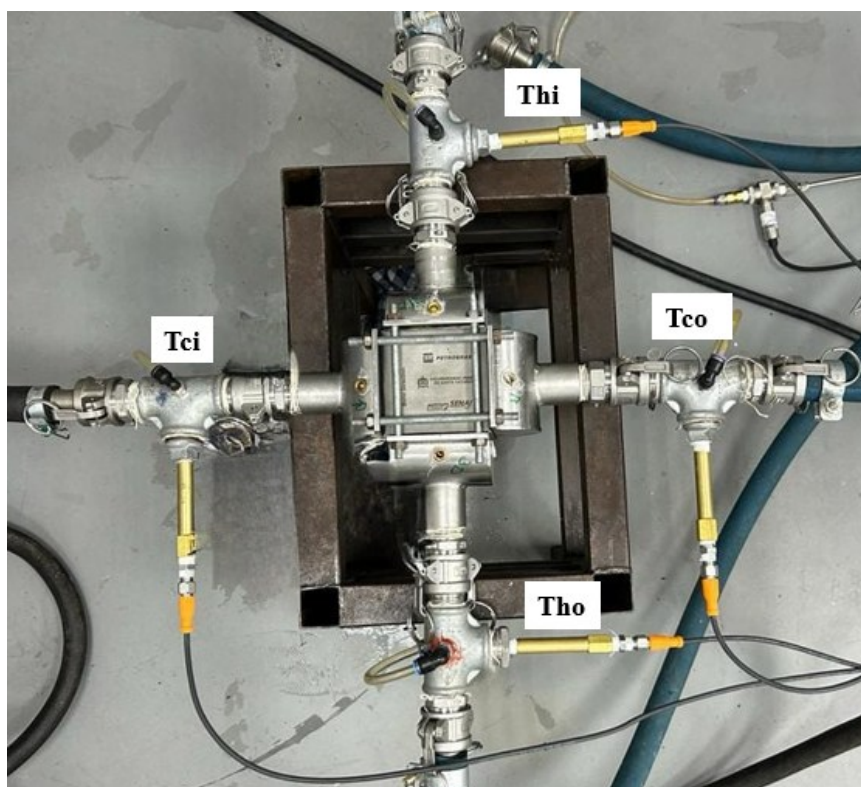
Fig. 38 – Bancada experimental térmica para água – água: (a) fotografia; (b) esquemático



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 39, apresenta a seção de teste, em que é possível visualizar o trocador de calor instalado, os bocais e os sensores de temperatura *RTDs* instalados próximos do bocal.

Fig. 39 – Seção de teste contendo trocador e transdutores de temperatura



Fonte: Autor (2025).

Dessa maneira, foi possível medir os seguintes parâmetros: Pressão de entrada dos dois ramais ( $P_h$  e  $P_c$ ), e temperaturas de entrada e saída dos ramais quente e frio ( $T_{hi}$ ,  $T_{ci}$ ,  $T_{ho}$  e  $T_{co}$ ), além da vazão mássica do ramal quente ( $\dot{m}_h$ ) e vazão mássica do ramal frio ( $\dot{m}_c$ ). A Tabela 17 apresenta os modelos dos sensores, seus limites de operação e incerteza.

Tabela 17 – Especificação dos sensores e suas respectivas incertezas de medição

| Nº Item | Instrumentos                     | Modelo                          | Limite de operação | Incerteza                                       |
|---------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|
| 5       | Medidor de vazão eletromagnético | <b>OMEGA</b> FMG603-R           | 79 GPM (3,59 kg/s) | 0,5 (%MR)                                       |
| 6       | Medidor de vazão Coriolis        | <b>EMERSON</b> Coriolis CMF200M | 24,2 kg/s          | 0,05 (%MR)                                      |
| 7       | Transdutor de pressão absoluta   | <b>OMEGA</b> PX409-100GI        | 100 psi (6,9 bar)  | 0,08 (%FS)                                      |
| 8       | Medidor de temperatura RTD PT100 | <b>OMEGA</b> PT100 PR-21d       | 250°C              | $\pm (0,15 + 0,002 \cdot T) [^{\circ}\text{C}]$ |

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.2.2.1 Procedimento experimental

O objetivo principal dos experimentos água – água é avaliar o desempenho do ramal com canais tridimensionais. Dessa forma, o ramal complexo foi avaliado com água quente e fria e nele foi realizado a maior variação de vazão.

O procedimento experimental foi realizado conforme as seguintes etapas:

1. Definição da temperatura do fluido frio;
2. Definição da temperatura do fluido quente;
3. Definição do número de Reynolds  $\left(\frac{\rho V D}{\mu}\right)$ , com base na vazão do ramal com canais retos;
4. Varredura de uma ampla faixa de números de Reynolds no ramal de canais complexos;

Água fria e quente foi bombeada através do trocador nas temperaturas definidas com a vazão do ramal reto sendo mantida fixa. Uma vez que as leituras de temperatura não apresentaram variações significativas (menor que  $0,1^{\circ}\text{C}$ ), indicando que o sistema atingiu o regime permanente, os dados eram coletados por 50 segundos, com 10 leituras por segundo. Em seguida, a vazão de água no ramal complexo era alterada, esperava-se atingir o regime permanente, e novamente os dados eram coletados. Uma vez que todo o intervalo do número de *Reynolds* do ramal complexo foi varrido, a vazão do ramal reto (etapa 3) era alterada e a varredura da vazão do complexo era repetida. Quando todas as vazões do ramal reto foram avaliadas, a temperatura do fluido quente era alterada e o procedimento repetido até que todas as temperaturas fossem consideradas. Este procedimento foi realizado com água quente e fria no ramal complexo e consequentemente quente e fria no ramal reto.

Na Tabela 18 é apresentada a matriz de experimentos, descrevendo as temperaturas e intervalos de *Re* em que o trocador foi avaliado. Foi definido uma simbologia para melhor detalhar os experimentos nos apêndices. Os termos *hw* e *cw* significam água quente e água fria, respectivamente, enquanto *c* e *s* remetem a ramal complexo e reto. No total, 356 experimentos foram realizados.

Tabela 18 – Planejamento de experimentos alternando o ramal quente e frio

| <b><i>hwc-cws</i></b> : Canais complexos: quente - Canais retos: frio |                              |                              |                              | <b><i>cwc-hws</i></b> : Canais complexos: frio - Canais retos: quente |                              |                              |                              |
|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b><math>T_h</math> [°C]</b>                                          | <b><math>Re_h</math> [-]</b> | <b><math>T_c</math> [°C]</b> | <b><math>Re_c</math> [-]</b> | <b><math>T_c</math> [°C]</b>                                          | <b><math>Re_c</math> [-]</b> | <b><math>T_h</math> [°C]</b> | <b><math>Re_h</math> [-]</b> |
| 40                                                                    | 1800                         | 18                           | 1400                         | 20                                                                    | 550                          | 30                           | 4600                         |
| 50                                                                    | 2000                         |                              | 1700                         |                                                                       | 800                          | 35                           | 7000                         |
| 60                                                                    | 2200                         |                              | 2000                         |                                                                       | 1100                         | 40                           | 9200                         |
|                                                                       | 2500                         |                              | 2300                         |                                                                       | 1400                         | 45                           | 11500                        |
|                                                                       | 3300                         |                              |                              |                                                                       | 1700                         | 50                           |                              |
|                                                                       | 3800                         |                              |                              |                                                                       | 1900                         |                              |                              |
|                                                                       | 4400                         |                              |                              |                                                                       | 2200                         |                              |                              |
|                                                                       | 4900                         |                              |                              |                                                                       | 2500                         |                              |                              |
|                                                                       | 5500                         |                              |                              |                                                                       | 2800                         |                              |                              |
|                                                                       | 6000                         |                              |                              |                                                                       | 3000                         |                              |                              |
|                                                                       | 6500                         |                              |                              |                                                                       |                              |                              |                              |
|                                                                       | 7100                         |                              |                              |                                                                       |                              |                              |                              |
|                                                                       | 7700                         |                              |                              |                                                                       |                              |                              |                              |

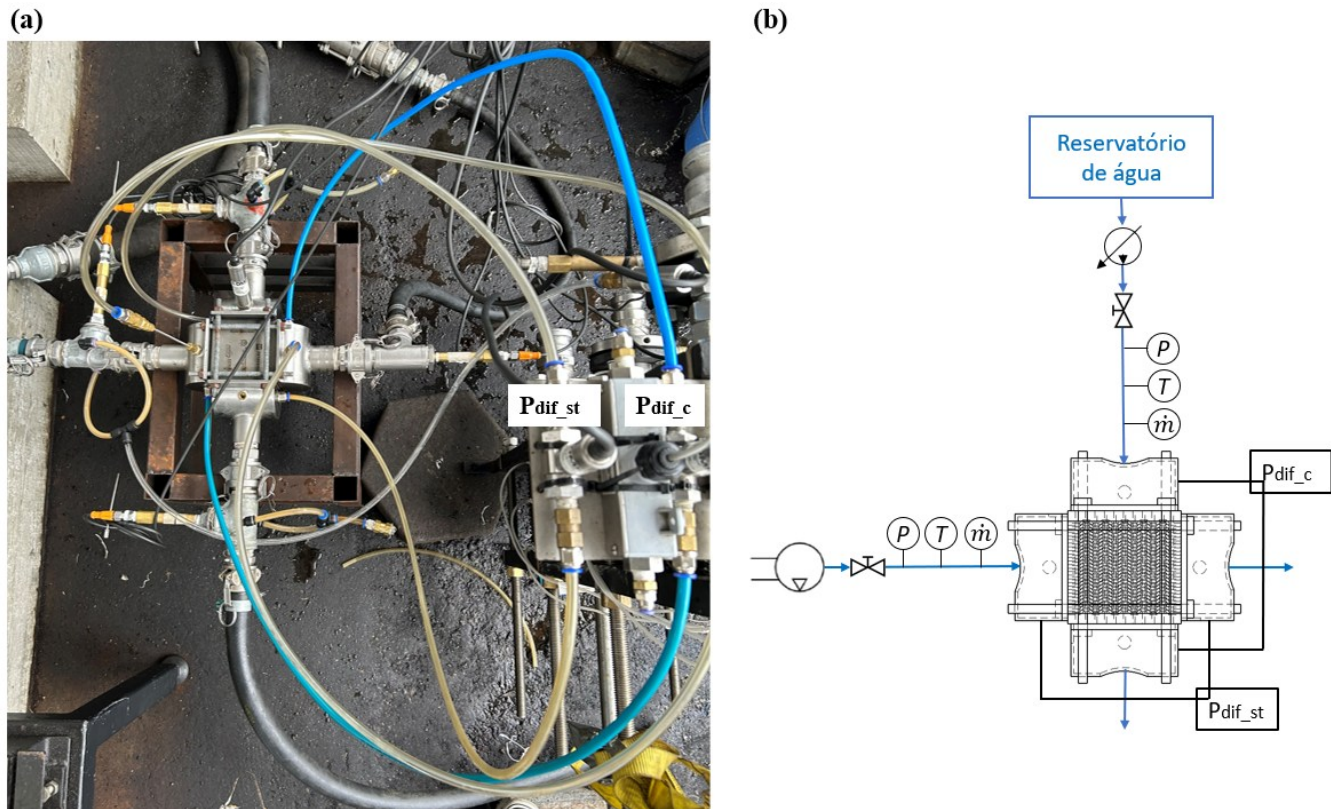
Fonte: Autor (2025).

Os testes realizados para  $T_h = 50^\circ\text{C}$  na configuração água fria no ramal complexo e quente no ramal reto, atingiu os limites de operação da bancada em termos de taxa de transferência, e por isso foram realizados apenas 18 testes nessa configuração. Não foi possível realizar testes com  $Re_h$  de 9200 e 11500.

### 3.2.2.3 Hidrodinâmica: água – ar

A bancada, Fig. 40, conta com dois medidores de vazão *Coriolis*, dois transdutores de pressão absolutos e diferenciais, além de sensores *RTDs* para medir a temperatura de entrada do fluido.

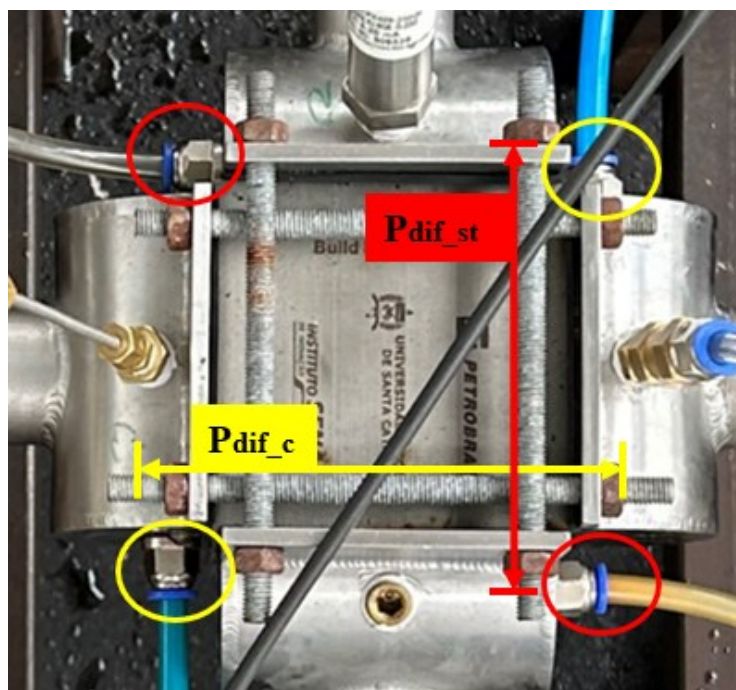
Fig. 40 – Bancada experimental hidrodinâmica: (a) trocador e sensores; (b) esquemático



Fonte: Autor (2025).

As tomadas de pressão foram realizadas dentro dos bocais de entrada e saída de cada ramal. Na Fig. 41 podem ser vistas as localizações das tomadas de pressão, nos bocais. Essa configuração permite medir a queda de pressão relacionada unicamente com o núcleo, tais como perdas de carga da entrada e saída do núcleo, atrito no interior do canal e alteração do momento, ver Eq. (49). As especificações dos sensores de pressão diferencial são apresentadas na Tabela 19.

Fig. 41 – Região do núcleo onde é medido a perda de carga com destaque para a localização das tomadas de pressão



Fonte: Autor (2025).

Tabela 19 – Especificações dos transdutores de pressão diferencial

| Nº Item         | Instrumentos                      | Modelo                     | Limite de operação | Incerteza |
|-----------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------|-----------|
| <b>P_dif_c</b>  | Transdutor diferencial de pressão | <b>OMEGA PX409-050DWUI</b> | 50 psi (3,4 bar)   | 0,08% FS  |
| <b>P_dif_st</b> | Transdutor diferencial de pressão | <b>OMEGA PX409-015DWUI</b> | 15 psi (1 bar)     | 0,08% FS  |

Fonte: Autor (2025).

#### 3.2.2.3.1 Procedimento experimental

O experimento hidrodinâmico consiste no escoamento de água ou ar através do núcleo e da medição da diferença de pressão entre a entrada e saída. Foram realizados 4 tipos de teste: água no ramal reto, ar no ramal reto, água no ramal complexo e ar no ramal complexo, todos escoando com o fluido na temperatura ambiente.

O teste consistia na passagem do fluido pelo ramal desejado, em que era medida a vazão, temperatura e queda de pressão. Após atingir o regime permanente, os dados eram coletados por 50 segundos. Em seguida, a vazão era aumentada, e os dados eram novamente coletados.

Os níveis de vazão do ar são definidos independentemente do ramal. Para a água, os níveis de vazão para cada ramal condizem com aqueles utilizados nos experimentos térmicos  $ac - ws$  e  $wc - as$ . Os níveis de vazão podem ser observados Tabela 20.

Tabela 20 – Níveis de vazão de água e ar utilizados nos experimentos hidrodinâmicos

| <i>Água – complexo</i> | <i>Ar – reto</i>      | <i>Ar – complexo</i>  | <i>Água – reto</i>    |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $\dot{m}_{wc}$ [kg/s]  | $\dot{m}_{as}$ [kg/s] | $\dot{m}_{ac}$ [kg/s] | $\dot{m}_{ws}$ [kg/s] |
| 0,180                  | 0,010                 | 0,010                 | 0,160                 |
| 0,300                  | 0,015                 | 0,015                 | 0,270                 |
| 0,450                  | 0,020                 | 0,020                 | 0,380                 |
| 0,600                  | 0,025                 | 0,025                 | 0,490                 |
| 0,730                  | 0,030                 | 0,030                 | 0,600                 |
| 0,870                  | 0,035                 | 0,035                 | 0,700                 |
| 1,000                  | 0,040                 | 0,040                 | 0,810                 |
| 1,150                  | 0,045                 | 0,045                 | 0,910                 |
| 1,250                  | 0,050                 | 0,050                 | 0,990                 |
|                        |                       | 0,055                 |                       |

Fonte: Autor (2025).

### 3.2.3 Modelo numérico – Núcleo

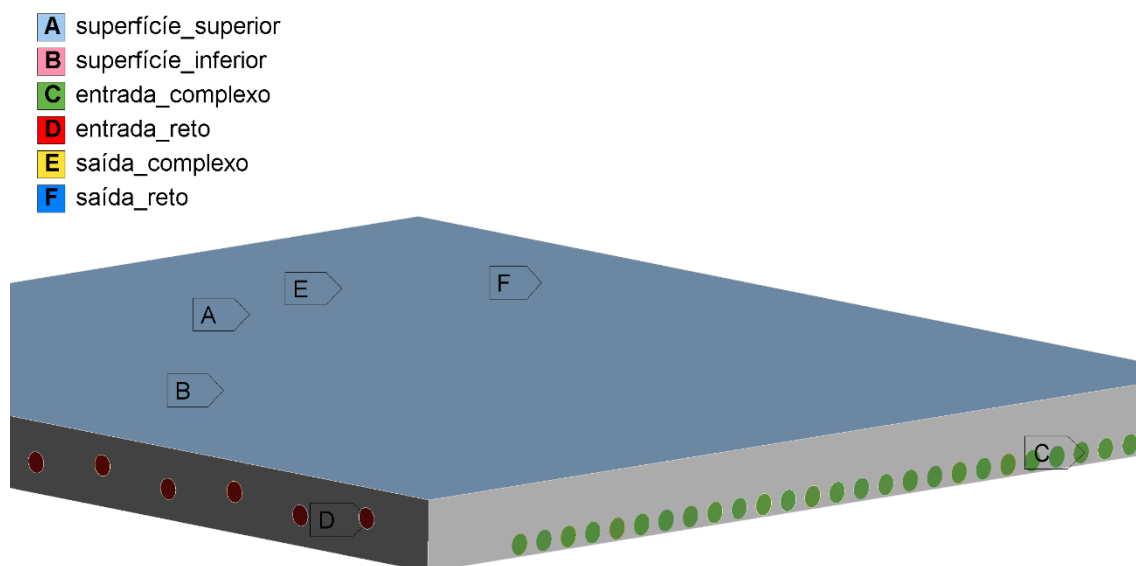
O núcleo apresentado na seção 3.2.1 foi também estudado numericamente por meio do software *Ansys Fluent*. Como não foi possível realizar a discretização do núcleo completo, devido as suas dimensões e o domínio computacional disponível, fora modelado apenas uma lâmina, apresentada na Fig. 29.

Sabe-se que uma lâmina não é suficiente para representar o núcleo como um todo, por isso foi empregada uma condição de contorno de periodicidade translacional nas faces superior e inferior da lâmina. Essa condição faz com que o campo de temperatura seja repetido de uma face para a outra. Para melhor exemplificação: a temperatura da face inferior será imitada na face superior, como se outra lâmina estivesse acima daquela simulada. Fazendo essa consideração, o modelo numérico representa o caso real do núcleo.

A Fig. 42 apresenta as condições de contorno utilizadas na lâmina. Em (A) e (B) podem ser visualizadas as faces superior e inferior, onde foram aplicadas as condições periódicas. Em (C) e (D) tem-se a condição de entrada do fluxo de massa uniforme para os canais complexos e retos, respectivamente. Em (E) e (F) as saídas, com condição de saída de pressão estática

uniforme. Os índices (B), (E) e (F) não são visíveis na Fig. 42, estando do lado oposto da lâmina mostrada.

Fig. 42 – Unidade repetitiva do núcleo complexo para simulação numérica



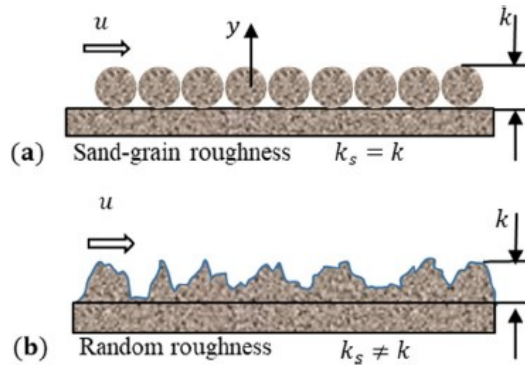
Fonte: Autor (2025).

A lâmina foi utilizada para simular todos os experimentos térmicos realizados, configurações água – ar e água – água. As propriedades da água foram avaliadas na temperatura média do escoamento enquanto o ar foi definido como fluido ideal.

Como mencionado anteriormente, a rugosidade foi medida ao longo dos canais de uma amostra representativa. Foi visualizado nesta amostra que a superfície não apresenta uma rugosidade uniforme. Kadivar et al. (2021) compilaram alguns trabalhos que calcularam a altura média de rugosidade quando essa não é regular com intenção de propor uma altura equivalente ( $k_s$ ). No presente trabalho foi utilizado a correlação desenvolvida por Botros (2016) – Eq. (67), para determinar a altura equivalente da rugosidade ( $k_s$ ) em função da medida experimental ( $R_q$ ) para considerar no modelo numérico.

No modelo numérico foi utilizado o modelo *grão de areia* (Fig. 43a) para avaliar a rugosidade, que é um modelo que simula uma rugosidade totalmente uniforme e periódica. O próprio software fornece uma constante de rugosidade, variando entre 0,5 e 1, para definir a regularidade da rugosidade. Como a altura da rugosidade já foi corrigida de acordo, utilizou-se essa constante em seu limite inferior, 0,5.

Fig. 43 – Equivalência entre altura de rugosidade para diferentes situações



Fonte: Adaptado de Kadivar et al. (2021).

$$k_s = 1,306R_q + 0,078R_q^2 \quad (67)$$

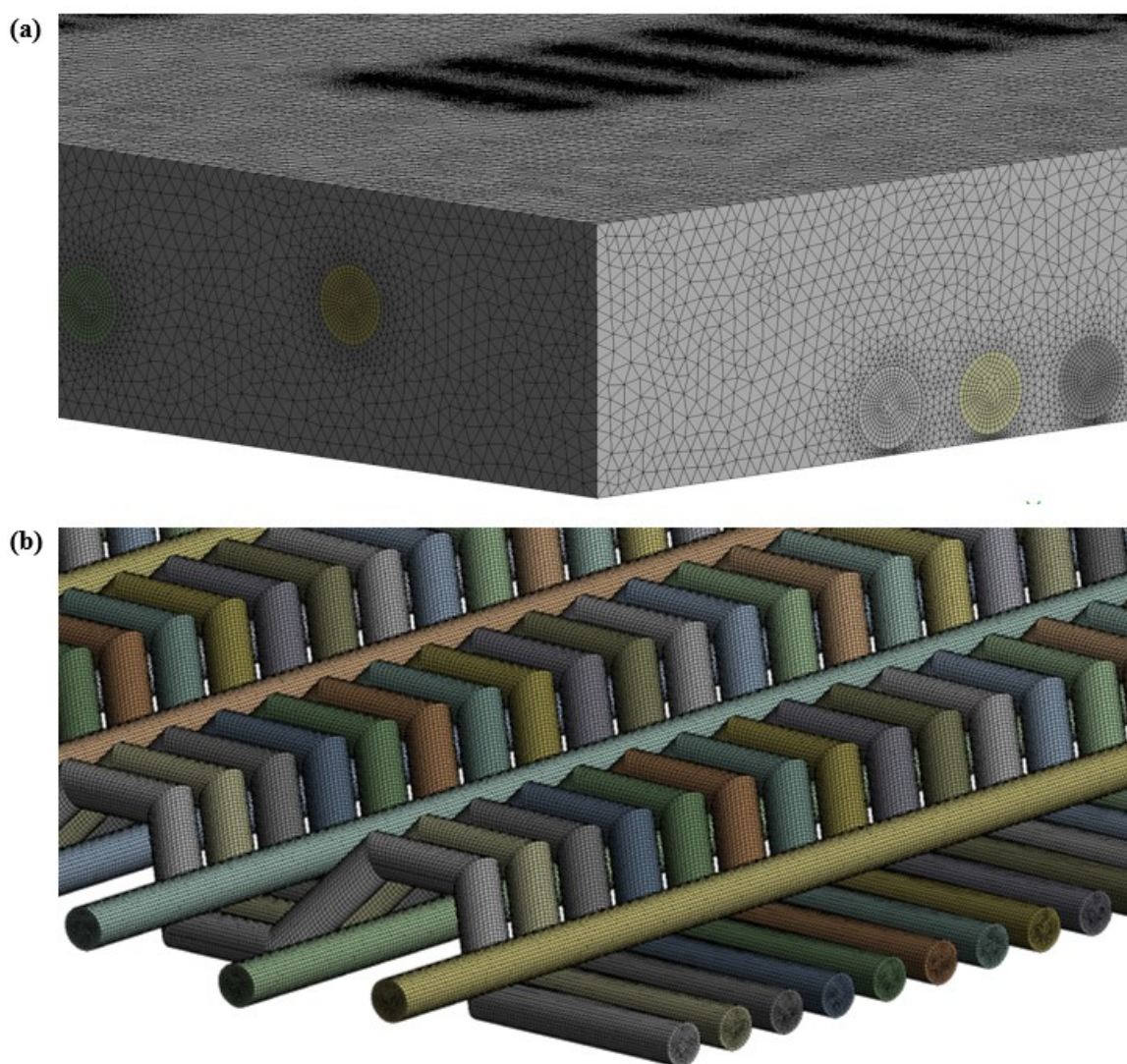
A geração da malha foi realizada no *Mesh*, do *Ansys Workbench 18*. O domínio foi dividido em três: fluido do canal reto, fluido do canal complexo e sólido. Por questões de similaridade, o mesmo tamanho de malha foi empregado nos dois fluidos. Para todo o domínio foi considerado uma função de tamanho na proximidade e curvatura entre faces e arestas. Essa função permite um refino localizado no interstício entre as malhas do fluido complexo e do sólido, e nas curvaturas do canal complexo.

Para a resolução do modelo de turbulência foi utilizado o método *SST  $k-\omega$* . O critério adotado para convergência foi um resíduo menor que 0,001, para as velocidades em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , continuidade,  $k$  e  $\omega$ . As condições de entrada foram: vazão mássica do fluido em kg/s e temperatura de entrada, e a condição de saída foi a pressão estática. Para o ramal reto, a vazão mássica do experimento foi dividida por 143 (número total de canais) e multiplicada por 11 (número de canais retos na lâmina). Para o ramal complexo, a vazão mássica do experimento foi dividida por 338 (número total de canais) e multiplicada por 26 (número de canais complexos na lâmina).

As demais condições adotadas no modelo são: condição de não escorregamento nas paredes; turbulência definida utilizando a intensidade turbulenta (5%) e o respectivo diâmetro do canal; faces de entrada e saída, sem a seção transversal dos canais, são consideradas adiabáticas. A porcentagem da intensidade turbulenta foi investigada e observou-se que a alteração do valor inicial não influenciava significativamente no resultado da simulação.

O critério de convergência utilizado foi a variação da temperatura ( $\Delta T$ ) no ramal do ar e os detalhes da análise de convergência são apresentados no **Apêndice H**. Os detalhes da malha selecionada para as simulações são apresentados na Fig. 44 considerando os três domínios (a) e somente fluidos (b).

Fig. 44 – Malha selecionada após análise de convergência: (a) com o domínio sólido; (b) apenas malha fluidica



Fonte: Autor (2025).

O modelo numérico será utilizado para comparação da taxa de transferência com os experimentos, mas também para avaliação do número de Nusselt. O Nusselt do canal pode ser estimado de acordo com a Eq. (68).

$$Nu = \frac{q''_{wall} D}{(T_{wall} - T_b)k} \quad (68)$$

onde  $q''_{wall}$  é o fluxo de calor na parede do canal,  $D$  é o diâmetro do canal,  $T_{wall}$  é a temperatura média da parede do canal avaliado,  $T_b$  é a temperatura média do fluido e  $k$  é a condutividade térmica do fluido.

Os parâmetros de entrada para as simulações são compilados no **Apêndice H**. Para as simulações água – ar com ar no ramal reto na Tabela H4 e com ar no ramal complexo na Tabela H5. Para a configuração água – água com água quente no ramal complexo na Tabela H6 e com água fria no ramal complexo na Tabela H7. Salienta-se que para as simulações água – água a pressão de saída foi considerada nula.

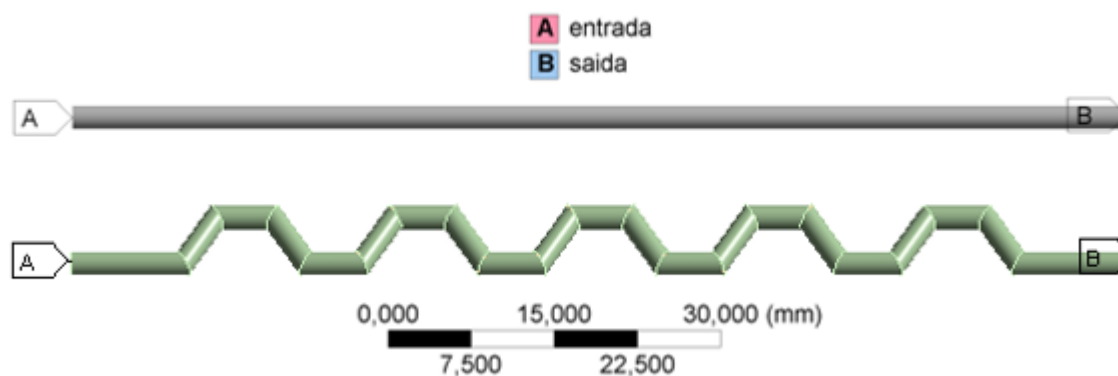
### 3.2.4 Modelo numérico – Canais

Para avaliação hidrodinâmica do trocador de calor, foi modelado apenas um canal para cada ramal. No **Apêndice H** – Tabela H3 foram apresentados os valores de  $Y^+$  para a região dos canais da lâmina, com um valor médio de 50 para o ramal reto e 22 para o complexo. Isso faz com que a malha seja boa suficiente para resolução da equação da energia, mas não adequada para a queda de pressão. Para alcançar valores de  $Y^+$  menores, decidiu-se por analisar apenas um canal e aplicar uma maior discretização da malha do fluido na região próxima a parede.

Ao modelar apenas um canal, o recurso computacional permite a utilização de maiores refinamentos. Assim, para a comparação dos experimentos hidrodinâmicos, foi utilizado apenas um canal com caminho reto e um com complexo. Assumiu-se uma distribuição uniforme da vazão, dessa forma a queda de pressão em um canal equivale a queda de pressão no núcleo. Na saída do canal foi definida com uma condição de pressão prescrita, valor advindo do experimento.

No caso do modelo hidrodinâmico a malha do sólido não é essencial para a avaliação da queda de pressão, fazendo com que não seja imprescindível a replicação da espessura de parede do canal. Portanto, foi modelado o fluido e uma parede sólida de 0,1 mm para aplicação da rugosidade de parede da interface fluido-sólido. Novamente, foi aplicada uma condição sem escorregamento. A rugosidade da superfície interna é a mesma apresentada na seção 3.2.1.2.

Fig. 45 – Modelagem dos canais para simulações hidrodinâmicas

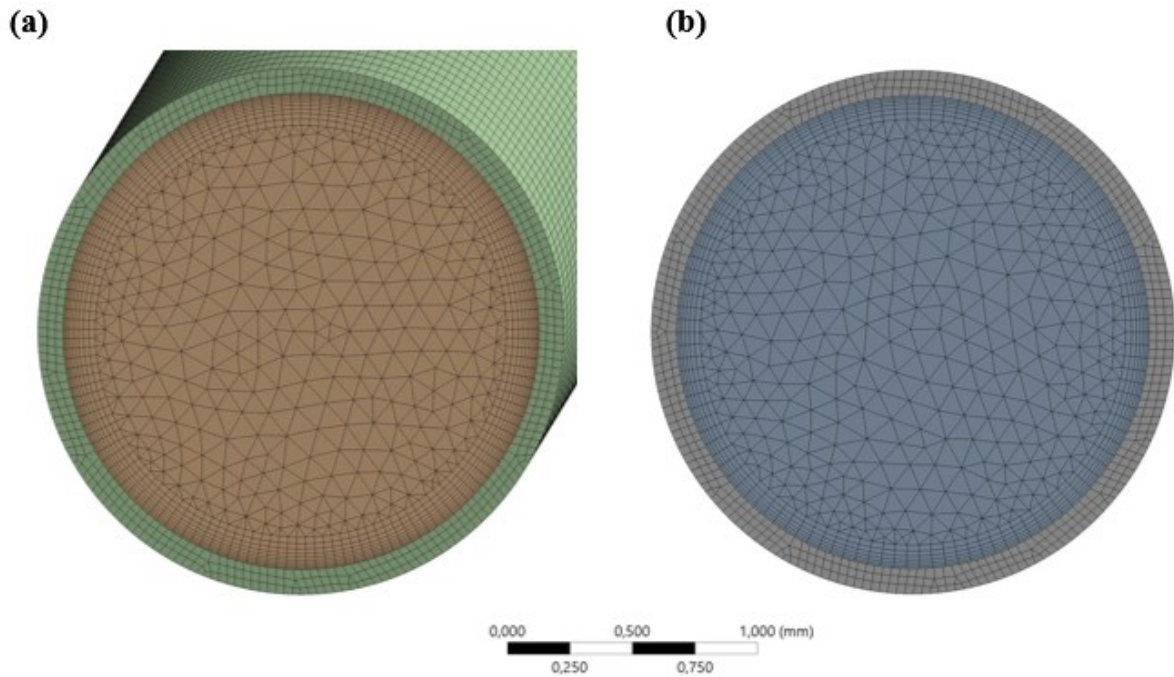


Fonte: Autor (2025).

Para cada canal existem duas malhas, do fluido e do sólido. A malha considera função de proximidade e curvatura. Para a modelagem da turbulência foi utilizado o método *SST  $k-\omega$* . Novamente, este método é capaz de levar em consideração a rugosidade da parede, que é elevada. Mesmo a lâmina sendo utilizada apenas para o campo de temperatura, isso não diminui a importância de utilizar um método capaz de levar em consideração a rugosidade, pois a perturbação do escoamento gera aumento na transferência de calor. As propriedades da água são definidas na temperatura ambiente, a mesma utilizada nos experimentos hidrodinâmicos.

A Fig. 46 apresenta a malha do canal e da parede do sólido, assim como o detalhamento das camadas de *inflation*, dos canais complexo e reto. A análise de convergência de malha para os canais individuais é apresentada no **Apêndice I**. Também no **Apêndice I** – Tabela I5 são compilados os parâmetros de entrada para o modelo numérico de todas as simulações hidrodinâmicas realizadas.

Fig. 46 – Detalhes da malha selecionada para simulação hidrodinâmica: (a) canal complexo; (b) canal reto



Fonte: Autor (2025).

Como descrito no item 3.2.2.3 a pressão foi medida dentro do bocal, logo a queda de pressão experimental considera as variações resultante da contração e expansão do fluido ao entrar e sair do canal. Em razão disso, como o modelo numérico estima apenas a variação da pressão dentro do canal ( $\Delta P$  atrito e momento), é necessário subtrair essas parcelas (Eq. (69)) dos dados experimentais.

$$\Delta P_{cont\_exp} = \frac{G^2}{2\rho_e} \left[ (1 - \varphi^2 + K_c) - (1 - \varphi^2 - K_e) \frac{\rho_e}{\rho_s} \right] \quad (69)$$

em que  $\varphi$  é a porosidade,  $\rho_e$  é a massa específica de entrada,  $\rho_s$  é a massa específica de saída,  $G$  é o fluxo mássico,  $K_e$  e  $K_c$  são os coeficientes de expansão e contração, respectivamente, e são encontrados no trabalho de Kays e London (1998).

Esta metodologia de cálculo da queda de pressão ao entrar e sair do núcleo foi amplamente empregada em trabalhos que estudaram o modelo hidrodinâmico de trocadores de calor compactos, tais como Morteau e Mantelli (2019), Mylavarapu et al. (2012), Strobel e Morteau (2022) e Da Silva et al. (2021).

## 4 RESULTADOS

### 4.1 CILINDRO

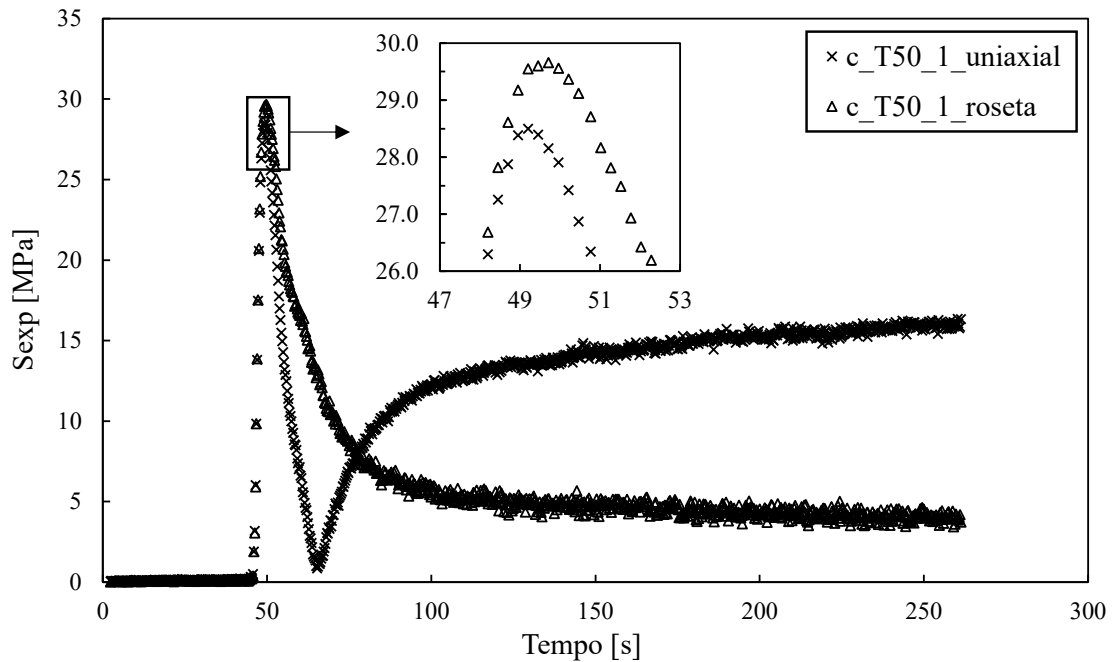
#### 4.1.1 Tensão térmica transiente

Na Fig. 47 pode ser observadas as tensões superficiais no experimento com cilindro espesso medidas pelos extensômetros uniaxiais e o roseta (triaxial). Neste experimento foi utilizada a maior diferença de temperatura (50°C).

A tensão é nula no começo da aquisição de dados e a partir do momento em que a água quente começa a escoar no interior do cilindro, a tensão se eleva, até atingir o valor máximo. Este é o momento em que há a maior diferencial de temperatura entre a superfície interna e externa do cilindro. Uma vez que a temperatura tende a se homogeneizar ao longo da espessura, as tensões decaem até um valor estável, caracterizando a tensão térmica em regime, como pode ser visto na Fig. 47 após 200 segundos de experimento.

Os extensômetros uniaxiais não serão utilizados para comparação de tensão térmica com os modelos analíticos e numéricos. Observa-se que a medição do extensômetro uniaxial começa a divergir após 65 segundos e não para de aumentar até o fim do experimento. Essa divergência ocorre pois o modelo utilizado não compensa a temperatura, fazendo com que o aumento de temperatura na superfície, onde foi fixado, afete sua medição. Aos 65 segundos, a deformação medida no extensômetro uniaxial se torna negativa. O extensômetro roseta não apresentou esses problemas, pois é um extensômetro autocompensado para temperatura, ou seja, a temperatura da superfície não afeta suas medições. Neste caso, após o pico, a tensão decresce até convergir para um valor constante, tensão no regime permanente.

Ainda na Fig. 47 foi realizado uma aproximação da região onde ocorre a máxima tensão térmica. Como pode ser visto, o momento em que ocorre o pico é similar entre os extensômetros, com uma diferença de 0,5 segundos (a tensão foi adquirida a cada 0,25 segundos). Para este experimento, o pico de tensão térmica equivalente foi de 29,7 MPa na roseta e 28,5 MPa no uniaxial, resultando em uma diferença de 4%. Mesmo com o pico semelhante entre os dois extensômetros, optou-se por trabalhar com a roseta, visto que ela não é afetada pela temperatura.

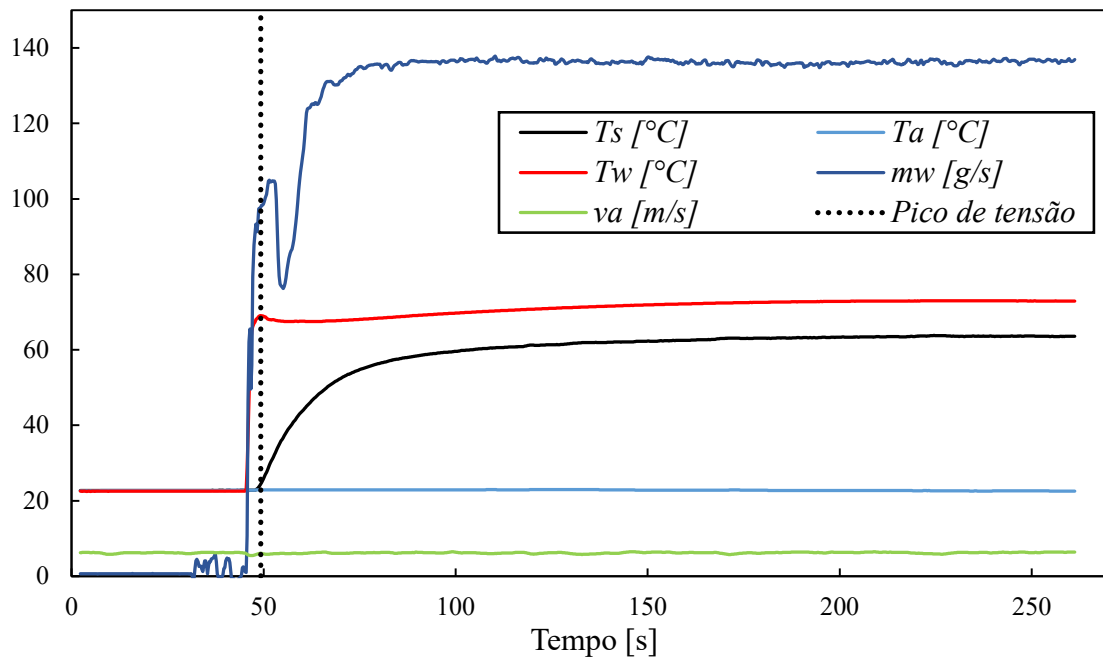
Fig. 47 – Evolução da tensão equivalente térmica no tempo para o experimento  $c\_T50\_1$ 

Fonte: Autor (2025).

Durante o experimento foram coletados parâmetros necessários para os modelos analíticos e numéricos. Estes foram: temperatura inicial do protótipo ( $T_i$ ); temperaturas dos escoamentos interno e externo ( $T_w$  e  $T_a$ ); velocidade do ar frio ( $v_a$ ); vazão da água quente ( $m_w$ ). Utilizando estes parâmetros é possível calcular os coeficientes convectivos interno ( $h_w$ ) e externo ( $h_a$ ), apresentados no **Apêndice A**, atuantes no tubo espesso, que juntamente com as temperaturas, são os parâmetros de entrada para o modelo analítico e numérico.

A Fig. 48 apresenta os dados coletados ao longo do tempo, com o momento do pico destacado na imagem por uma linha vertical em  $t = 50s$ . Neste momento, os valores dos parâmetros mencionados anteriormente foram coletados e empregados nos modelos matemáticos. Lembrando que em todos os testes, a temperatura inicial ( $T_i$ ) foi coletada antes do início do experimento.

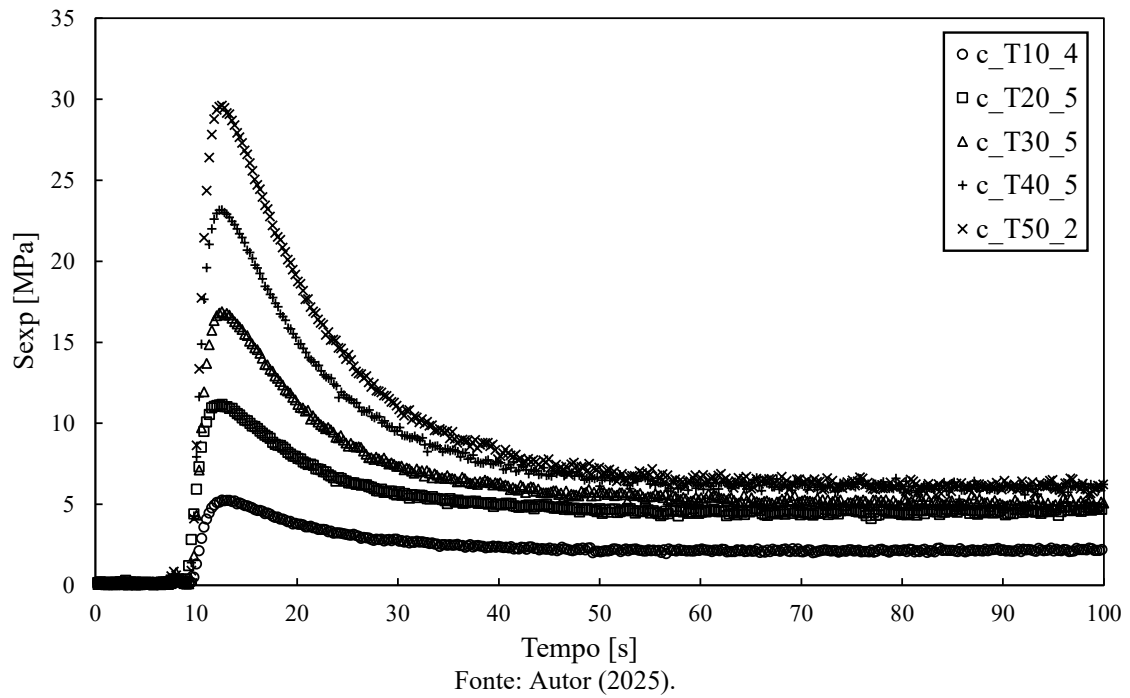
Fig. 48 – Parâmetros de temperatura, vazão e velocidade monitorados ao longo do experimento *c\_T50\_1*



Fonte: Autor (2025).

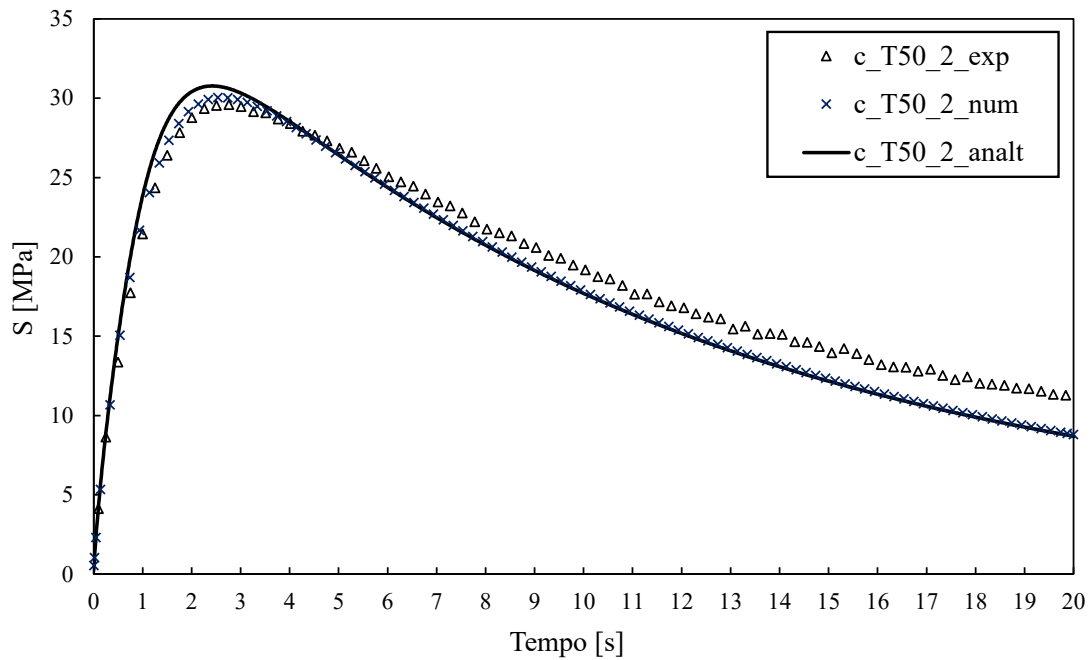
Para demonstrar os picos foi selecionado um experimento de cada diferencial de temperatura, estes são apresentados na Fig. 49. Nos testes, pode-se perceber que quanto maior o delta de temperatura maior o pico de tensão. Além disso, todos os testes apresentaram o mesmo comportamento, um aumento rápido da tensão (início do escoamento de água quente no interior do cilindro) até atingir um valor de pico. Em seguida, ocorre um decaimento lento da tensão, até atingir um valor constante no regime permanente.

Fig. 49 – Tensão térmica transiente para diferentes diferenciais de temperatura



A Fig. 50 apresenta uma comparação entre os três modelos: experimental, numérico e analítico. Como pode ser visto, o comportamento é semelhante em todos os casos. Para o caso plotado ( $c\_T50\_2$  – cilindro com  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ ), o erro do pico de tensão analítica foi 3,9% e o numérico 1,5% em relação ao experimento.

Fig. 50 – Comparação entre o pico térmico experimental, numérico e analítico para o experimento  $c\_T50\_2$



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 21 apresenta um compilado dos 30 experimentos realizados no cilindro espesso, com 5 diferenciais de temperatura (10, 20, 30, 40 e 50 °C). São apresentadas as temperaturas ( $T_i$ ,  $T_w$  e  $T_a$ ), vazão ( $m_w$ ), velocidade ( $v_a$ ) e respectivos coeficientes convectivos do fluxo interno ( $h_w$ ) e externo ( $h_a$ ), assim como a tensão de pico experimental ( $S_{exp}$ ), analítica ( $S_{analt}$ ) e numérica ( $S_{num}$ ). Ainda, é apresentado a incerteza experimental do pico de tensão, definido como  $u(S_{exp})$ . O erro entre o modelo analítico e os dados experimentais, é dado por  $dif_{analt}$ , enquanto o erro numérico é dado por  $dif_{num}$ .

Para todos os casos, o maior nível de tensão foi observado no modelo analítico e o menor no experimento. A diferença entre o modelo analítico e o numérico foi de 2%. O experimento que apresentou o maior erro com relação aos modelos foi o  $c\_T10\_6$ , enquanto o menor erro foi visto no experimento  $c\_T50\_2$ , também apresentado graficamente. Analisando todos os experimentos, diferença média entre experimento e analítico ficou em 6,9% enquanto entre experimento e numérico foi 4,7%.

As equações propostas por Noda et al. (2018) para tensão térmica transiente se baseiam no campo de temperatura do cilindro, resolvido de forma analítica. O mesmo ocorre com o modelo numérico, entretanto, esse campo de temperatura é resolvido numericamente. Portanto, a baixa diferença entre modelo numérico e analítico (2%) é coerente, uma vez que consideram

os mesmos parâmetros de entrada. A incerteza experimental do extensômetro é apenas 3%, portanto mesmo ao considerar a incerteza experimental, os resultados numéricos e analíticos ficam fora do desvio experimental por uma pequena margem.

Tabela 21 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para o pico de tensão térmica transiente

| <i>Código<br/>do exp.</i> | <b>T<sub>i</sub></b><br>[°C] | <b>T<sub>w</sub></b><br>[°C] | <b>mw</b><br>[kg/s] | <b>hw</b><br>[W/mm²K] | <b>T<sub>a</sub></b><br>[°C] | <b>va</b><br>[m/s] | <b>ha</b><br>[W/mm²K] | <b>S<sub>exp</sub></b><br>[MPa] | <b>u(S<sub>exp</sub>)</b><br>[MPa] | <b>S<sub>analt</sub></b><br>[MPa] | <b>difanalt</b><br>[%] | <b>S<sub>num</sub></b><br>[MPa] | <b>difnum</b><br>[%] |
|---------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------------|----------------------|
| <i>c_T10_1</i>            | 22,5                         | 30,9                         | 0,121               | 0,0135                | 22,1                         | 6,1                | 5,50E-05              | 5,08                            | 0,159                              | 5,61                              | <b>9,4</b>             | 5,48                            | <b>7,4</b>           |
| <i>c_T10_2</i>            | 22,8                         | 30,9                         | 0,116               | 0,0130                | 22,2                         | 6,4                | 5,70E-05              | 4,88                            | 0,152                              | 5,35                              | <b>8,8</b>             | 5,24                            | <b>6,9</b>           |
| <i>c_T10_3</i>            | 22,8                         | 31,1                         | 0,116               | 0,0130                | 22,1                         | 6,4                | 5,70E-05              | 5,06                            | 0,159                              | 5,49                              | <b>7,8</b>             | 5,37                            | <b>5,8</b>           |
| <i>c_T10_4</i>            | 22,7                         | 31,2                         | 0,117               | 0,0131                | 22,2                         | 5,8                | 5,30E-05              | 5,25                            | 0,169                              | 5,63                              | <b>6,7</b>             | 5,50                            | <b>4,6</b>           |
| <i>c_T10_5</i>            | 22,7                         | 31,0                         | 0,116               | 0,0130                | 22,1                         | 5,8                | 5,30E-05              | 5,02                            | 0,158                              | 5,49                              | <b>8,6</b>             | 5,37                            | <b>6,5</b>           |
| <i>c_T10_6</i>            | 23,0                         | 31,1                         | 0,120               | 0,0134                | 22,2                         | 6,2                | 5,60E-05              | 4,67                            | 0,127                              | 5,41                              | <b>13,7</b>            | 5,29                            | <b>11,8</b>          |
| <i>c_T20_1</i>            | 22,4                         | 39,7                         | 0,114               | 0,0142                | 22,5                         | 6,2                | 5,50E-05              | 11,1                            | 0,354                              | 11,7                              | <b>4,8</b>             | 11,4                            | <b>2,6</b>           |
| <i>c_T20_2</i>            | 22,6                         | 39,7                         | 0,116               | 0,0144                | 22,2                         | 6,3                | 5,60E-05              | 10,8                            | 0,343                              | 11,6                              | <b>7,1</b>             | 11,3                            | <b>5,0</b>           |
| <i>c_T20_3</i>            | 22,8                         | 39,9                         | 0,116               | 0,0144                | 22,1                         | 6,3                | 5,60E-05              | 10,7                            | 0,333                              | 11,6                              | <b>8,1</b>             | 11,4                            | <b>6,0</b>           |
| <i>c_T20_4</i>            | 22,5                         | 39,6                         | 0,117               | 0,0145                | 22,2                         | 6,3                | 5,60E-05              | 10,8                            | 0,338                              | 11,6                              | <b>7,5</b>             | 11,4                            | <b>5,4</b>           |
| <i>c_T20_5</i>            | 22,4                         | 39,6                         | 0,118               | 0,0146                | 22,4                         | 6,0                | 5,40E-05              | 11,2                            | 0,346                              | 11,7                              | <b>4,6</b>             | 11,4                            | <b>2,4</b>           |
| <i>c_T20_6</i>            | 22,6                         | 39,8                         | 0,117               | 0,0145                | 22,3                         | 5,7                | 5,30E-05              | 11,0                            | 0,349                              | 11,7                              | <b>6,1</b>             | 11,4                            | <b>3,9</b>           |
| <i>c_T30_1</i>            | 22,8                         | 48,3                         | 0,115               | 0,0156                | 22,7                         | 5,7                | 5,30E-05              | 16,6                            | 0,528                              | 17,7                              | <b>6,1</b>             | 17,2                            | <b>3,9</b>           |
| <i>c_T30_2</i>            | 23,2                         | 48,6                         | 0,117               | 0,0158                | 22,8                         | 5,9                | 5,40E-05              | 16,6                            | 0,515                              | 17,7                              | <b>6,1</b>             | 17,2                            | <b>3,9</b>           |
| <i>c_T30_3</i>            | 22,8                         | 48,6                         | 0,118               | 0,0159                | 22,9                         | 5,6                | 5,20E-05              | 16,7                            | 0,527                              | 17,9                              | <b>6,9</b>             | 17,5                            | <b>4,7</b>           |
| <i>c_T30_4</i>            | 22,8                         | 48,5                         | 0,118               | 0,0159                | 22,6                         | 5,5                | 5,20E-05              | 16,5                            | 0,528                              | 17,9                              | <b>7,8</b>             | 17,5                            | <b>5,6</b>           |
| <i>c_T30_5</i>            | 22,6                         | 48,3                         | 0,118               | 0,0160                | 22,7                         | 5,7                | 5,30E-05              | 16,9                            | 0,529                              | 17,9                              | <b>5,6</b>             | 17,5                            | <b>3,4</b>           |
| <i>c_T30_6</i>            | 22,6                         | 48,3                         | 0,115               | 0,0156                | 22,6                         | 6,0                | 5,50E-05              | 16,7                            | 0,526                              | 17,8                              | <b>6,2</b>             | 17,4                            | <b>4,0</b>           |
| <i>c_T40_1</i>            | 22,8                         | 59,0                         | 0,102               | 0,0151                | 22,5                         | 6,0                | 5,40E-05              | 22,7                            | 0,698                              | 24,8                              | <b>8,5</b>             | 24,3                            | <b>6,5</b>           |
| <i>c_T40_2</i>            | 22,6                         | 57,1                         | 0,115               | 0,0167                | 22,5                         | 6,2                | 5,60E-05              | 23,1                            | 0,734                              | 24,3                              | <b>4,9</b>             | 23,7                            | <b>2,6</b>           |
| <i>c_T40_3</i>            | 23,0                         | 57,3                         | 0,117               | 0,0170                | 22,9                         | 6,1                | 5,50E-05              | 23,0                            | 0,730                              | 24,2                              | <b>5,0</b>             | 23,7                            | <b>2,9</b>           |
| <i>c_T40_4</i>            | 22,6                         | 57,2                         | 0,119               | 0,0172                | 22,6                         | 6,0                | 5,40E-05              | 23,1                            | 0,735                              | 24,5                              | <b>5,7</b>             | 23,8                            | <b>3,1</b>           |
| <i>c_T40_5</i>            | 22,6                         | 56,8                         | 0,118               | 0,0171                | 22,7                         | 6,0                | 5,40E-05              | 23,2                            | 0,721                              | 24,2                              | <b>4,1</b>             | 23,6                            | <b>1,8</b>           |
| <i>c_T40_6</i>            | 22,6                         | 57,3                         | 0,119               | 0,0172                | 22,1                         | 6,0                | 5,40E-05              | 23,0                            | 0,723                              | 24,6                              | <b>6,5</b>             | 24,0                            | <b>4,3</b>           |
| <i>c_T50_1</i>            | 22,7                         | 69,0                         | 0,098               | 0,0155                | 22,9                         | 6,0                | 5,40E-05              | 29,7                            | 0,936                              | 32,0                              | <b>7,2</b>             | 31,3                            | <b>5,0</b>           |
| <i>c_T50_2</i>            | 22,7                         | 65,6                         | 0,118               | 0,0181                | 22,6                         | 5,9                | 5,40E-05              | 29,6                            | 0,924                              | 30,8                              | <b>3,9</b>             | 30,0                            | <b>1,5</b>           |
| <i>c_T50_3</i>            | 22,6                         | 68,7                         | 0,108               | 0,0168                | 22,6                         | 6,0                | 5,40E-05              | 28,7                            | 0,911                              | 32,5                              | <b>11,7</b>            | 31,7                            | <b>9,6</b>           |
| <i>c_T50_4</i>            | 22,8                         | 65,6                         | 0,123               | 0,0188                | 22,9                         | 5,8                | 5,30E-05              | 29,3                            | 0,923                              | 31,0                              | <b>5,5</b>             | 30,2                            | <b>3,0</b>           |
| <i>c_T50_5</i>            | 22,5                         | 69,0                         | 0,104               | 0,0163                | 22,4                         | 5,8                | 5,30E-05              | 29,9                            | 0,942                              | 32,5                              | <b>8,0</b>             | 31,8                            | <b>5,9</b>           |
| <i>c_T50_6</i>            | 22,5                         | 65,6                         | 0,118               | 0,0181                | 22,4                         | 6,4                | 5,70E-05              | 29,5                            | 0,924                              | 30,9                              | <b>4,5</b>             | 30,2                            | <b>2,3</b>           |

Fonte: Autor (2025).

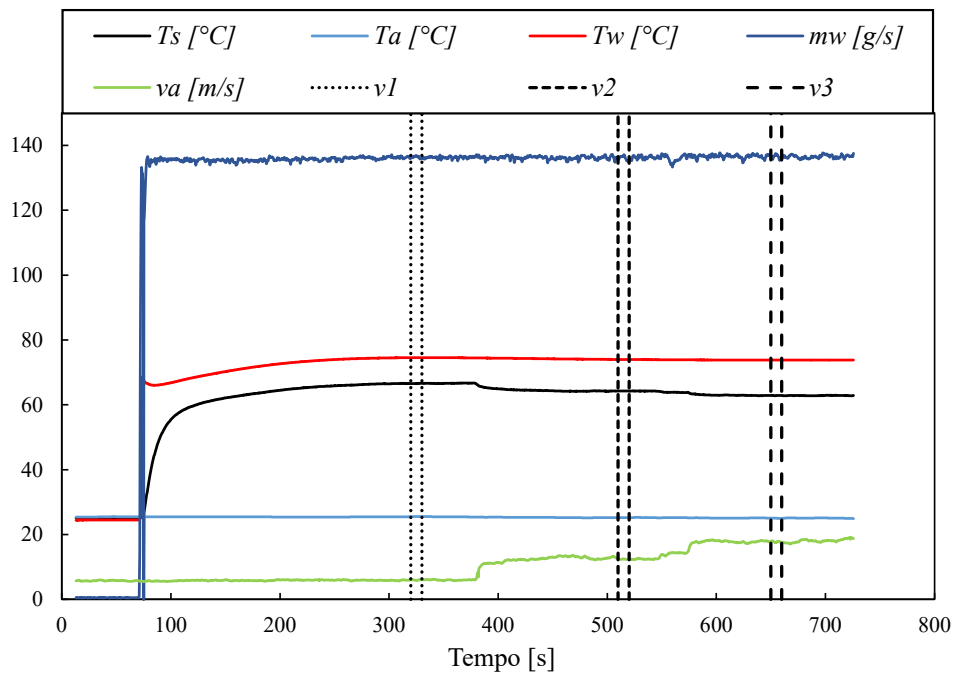
Para os experimentos com  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ , a tensão equivalente experimental média é de 29,4 MPa. Teixeira Júnior et al. (2023) realizou experimentos similares em um cilindro espesso e comparou os resultados com um modelo numérico de diferenças finitas. No conjunto experimental com  $\Delta T = 50^\circ\text{C}$ , Teixeira Júnior et al. (2023) obteve uma tensão de pico média de 22,8 MPa – 22% menor do que no presente trabalho. Acredita-se que esse menor nível de tensão observado pelo autor se dá pela diferença no coeficiente convectivo do escoamento interno, sendo 2985 W/m<sup>2</sup>K para Teixeira Júnior et al. (2023) e 17267 W/m<sup>2</sup>K no presente trabalho.

#### 4.1.2 Tensão térmica no regime permanente

Após o pico de tensão térmica, como pode ser visto na seção anterior, a tensão decresce até atingir a tensão em regime. Os experimentos do regime permanente foram executados separadamente dos experimentos de pico. Os experimentos consideraram três velocidades diferentes para o ar externo: 6, 12 e 18 m/s, em todos os casos foi esperado o tempo necessário para a tensão se estabilizar. Desse modo, para cada diferença de temperatura foram rodados testes de regime permanente com 3 velocidades. Essas três velocidades são definidas nos gráficos posteriores como  $v1$ ,  $v2$  e  $v3$ , respectivamente.

A Fig. 51 traz o monitoramento dos parâmetros de temperatura, velocidade e vazão de um experimento. Este experimento é mais longo que o anterior e a velocidade ( $v_a$ ) é variada. Cada vez que a velocidade muda, a tensão do regime permanente também muda, pois, um aumento na velocidade gera um aumento no coeficiente convectivo externo, essencial para o desenvolvimento do campo de temperatura e diretamente ligado com a tensão térmica. Na Fig. 51 é representado um experimento de diferencial de temperatura igual a  $50^\circ\text{C}$ . Neste caso, foi retirado uma média de 10 segundos na região de regime permanente de cada uma das velocidades (destacado pelas linhas verticais na imagem).

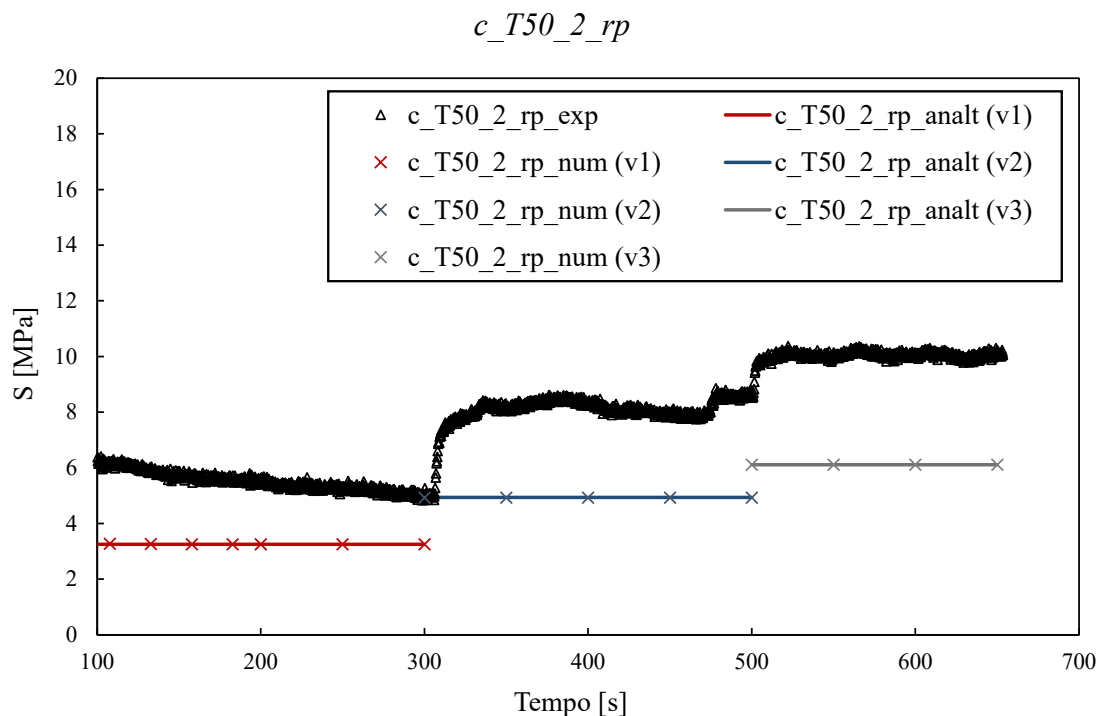
Fig. 51 – Parâmetros monitorados durante o experimento com destaque para os intervalos de obtenção de dados para comparações com modelos



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 52 apresenta uma comparação do experimento (*exp*) *c\_T50\_2\_rp* (cilindro com  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$  em regime permanente) com o modelo numérico (*num*) e analítico (*analt*). No gráfico pode ser visto que a tensão experimental é bem elevada em comparação com a numérica e analítica, que inclusive, são idênticas, com um erro menor do que 0,1% entre elas. Nota-se que as tensões no regime permanente são significativamente diferentes entre experimentos e modelo.

Fig. 52 – Comparação da tensão no regime permanente para os dados do experimento



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 22 apresenta o conjunto de experimentos realizados juntamente com os valores obtidos nos modelos. Pode ser visualizado que a diferença é elevada, em média 43,4% entre modelo e experimento. Também é possível notar que quanto maior o diferencial de temperatura, menores são os erros. Para o diferencial de 30°C, a diferença média entre modelos e experimento é 46,6% e para 50°C é 38,4%.

O fato de a tensão experimental ser superior a analítica e numérica indica que a diferença real de temperatura entre as superfícies é maior do que a teórica. Algumas hipóteses são levantadas para explicar a alta diferença entre modelo e experimento, ambas dizem respeito a convecção externa.

Para medir a velocidade do ar foi utilizado um anemômetro entre a saída de ar do compressor e o cilindro. Esse instrumento pode ter gerado um desvio no escoamento de ar em relação a superfície externa do cilindro, fazendo que haja um gradiente da velocidade nesta superfície, não garantindo uma convecção externa uniforme. No caso dos modelos, a convecção é considerada uniforme na superfície externa. Outra hipótese consiste no ambiente não ter sido isolado, fazendo com que a convecção natural, não considerada nos modelos, também tenha influência. Essa diferença na convecção externa não afeta o pico de tensão pois no tempo do pico a diferença de temperatura entre superfícies é bem superior.

Tabela 22 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para a tensão em regime

| Código do exp.    | va<br>[m/s] | Ta<br>[°C] | ha<br>[W/mm²K] | mw<br>[kg/s] | hw<br>[W/mm²K] | Tw<br>[°C] | Ti<br>[°C] | Sexp<br>[MPa] | u(Sexp)<br>[MPa] | Sanalt<br>[MPa] | difanalt<br>[%] | Snum<br>[MPa] | difnum<br>[%] |
|-------------------|-------------|------------|----------------|--------------|----------------|------------|------------|---------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|---------------|
| <i>c_T30_1_rp</i> | 7,0         | 23,7       | 6,00E-05       | 0,134        | 0,0177         | 54,6       |            | 4,41          | 0,153            | 2,25            | <b>49,1</b>     | 2,25          | <b>49,1</b>   |
|                   | 12,4        | 23,6       | 8,52E-05       | 0,135        | 0,0178         | 53,9       | 23,5       | 5,59          | 0,165            | 3,05            | <b>45,3</b>     | 3,05          | <b>45,3</b>   |
|                   | 18,0        | 23,7       | 1,07E-04       | 0,133        | 0,0176         | 53,9       |            | 6,75          | 0,182            | 3,75            | <b>44,5</b>     | 3,75          | <b>44,5</b>   |
| <i>c_T30_2_rp</i> | 6,4         | 24,3       | 5,69E-05       | 0,135        | 0,0178         | 55,0       |            | 4,27          | 0,149            | 2,12            | <b>50,4</b>     | 2,12          | <b>50,3</b>   |
|                   | 12,3        | 24,0       | 8,48E-05       | 0,136        | 0,0179         | 54,1       | 24,0       | 5,27          | 0,158            | 3,02            | <b>42,6</b>     | 3,02          | <b>42,6</b>   |
|                   | 18,0        | 23,8       | 1,08E-04       | 0,135        | 0,0179         | 53,9       |            | 6,36          | 0,176            | 3,77            | <b>40,7</b>     | 3,77          | <b>40,7</b>   |
| <i>c_T30_3_rp</i> | 6,3         | 24,4       | 5,64E-05       | 0,135        | 0,0179         | 55,2       |            | 4,39          | 0,148            | 2,11            | <b>51,9</b>     | 2,11          | <b>51,9</b>   |
|                   | 12,4        | 24,3       | 8,55E-05       | 0,135        | 0,0179         | 54,2       | 24,0       | 5,81          | 0,171            | 3,02            | <b>48,0</b>     | 3,02          | <b>48,0</b>   |
|                   | 18,2        | 24,1       | 1,08E-04       | 0,136        | 0,0179         | 53,8       |            | 6,94          | 0,188            | 3,72            | <b>46,4</b>     | 3,72          | <b>46,4</b>   |
| <i>c_T40_1_rp</i> | 5,6         | 24,3       | 5,22E-05       | 0,135        | 0,0192         | 64,8       |            | 4,70          | 0,180            | 2,58            | <b>45,0</b>     | 2,58          | <b>45,0</b>   |
|                   | 12,3        | 24,5       | 8,49E-05       | 0,135        | 0,0192         | 64,5       | 24,5       | 7,28          | 0,227            | 4,02            | <b>44,7</b>     | 4,02          | <b>44,7</b>   |
|                   | 18,1        | 24,6       | 1,08E-04       | 0,136        | 0,0193         | 63,8       |            | 8,97          | 0,248            | 4,91            | <b>45,3</b>     | 4,91          | <b>45,3</b>   |
| <i>c_T40_2_rp</i> | 5,9         | 24,6       | 5,38E-05       | 0,136        | 0,0192         | 64,6       |            | 4,86          | 0,182            | 2,62            | <b>46,0</b>     | 2,62          | <b>46,0</b>   |
|                   | 12,4        | 24,6       | 8,53E-05       | 0,136        | 0,0192         | 64,5       | 24,7       | 7,20          | 0,228            | 4,03            | <b>44,0</b>     | 4,03          | <b>44,0</b>   |
|                   | 17,8        | 24,3       | 1,07E-04       | 0,136        | 0,0193         | 63,9       |            | 8,55          | 0,246            | 4,92            | <b>42,4</b>     | 4,92          | <b>42,4</b>   |
| <i>c_T40_3_rp</i> | 5,9         | 24,7       | 5,37E-05       | 0,136        | 0,0192         | 64,6       |            | 4,99          | 0,189            | 2,61            | <b>47,7</b>     | 2,61          | <b>47,7</b>   |
|                   | 11,7        | 24,7       | 8,22E-05       | 0,136        | 0,0193         | 64,4       | 24,8       | 7,10          | 0,228            | 3,87            | <b>45,4</b>     | 3,87          | <b>45,4</b>   |
|                   | 18,8        | 24,6       | 1,10E-04       | 0,136        | 0,0193         | 64,0       |            | 9,18          | 0,267            | 5,02            | <b>45,3</b>     | 5,02          | <b>45,3</b>   |
| <i>c_T50_1_rp</i> | 6,2         | 24,6       | 5,57E-05       | 0,137        | 0,0205         | 74,4       |            | 5,39          | 0,207            | 3,38            | <b>37,4</b>     | 3,38          | <b>37,4</b>   |
|                   | 12,2        | 24,4       | 8,43E-05       | 0,137        | 0,0206         | 74,0       | 24,8       | 7,99          | 0,246            | 4,96            | <b>37,9</b>     | 4,96          | <b>37,9</b>   |
|                   | 18,3        | 24,1       | 1,09E-04       | 0,139        | 0,0207         | 73,8       |            | 9,85          | 0,264            | 6,28            | <b>36,2</b>     | 6,28          | <b>36,2</b>   |
| <i>c_T50_2_rp</i> | 6,0         | 25,5       | 5,44E-05       | 0,136        | 0,0205         | 74,5       |            | 5,28          | 0,215            | 3,25            | <b>38,5</b>     | 3,25          | <b>38,5</b>   |
|                   | 12,3        | 25,3       | 8,48E-05       | 0,136        | 0,0205         | 74,3       | 25,1       | 8,22          | 0,269            | 4,94            | <b>40,0</b>     | 4,93          | <b>40,1</b>   |
|                   | 18,0        | 25,1       | 1,08E-04       | 0,136        | 0,0205         | 73,8       |            | 9,96          | 0,287            | 6,11            | <b>38,7</b>     | 6,11          | <b>38,7</b>   |
| <i>c_T50_3_rp</i> | 5,9         | 24,3       | 5,38E-05       | 0,137        | 0,0205         | 73,7       |            | 5,30          | 0,210            | 3,25            | <b>38,6</b>     | 3,24          | <b>38,8</b>   |
|                   | 12,5        | 24,3       | 8,56E-05       | 0,138        | 0,0206         | 74,3       | 25,2       | 8,15          | 0,265            | 5,07            | <b>37,8</b>     | 5,07          | <b>37,8</b>   |
|                   | 17,8        | 24,4       | 1,07E-04       | 0,138        | 0,0207         | 74,0       |            | 10,38         | 0,302            | 6,17            | <b>40,6</b>     | 6,17          | <b>40,6</b>   |

Fonte: Autor (2025).

#### 4.1.3 Tensões mecânicas

Para analisar a tensão mecânica na superfície externa do cilindro utilizou-se o mesmo modelo de elementos finitos empregado para tensões térmicas. Neste caso, as mesmas condições de contorno (simetria) e o mesmo local de avaliação de tensão numérica, ambos apresentados na Fig. 16. Entretanto, neste caso as extremidades do cilindro estavam fechadas e não há escoamento que resulta em uma tensão, apenas a pressurização do interior do cilindro que resulta em uma tensão mecânica. Caso essa pressão seja aplicada em um cilindro com

extremidades abertas, esta não induzirá tensão longitudinal na superfície do cilindro, fazendo com que o modelo difira do experimento.

Para o experimento *c\_P200\_1* (teste com 200 bar), a tensão longitudinal medida no extensômetro uniaxial foi de 2,7 MPa, mostrando que de fato no experimento essa tensão longitudinal foi induzida e o cilindro estava carregado de forma longitudinal, visto que as válvulas estavam fechadas. Em uma simulação sem as extremidades fechadas e pressurizadas, a tensão longitudinal é nula, distanciando-se do experimento. Assim como no caso anterior, não foram utilizados extensômetros uniaxiais para a comparação com os modelos, foi empregado apenas para investigar a existência da tensão longitudinal.

Na Tabela 23 pode ser visto que a diferença entre o modelo numérico e o analítico é irrisória. A diferença média entre modelo e experimento foi de 8,1%, apresentando um máximo de 14% e mínimo de 3,4%, ambos para 50 bar, caso com as menores tensões. Em cada pressão foram realizados 7 testes. Ao comparar os resultados de tensão mecânica com térmica observa-se que a tensão mecânica é inferior a térmica. Para o caso com  $P = 200$  bar a tensão média é 4,1 MPa, 18% menor que o pico de tensão térmica para  $\Delta T = 10^{\circ}\text{C}$ , igual a 5 MPa. Isso mostra o quão crucial é a análise das tensões térmicas em canais de um trocador de calor.

Tabela 23 – Comparação entre experimento, numérico e analítico para a tensão mecânica

| <b>Código do exp.</b> | <b>P [bar]</b> | <b>Sexp [MPa]</b> | <b>u(Sexp) [MPa]</b> | <b>Sanalt [MPa]</b> | <b>difanalt [%]</b> | <b>Snum [MPa]</b> | <b>difnum [%]</b> |
|-----------------------|----------------|-------------------|----------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| <i>c_P50_1</i>        | 50,0           | 1,04              | 0,043                | 1,110               | <b>6,3</b>          | 1,105             | <b>6,0</b>        |
| <i>c_P50_2</i>        | 50,0           | 1,06              | 0,045                | 1,110               | <b>4,3</b>          | 1,105             | <b>3,9</b>        |
| <i>c_P50_3</i>        | 50,0           | 0,96              | 0,041                | 1,110               | <b>13,9</b>         | 1,105             | <b>13,6</b>       |
| <i>c_P50_4</i>        | 49,9           | 0,95              | 0,039                | 1,100               | <b>13,6</b>         | 1,105             | <b>14,0</b>       |
| <i>c_P50_5</i>        | 50,0           | 0,96              | 0,037                | 1,110               | <b>13,6</b>         | 1,105             | <b>13,2</b>       |
| <i>c_P50_6</i>        | 50,0           | 1,07              | 0,044                | 1,110               | <b>3,8</b>          | 1,105             | <b>3,4</b>        |
| <i>c_P50_7</i>        | 50,0           | 1,04              | 0,042                | 1,110               | <b>6,6</b>          | 1,105             | <b>6,3</b>        |
| <i>c_P100_1</i>       | 100,1          | 2,03              | 0,083                | 2,210               | <b>8,0</b>          | 2,211             | <b>8,0</b>        |
| <i>c_P100_2</i>       | 100,0          | 2,03              | 0,085                | 2,210               | <b>8,3</b>          | 2,211             | <b>8,4</b>        |
| <i>c_P100_3</i>       | 100,0          | 1,95              | 0,078                | 2,210               | <b>11,9</b>         | 2,211             | <b>11,9</b>       |
| <i>c_P100_4</i>       | 100,0          | 2,08              | 0,083                | 2,210               | <b>6,1</b>          | 2,211             | <b>6,1</b>        |
| <i>c_P100_5</i>       | 100,0          | 2,04              | 0,082                | 2,210               | <b>7,7</b>          | 2,211             | <b>7,7</b>        |
| <i>c_P100_6</i>       | 100,1          | 2,02              | 0,082                | 2,210               | <b>8,7</b>          | 2,211             | <b>8,7</b>        |
| <i>c_P100_7</i>       | 100,1          | 2,03              | 0,084                | 2,210               | <b>8,0</b>          | 2,211             | <b>8,0</b>        |
| <i>c_P150_1</i>       | 150,0          | 3,04              | 0,125                | 3,320               | <b>8,3</b>          | 3,316             | <b>8,2</b>        |
| <i>c_P150_2</i>       | 150,0          | 3,18              | 0,130                | 3,320               | <b>4,2</b>          | 3,316             | <b>4,1</b>        |
| <i>c_P150_3</i>       | 150,0          | 3,06              | 0,125                | 3,320               | <b>7,9</b>          | 3,316             | <b>7,8</b>        |
| <i>c_P150_4</i>       | 150,1          | 3,05              | 0,125                | 3,320               | <b>8,1</b>          | 3,316             | <b>8,0</b>        |
| <i>c_P150_5</i>       | 150,0          | 2,98              | 0,122                | 3,320               | <b>10,4</b>         | 3,316             | <b>10,3</b>       |
| <i>c_P150_6</i>       | 150,0          | 3,14              | 0,131                | 3,320               | <b>5,5</b>          | 3,316             | <b>5,4</b>        |
| <i>c_P150_7</i>       | 149,9          | 3,09              | 0,125                | 3,310               | <b>6,6</b>          | 3,316             | <b>6,7</b>        |
| <i>c_P200_1</i>       | 200,0          | 4,07              | 0,167                | 4,420               | <b>7,9</b>          | 4,422             | <b>7,9</b>        |
| <i>c_P200_2</i>       | 200,0          | 4,03              | 0,166                | 4,420               | <b>8,9</b>          | 4,420             | <b>8,9</b>        |
| <i>c_P200_3</i>       | 200,0          | 4,06              | 0,166                | 4,420               | <b>8,1</b>          | 4,420             | <b>8,1</b>        |
| <i>c_P200_4</i>       | 200,0          | 4,06              | 0,167                | 4,420               | <b>8,2</b>          | 4,420             | <b>8,2</b>        |
| <i>c_P200_5</i>       | 200,0          | 4,10              | 0,166                | 4,420               | <b>7,1</b>          | 4,420             | <b>7,1</b>        |
| <i>c_P200_6</i>       | 200,0          | 3,99              | 0,164                | 4,420               | <b>9,8</b>          | 4,420             | <b>9,8</b>        |
| <i>c_P200_7</i>       | 200,0          | 4,13              | 0,167                | 4,420               | <b>6,6</b>          | 4,420             | <b>6,6</b>        |

Fonte: Autor (2025).

#### 4.1.4 Tensões termomecânicas

##### 4.1.4.1 Configuração 1

Para induzir uma tensão termomecânica no cilindro foi necessário alterar o experimento. Neste caso foi utilizada a metodologia apresentada na seção 3.1.2.3, onde para gerar o escoamento é utilizado a bomba hidráulica pneumática e não o banho termostático, assim é possível garantir um escoamento com elevada pressão. Entretanto, a vazão gerada pela bomba não é elevada e nem uniforme, como no banho termostático. Dessa forma, não foi

possível utilizar o medidor de vazão eletromagnético, pois a vazão era menor do que a faixa de operação do sensor. Em razão disso, outra metodologia foi empregada.

Como mencionado, duas pressões foram investigadas nesta etapa, 100 e 150 bar. Para cada pressão existe uma vazão correspondente, por isso foi medida a vazão de cada pressão. Após a bomba pressurizar a linha, a válvula era aberta e a água, que deixava o sistema, era armazenada em um recipiente por 30 segundos. Em seguida, a massa era medida, e a vazão mássica calculada. Os resultados são apresentados na Tabela 24, e partir destes valores foi calculado o coeficiente convectivo do fluxo interno para cada pressão.

Tabela 24 – Vazão mássica utilizada nos experimentos termomecânicos

|                       | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | média          |
|-----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|
| <b>mw_P100 [kg/s]</b> | 0,01169 | 0,01146 | 0,01141 | 0,01189 | 0,01145 | 0,01079 | <b>0,01145</b> |
| <b>mw_P150 [kg/s]</b> | 0,01400 | 0,01350 | 0,01367 | 0,01370 | 0,01301 | 0,01366 | <b>0,01359</b> |

Fonte: Autor (2025).

O valor do coeficiente convectivo é igual a 0,00156 W/mm<sup>2</sup>K para o caso *mw\_P100* e 0,00192 W/mm<sup>2</sup>K para *mw\_P150*.

Tensões termomecânicas em cilindros são comuns de serem encontradas em diversas aplicações da engenharia, como o transporte de um fluido em alta temperatura entre duas localidades, ou em trocadores de calor casco e tubos. Entretanto, não foram encontrados estudos na literatura que abordavam o comportamento da tensão termomecânica em cilindros no regime transiente e permanente. Este estudo foi utilizado para servir de base para uma análise mais complexa: tensão termomecânica no regime transiente em trocadores de calor fabricados por impressão 3D.

Como este foi o primeiro experimento realizado que envolvia tensões térmicas e mecânicas combinadas, foi necessário fazer uma investigação prévia individual das tensões envolvidas. Primeiramente, para avaliar o pico de tensão térmica no regime transiente, foram rodados três experimentos puramente térmicos com as vazões apresentadas na Tabela 24. Neste caso, uma bomba hidráulica pneumática foi utilizada para bombeamento de água.

A Tabela 25 apresenta a comparação da tensão térmica para este caso com pressões baixas, ou seja, atuando apenas as tensões térmicas. Com base nesses resultados, podemos destacar que os maiores pico de tensão ocorreram para os casos de maior vazão (0,01359), caso com maiores coeficientes convectivos de transferência de calor. A tensão experimental foi em

média 1,04 MPa e 0,69 MPa maior que a teórica, para os casos de maior e menor vazão, respectivamente.

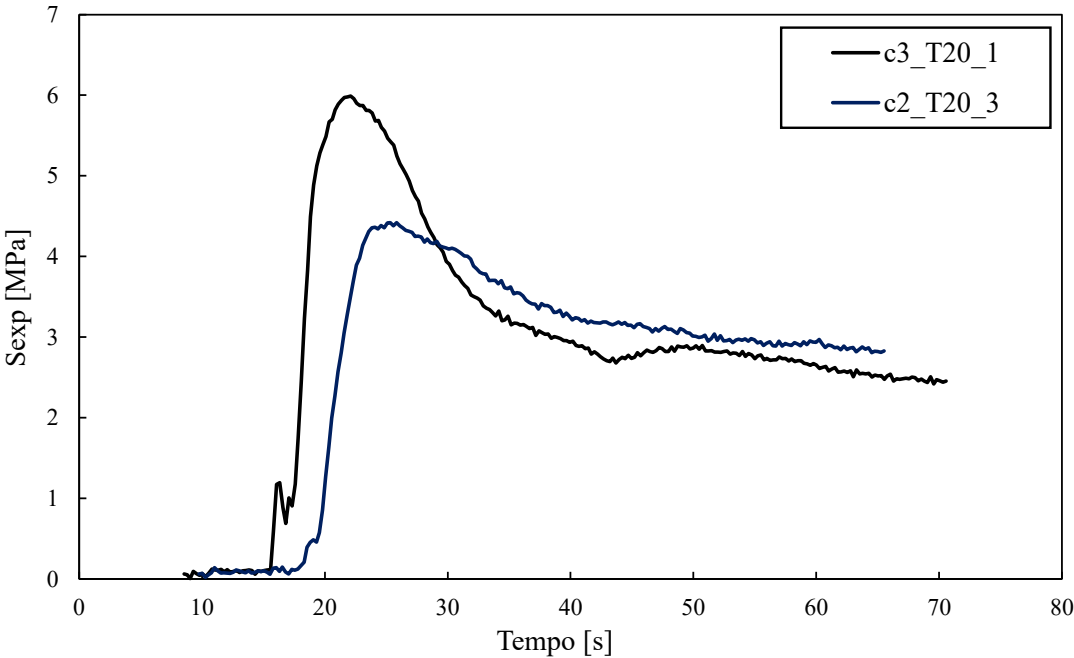
Tabela 25 – Pico de tensão térmica para as vazões utilizadas no experimento termomecânico

| Código do exp. | T <sub>i</sub> [°C] | T <sub>w</sub> [°C] | h <sub>w</sub> [W/mm²K] | T <sub>a</sub> [°C] | h <sub>a</sub> [W/mm²K] | St <sub>exp</sub> [MPa] | u(St <sub>exp</sub> ) [MPa] | Stanalt [MPa] | Stanalt dif [%] | Stnum [MPa] | Stnum dif [%] |
|----------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|-------------|---------------|
| c2_T20_1       | 24,2                | 40,9                |                         | 23,3                | 8,37E-05                | 4,80                    | 0,0935                      | 3,68          | <b>23,4</b>     | 3,65        | <b>23,9</b>   |
| c2_T20_2       | 24,7                | 41,3                | 0,00156                 | 22,6                | 8,36E-05                | 3,79                    | 0,0655                      | 3,73          | <b>1,5</b>      | 3,71        | <b>2,1</b>    |
| c2_T20_3       | 24,8                | 41,2                |                         | 23,1                | 8,51E-05                | 4,42                    | 0,0838                      | 3,66          | <b>17,1</b>     | 3,64        | <b>17,6</b>   |
| c3_T20_1       | 24,6                | 42,2                |                         | 21,7                | 8,70E-05                | 5,99                    | 0,1150                      | 4,626         | <b>22,8</b>     | 4,59        | <b>23,4</b>   |
| c3_T20_2       | 24,8                | 41,0                | 0,00192                 | 21,6                | 8,61E-05                | 5,10                    | 0,1029                      | 4,3           | <b>15,9</b>     | 4,26        | <b>16,5</b>   |
| c3_T20_3       | 25,0                | 41,1                |                         | 22,6                | 9,02E-05                | 5,05                    | 0,1004                      | 4,2           | <b>16,4</b>     | 4,19        | <b>17,1</b>   |

Fonte: Autor (2025).

A Fig. 53 representa o comportamento da tensão para os experimentos puramente térmico das duas vazões, c2 refere-se a menor vazão e c3 a maior. Comparando as vazões fica claro que um maior coeficiente convectivo interno resulta em um pico térmico mais agudo.

Fig. 53 – Tensão térmica transiente para 20°C



Fonte: Autor (2025).

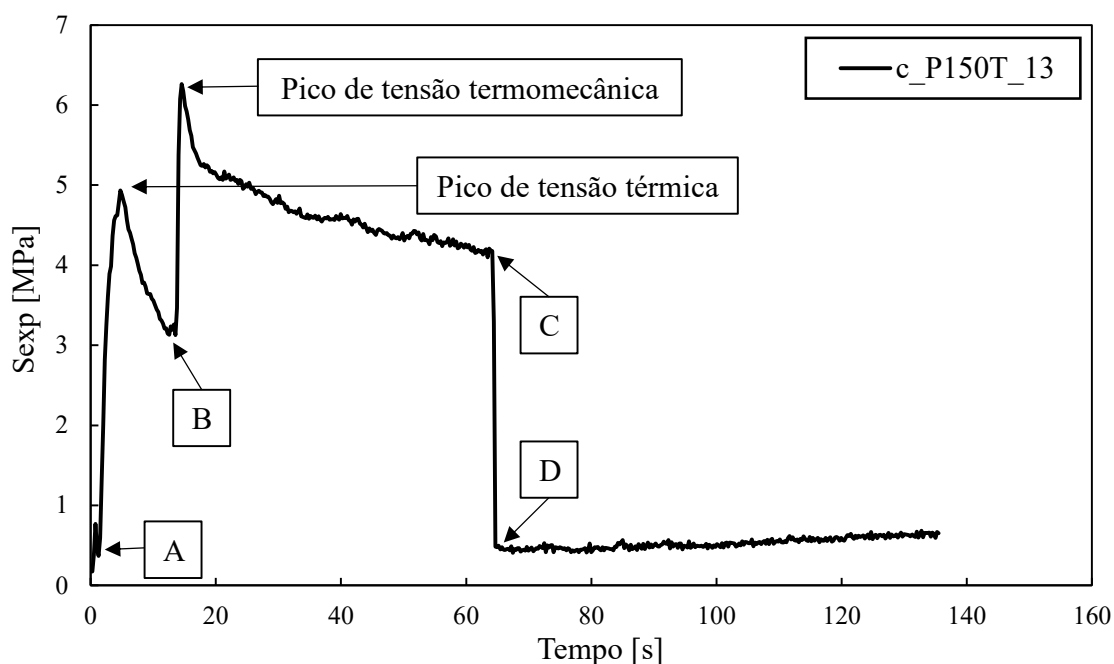
Em comparação aos resultados apresentados na seção 4.1.1, pode ser observado uma maior variação entre os resultados experimentais e os modelos analíticos e numéricos. Essa flutuação se deve a variação da vazão durante os testes, visto que a bomba hidráulica

pneumática não consegue produzir uma vazão uniforme, e sim por pulsos. Nos casos anteriores, foi empregada uma bomba centrífuga, que mantinha uma vazão constante, mas com baixa pressão de escoamento.

Os casos anteriores consideraram apenas a tensão térmica para as diferentes vazões advindas da bomba hidráulica pneumática. Com relação ao experimento termomecânico, a metodologia foi descrita na seção 3.1.2.3.1. A Fig. 54 apresenta um experimento para o nível de pressão de 150 bar, e sua respectiva vazão, lembrando que o diferencial de temperatura (entre a água quente e o ar ambiente) foi de 20°C para todos os testes. Este teste é caracterizado por 3 períodos distintos: 1) Tensão térmica (entre os pontos a e b); 2) Tensão termomecânica (entre os pontos b e c); 3) tensão térmica (entre os pontos c e d). Para entender o comportamento em tensão do cilindro é necessário relembrar o procedimento experimental.

Após a bomba ser definida na vazão desejada, iniciava-se o escoamento de água quente no cilindro. Neste momento, ocorre um aumento abrupto da tensão, pico de tensão devido a parcela térmica, visto que o cilindro ainda não havia sido pressurizado. O escoamento era mantido por 10 segundos e nesse tempo a tensão térmica já tinha atingido o pico e começava a reduzir.

Antes da tensão atingir os níveis do regime permanente, a válvula de saída de água era fechada, fazendo com que a bomba pressurizasse a água no interior do cilindro e gerando um degrau de tensão (pico de tensão termomecânica – destacado na Fig. 54), resultante da tensão mecânica. Nesse ponto a tensão atuante no cilindro é caracterizada como termomecânica, pois são considerados os efeitos do choque de temperatura e da pressão interna. Essa tensão termomecânica é caracterizada como um estado crítico para um cilindro, pois ocorre a combinação dos efeitos, resultando em elevados níveis de tensão. Após 63 segundos, a válvula foi aberta, aliviando a pressão interna e permitindo o escoamento do fluido a baixa pressão. Neste momento existe uma redução da tensão, devido puramente à parcela mecânica.

Fig. 54 – Variação da tensão termomecânica transiente com  $P = 150$  bar

Fonte: Autor (2025).

Para a comparação dos níveis de tensão com o modelo analítico e numérico, a tensão de pico térmica ( $S_{\text{exp}}$ ) será somada com a tensão mecânica ( $S_{\text{pexp}}$ ) – diferença de tensão quando o cilindro é despressurizado (degrau entre (C) e (D)).

A parcela devido à tensão mecânica também poderia ser avaliada quando a amostra era pressurizada (entre (B) e o pico de tensão termomecânica), entretanto, os resultados poderiam ser enganosos. No momento da pressurização, a tensão térmica cai em uma taxa muito alta, logo, este momento se caracteriza por um aumento da tensão mecânica e uma redução abrupta da tensão térmica, não sendo possível separar as duas parcelas. No final do experimento ocorre a despressurização. Neste momento, o cilindro já havia atingido a condição de regime permanente e a tensão estava estabilizada. Logo, a tensão mecânica é a diferença de tensão entre os pontos onde há pressão e onde não há pressão. Essa redução da pressão levou cerca de 0,5 segundos.

A Tabela 26 apresenta os valores medidos de tensão durante o experimento, sendo que o pico da tensão termomecânica transiente ( $S_{\text{pexp}}$ ) foi calculado como a soma da tensão mecânica com o primeiro pico de tensão térmica. Tanto no modelo numérico quanto no analítico o pico termomecânico foi obtido com as condições de carregamento sendo aplicadas simultaneamente.

Como visualizado até então, os modelos apresentam grande concordância de resultados, com o erro entre si sendo menor do que 1%. O erro médio do modelo analítico para com o experimental é de 9,6% e do numérico, 9,9%. A maior diferença encontrada foi no experimento *c\_P100T\_7*, para ambos os modelos, cerca de 19%. O experimento que apresentou o maior pico de tensão termomecânica foi o *c\_P100T\_7* (8 MPa), enquanto o modelo analítico e numérico foi o *c\_P100T\_10* (6,6 MPa).

A diferença entre experimento e modelo para o pico termomecânico é maior do que na comparação apenas do pico térmico. Acredita-se que a diferença aumentou devido a forma pulsada em que a água era bombeada pela bomba. Outro motivo pode ser o método de medição da vazão, manualmente. Todavia, a diferença entre resultados numéricos e analíticos ainda está abaixo de 10%.

Tabela 26 – Comparação dos picos de tensão termomecânica para P = 100 bar

| Código do exp.    | Ti [°C] | Tw [°C] | Ta [°C] | ha [W/mm²K] | P [bar] | Stexp [MPa] | Spexp [MPa] | Stpexp [MPa] | Stpanalt [MPa] | Stpanalt dif [%] | Stpnum [MPa] | Stpnum dif [%] |
|-------------------|---------|---------|---------|-------------|---------|-------------|-------------|--------------|----------------|------------------|--------------|----------------|
| <i>c_P100T_1</i>  | 23,8    | 40,9    | 23,2    | 9,01E-05    | 106,6   | 3,69        | 1,95        | 5,64         | 6,11           | <b>8,4</b>       | 6,09         | <b>7,9</b>     |
| <i>c_P100T_2</i>  | 23,8    | 42,6    | 22,9    | 8,62E-05    | 110,9   | 4,51        | 2,49        | 7,00         | 6,59           | <b>5,8</b>       | 6,56         | <b>6,2</b>     |
| <i>c_P100T_3</i>  | 23,6    | 41,0    | 23,1    | 8,82E-05    | 114,0   | 5,03        | 2,50        | 7,53         | 6,33           | <b>15,9</b>      | 6,31         | <b>16,2</b>    |
| <i>c_P100T_4</i>  | 24,9    | 42,1    | 23,0    | 8,84E-05    | 108,9   | 4,29        | 2,39        | 6,67         | 6,26           | <b>6,1</b>       | 6,24         | <b>6,5</b>     |
| <i>c_P100T_5</i>  | 25,0    | 42,3    | 22,4    | 8,84E-05    | 110,8   | 4,17        | 2,26        | 6,43         | 6,37           | <b>1,0</b>       | 6,35         | <b>1,4</b>     |
| <i>c_P100T_6</i>  | 23,9    | 41,9    | 22,8    | 9,11E-05    | 98,7    | 4,77        | 2,12        | 6,90         | 6,16           | <b>10,6</b>      | 6,14         | <b>11,0</b>    |
| <i>c_P100T_7</i>  | 25,4    | 42,5    | 23,1    | 8,82E-05    | 118,6   | 5,40        | 2,61        | 8,01         | 6,48           | <b>19,1</b>      | 6,46         | <b>19,4</b>    |
| <i>c_P100T_8</i>  | 24,5    | 41,3    | 22,5    | 8,69E-05    | 107,1   | 4,75        | 2,35        | 7,10         | 6,14           | <b>13,5</b>      | 6,12         | <b>13,9</b>    |
| <i>c_P100T_9</i>  | 23,6    | 40,6    | 22,3    | 7,57E-05    | 108,5   | 3,77        | 2,29        | 6,06         | 6,16           | <b>1,6</b>       | 6,13         | <b>1,2</b>     |
| <i>c_P100T_10</i> | 23,3    | 41,7    | 22,0    | 8,59E-05    | 114,1   | 5,37        | 2,56        | 7,93         | 6,60           | <b>16,8</b>      | 6,57         | <b>17,2</b>    |
| <i>c_P100T_11</i> | 24,4    | 41,4    | 22,0    | 8,69E-05    | 111,8   | 4,40        | 2,47        | 6,87         | 6,31           | <b>8,1</b>       | 6,29         | <b>8,4</b>     |
| <i>c_P100T_12</i> | 24,7    | 41,2    | 22,6    | 8,58E-05    | 102,5   | 3,79        | 2,22        | 6,01         | 5,98           | <b>0,5</b>       | 5,95         | <b>0,9</b>     |
| <i>c_P100T_13</i> | 24,7    | 41,2    | 23,0    | 8,59E-05    | 114,5   | 4,12        | 2,12        | 6,25         | 6,22           | <b>0,4</b>       | 6,20         | <b>0,8</b>     |
| <i>c_P100T_14</i> | 24,4    | 42,6    | 22,4    | 8,50E-05    | 108,6   | 5,05        | 2,47        | 7,51         | 6,47           | <b>13,8</b>      | 6,45         | <b>14,2</b>    |
| <i>c_P100T_15</i> | 24,7    | 41,5    | 22,3    | 8,52E-05    | 106,6   | 4,85        | 2,34        | 7,18         | 6,15           | <b>14,4</b>      | 6,13         | <b>14,7</b>    |
| <i>c_P100T_16</i> | 24,3    | 41,4    | 22,8    | 8,54E-05    | 104,7   | 4,41        | 2,38        | 6,79         | 6,12           | <b>9,9</b>       | 6,09         | <b>10,2</b>    |
| <i>c_P100T_17</i> | 23,9    | 41,2    | 22,3    | 8,51E-05    | 108,1   | 4,79        | 2,39        | 7,17         | 6,24           | <b>13,0</b>      | 6,22         | <b>13,3</b>    |
| <i>c_P100T_18</i> | 24,7    | 41,5    | 22,8    | 8,52E-05    | 110,2   | 4,39        | 2,44        | 6,83         | 6,20           | <b>9,2</b>       | 6,18         | <b>9,5</b>     |
| <i>c_P100T_19</i> | 25,0    | 42,0    | 23,1    | 8,67E-05    | 108,3   | 4,65        | 2,28        | 6,93         | 6,20           | <b>10,5</b>      | 6,18         | <b>10,8</b>    |
| <i>c_P100T_20</i> | 22,3    | 40,8    | 22,0    | 8,32E-05    | 114,6   | 5,00        | 2,56        | 7,56         | 6,57           | <b>13,1</b>      | 6,54         | <b>13,5</b>    |

Fonte: Autor (2025).

Para os experimentos com pressão de 150 bar o erro médio do modelo analítico é de 7,7% e do modelo numérico, 8,1%. O maior pico de tensão termomecânica foi no experimento *c\_P150T\_14* (9,9 MPa) e o modelo analítico e numérico apresentou seu maior pico com os

dados do experimento *c\_P150T\_9* (8,4 MPa). A maior diferença entre modelo e experimento ocorreu no experimento *c\_P150T\_14* e a menor no experimento *c\_P150T\_7* para o modelo analítico e *c\_P150T\_10* no numérico.

Tabela 27 – Comparação dos picos de tensão termomecânica para P = 150 bar

| Código do exp.    | T <sub>i</sub> [°C] | T <sub>w</sub> [°C] | T <sub>a</sub> [°C] | h <sub>a</sub> [W/mm²K] | P [bar] | St <sub>exp</sub> [MPa] | Sp <sub>exp</sub> [MPa] | St <sub>pexp</sub> [MPa] | St <sub>panalt</sub> [MPa] | St <sub>panalt</sub> dif [%] | St <sub>pnum</sub> [MPa] | St <sub>pnum</sub> dif [%] |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <i>c_P150T_1</i>  | 24,6                | 40,9                | 23,6                | 7,37E-05                | 158,6   | 4,69                    | 3,31                    | 8,00                     | 7,67                       | <b>4,1</b>                   | 7,64                     | <b>4,6</b>                 |
| <i>c_P150T_2</i>  | 25,0                | 42,5                | 23,4                | 8,26E-05                | 165,3   | 4,66                    | 3,62                    | 8,28                     | 8,17                       | <b>1,3</b>                   | 8,13                     | <b>1,8</b>                 |
| <i>c_P150T_3</i>  | 24,7                | 42,8                | 23,1                | 8,37E-05                | 156,6   | 5,59                    | 3,56                    | 9,14                     | 8,13                       | <b>11,1</b>                  | 8,09                     | <b>11,5</b>                |
| <i>c_P150T_4</i>  | 25,2                | 42,6                | 23,0                | 8,33E-05                | 164,7   | 5,33                    | 3,61                    | 8,94                     | 8,17                       | <b>8,7</b>                   | 8,13                     | <b>9,1</b>                 |
| <i>c_P150T_5</i>  | 25,3                | 41,5                | 23,2                | 8,37E-05                | 149,0   | 4,77                    | 3,28                    | 8,04                     | 7,51                       | <b>6,6</b>                   | 7,48                     | <b>7,0</b>                 |
| <i>c_P150T_6</i>  | 24,4                | 41,4                | 23,1                | 7,94E-05                | 171,5   | 4,67                    | 3,91                    | 8,57                     | 8,16                       | <b>4,9</b>                   | 8,12                     | <b>5,3</b>                 |
| <i>c_P150T_7</i>  | 22,7                | 40,6                | 22,3                | 8,66E-05                | 167,8   | 4,68                    | 3,67                    | 8,35                     | 8,26                       | <b>1,1</b>                   | 8,22                     | <b>1,6</b>                 |
| <i>c_P150T_8</i>  | 23,7                | 41,5                | 22,4                | 8,60E-05                | 155,8   | 4,95                    | 3,54                    | 8,49                     | 8,02                       | <b>5,6</b>                   | 7,98                     | <b>6,0</b>                 |
| <i>c_P150T_9</i>  | 24,5                | 42,8                | 22,9                | 8,76E-05                | 167,0   | 5,01                    | 3,70                    | 8,71                     | 8,42                       | <b>3,3</b>                   | 8,38                     | <b>3,8</b>                 |
| <i>c_P150T_10</i> | 24,7                | 41,8                | 22,8                | 8,47E-05                | 160,0   | 4,24                    | 3,61                    | 7,86                     | 7,97                       | <b>1,4</b>                   | 7,94                     | <b>1,0</b>                 |
| <i>c_P150T_11</i> | 24,5                | 41,0                | 22,7                | 8,57E-05                | 147,5   | 4,43                    | 3,31                    | 7,74                     | 7,55                       | <b>2,5</b>                   | 7,51                     | <b>3,0</b>                 |
| <i>c_P150T_12</i> | 24,7                | 41,8                | 23,1                | 8,72E-05                | 164,0   | 4,59                    | 3,65                    | 8,24                     | 8,05                       | <b>2,4</b>                   | 8,01                     | <b>2,8</b>                 |
| <i>c_P150T_13</i> | 24,1                | 41,5                | 22,7                | 8,60E-05                | 164,8   | 4,93                    | 3,71                    | 8,64                     | 8,12                       | <b>6,0</b>                   | 8,09                     | <b>6,4</b>                 |
| <i>c_P150T_14</i> | 24,1                | 41,0                | 23,5                | 8,65E-05                | 164,0   | 6,19                    | 3,76                    | 9,94                     | 7,93                       | <b>20,2</b>                  | 7,90                     | <b>20,6</b>                |
| <i>c_P150T_15</i> | 24,6                | 42,3                | 22,7                | 8,50E-05                | 157,8   | 5,95                    | 3,50                    | 9,44                     | 8,07                       | <b>14,5</b>                  | 8,04                     | <b>14,9</b>                |
| <i>c_P150T_16</i> | 24,4                | 41,1                | 23,2                | 7,69E-05                | 159,4   | 4,96                    | 3,57                    | 8,53                     | 7,80                       | <b>8,5</b>                   | 7,77                     | <b>8,9</b>                 |
| <i>c_P150T_17</i> | 24,4                | 41,3                | 22,7                | 7,78E-05                | 155,2   | 5,31                    | 3,52                    | 8,83                     | 7,79                       | <b>11,7</b>                  | 7,75                     | <b>12,1</b>                |
| <i>c_P150T_18</i> | 24,9                | 41,3                | 23,3                | 8,65E-05                | 157,5   | 4,74                    | 3,57                    | 8,31                     | 7,72                       | <b>7,1</b>                   | 7,69                     | <b>7,5</b>                 |
| <i>c_P150T_19</i> | 24,8                | 41,5                | 23,0                | 8,48E-05                | 160,7   | 5,78                    | 3,61                    | 9,39                     | 7,88                       | <b>16,1</b>                  | 7,85                     | <b>16,4</b>                |
| <i>c_P150T_20</i> | 24,9                | 41,7                | 23,1                | 8,78E-05                | 156,2   | 5,90                    | 3,54                    | 9,44                     | 7,81                       | <b>17,2</b>                  | 7,78                     | <b>17,6</b>                |

Fonte: Autor (2025).

O aumento da pressão em 50% não resultou em um aumento equivalente na tensão termomecânica. Ainda assim, a maior parcela continuava sendo a térmica, mesmo com uma diferença de temperatura relativamente baixa (20°C). Mais uma vez é mostrado que tensões térmicas são cruciais em trocadores até quando comparadas a altíssimas pressões como a de 150 bar. Trocadores de calor compactos trabalham com diferenças de temperatura superiores, como mostra Sarmiento et al. (2020).

#### 4.1.4.2 Configuração 2

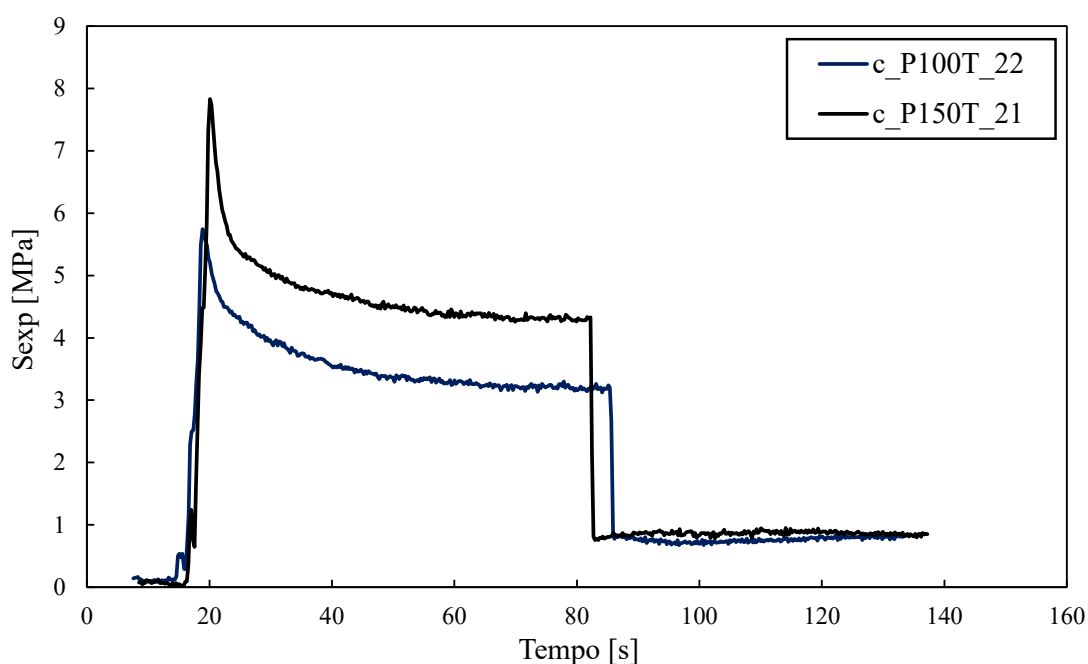
Além dos experimentos realizados para validação dos modelos, onde a parcela térmica e mecânica é medida em momentos diferentes do experimento, foram realizados experimentos

curtos na tentativa de sobrepor o pico térmico e a tensão mecânica, para simular o pior caso para um cilindro sob choque térmico e pressão mecânica.

O resultado experimental dos testes  $c\_P100T\_22$  e  $c\_P150T\_21$  são apresentados na Fig. 55, para ambas as pressões avaliadas e para um  $\Delta T$  de  $20^\circ\text{C}$ . Pode ser visto que o caso de 150 bar apresenta um pico termomecânico maior, visto que a tensão térmica de ambos era semelhante (mesma diferença de temperatura entre os ramais).

No início do teste ocorre o escoamento da água, entretanto, após poucos segundos, este escoamento é cessado, e o fluido fica armazenado no interior do cilindro. Vale destacar, que este foi o único método possível de trabalhar com alta pressão e alta diferença de temperatura. Então o pico, apresentado na próxima figura, é definido por um início de escoamento e na sequência um confinamento da água quente no cilindro, o que impacta no cálculo do coeficiente convectivo interno.

Fig. 55 – Comparação do pico de tensão termomecânica para as duas pressões avaliadas



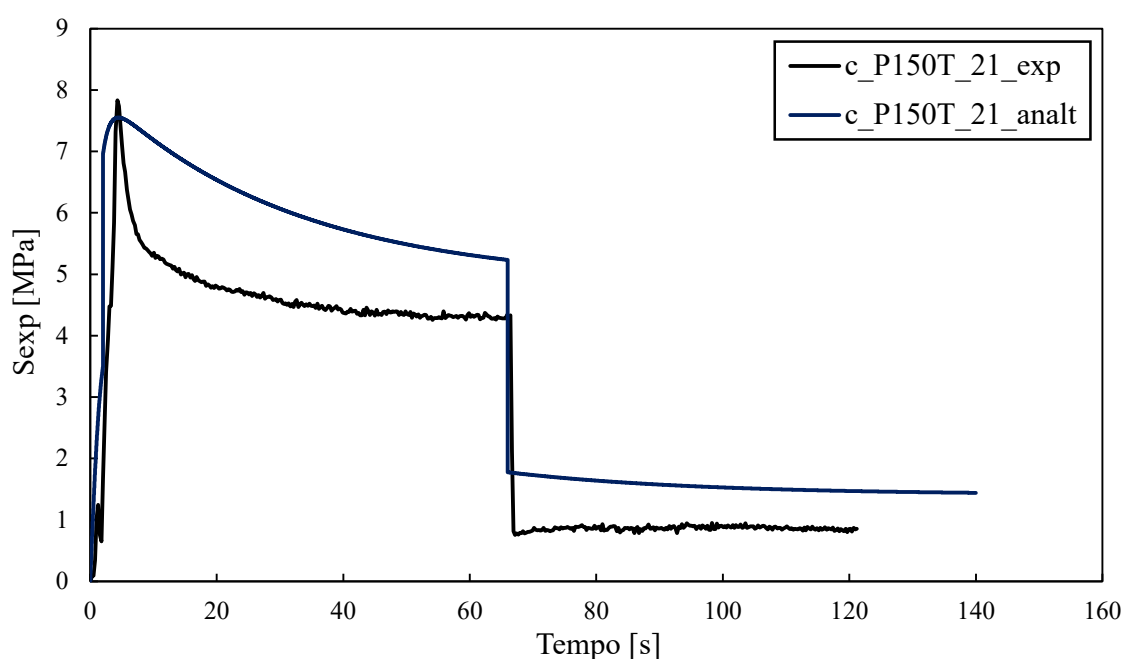
Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 56 pode ser visto a comparação entre a tensão do experimento e do modelo analítico em função do tempo. A plotagem da tensão do modelo numérico não foi realizada, pois como apresentado anteriormente, o numérico e o analítico apresentaram o mesmo comportamento.

Para esta comparação foi definido o tempo zero como o início da rampa da tensão térmica transiente. A partir do momento em que a válvula é fechada, interrompendo o escoamento, a bomba demora 2 segundos para pressurizar o cilindro, portanto foi definido no modelo analítico que a pressão entraria apenas em  $t = 2\text{s}$ . Dessa forma, a partir de 0,01 segundos a convecção interna e externa estão atuando e apenas após 2 segundos o cilindro é pressurizado. Caso a pressão fosse considerada em  $t = 0,01\text{s}$ , o pico apresentaria um deslocamento nos momentos iniciais, não representando o experimento. É importante destacar que as condições para reconstrução são transientes, a partir de 64 segundos a pressão interna é desconsiderada do modelo, buscando representar o experimento.

Neste caso, o pico de tensão termomecânica entre experimento e modelo possuem magnitudes semelhantes. Entretanto, há uma grande diferença no decaimento da tensão transiente, devido a vazão mássica. Uma vez que a válvula é fechada, não há escoamento no interior do cilindro e o coeficiente convectivo não é o mesmo daquele observado no início, até atingir o pico. Em contraponto, o modelo analítico considera o coeficiente convectivo em todo o intervalo avaliado, mantendo um diferencial de temperatura maior entre o interior e exterior do cilindro e consequentemente uma tensão termomecânica transiente mais elevada por um maior tempo. No experimento, o coeficiente convectivo interno é elevado no pico e decai com o fechamento da válvula, fazendo com que o campo de temperatura ao longo da espessura do cilindro se uniformize, diminuindo também a tensão transiente.

Fig. 56 – Comparação do pico de tensão termomecânica experimental e analítico



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 28 apresenta uma comparação entre o pico termomecânico experimental, analítico e numérico quando sobreposto. Para a pressão de 100 bar o erro médio do modelo analítico é 8,8% e do numérico, 8,6%. Em média, a tensão termomecânica é de 5,7 MPa, enquanto quando considerando a soma da parcela e mecânica e térmica (Tabela 26) a média era 6,9 MPa. Para 150 bar o erro médio analítico é 10,5% enquanto o numérico, 10,2%. Neste caso, a média experimental do pico termomecânico é 7,3 MPa, enquanto analisando a soma das parcelas (Tabela 27) é 8,6 MPa.

Esse aumento do pico termomecânico quando avaliado separadamente, indica que o coeficiente convectivo interno não é uniforme durante todo o experimento, afetando os resultados. A diferença média entre modelo analítico e experimento para os 10 casos rodados na configuração 2 é de 9,6%, enquanto os 40 casos rodados na configuração anterior apresentaram uma diferença média de 8,6%. Ambos são resultados próximos, mostrando que foi possível prever o comportamento termomecânica do cilindro. Diferente dos resultados visualizados na *Configuração 1*, as magnitudes de tensão termomecânica da *Configuração 2* são maiores para analítico e numérico do que para o experimento.

Tabela 28 – Comparação dos picos de tensão termomecânica com picos sobrepostos

| Código do exp.    | T <sub>i</sub> [°C] | T <sub>w</sub> [°C] | T <sub>a</sub> [°C] | h <sub>a</sub> [W/mm²K] | P [bar] | St <sub>exp</sub> [MPa] | Sp <sub>exp</sub> [MPa] | Stp <sub>exp</sub> [MPa] | Stp <sub>anal</sub> [MPa] | Stp <sub>anal</sub> dif [%] | Stp <sub>num</sub> [MPa] | Stp <sub>num</sub> dif [%] |
|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------|
| <i>c_P100T_21</i> | 24,3                | 40,7                | 23,1                | 8,81E-05                | 117,2   | 3,05                    | 2,59                    | 5,64                     | 6,23                      | <b>10,4</b>                 | 6,21                     | <b>10,0</b>                |
| <i>c_P100T_22</i> | 23,4                | 39,9                | 22,7                | 8,52E-05                | 110,2   | 3,36                    | 2,39                    | 5,74                     | 6,06                      | <b>5,5</b>                  | 6,04                     | <b>5,1</b>                 |
| <i>c_P100T_23</i> | 24,0                | 40,9                | 23,0                | 8,31E-05                | 110,8   | 3,03                    | 2,25                    | 5,28                     | 6,18                      | <b>17,0</b>                 | 6,15                     | <b>16,6</b>                |
| <i>c_P100T_24</i> | 24,4                | 41,2                | 22,3                | 8,31E-05                | 97,6    | 3,36                    | 2,10                    | 5,46                     | 5,93                      | <b>8,6</b>                  | 5,90                     | <b>8,1</b>                 |
| <i>c_P100T_25</i> | 24,8                | 41,6                | 23,0                | 8,45E-05                | 111,5   | 3,94                    | 2,46                    | 6,39                     | 6,22                      | <b>2,7</b>                  | 6,20                     | <b>3,1</b>                 |
| <i>c_P150T_21</i> | 24,9                | 40,8                | 23,3                | 7,37E-05                | 156,4   | 4,32                    | 3,51                    | 7,83                     | 7,55                      | <b>3,6</b>                  | 7,52                     | <b>4,0</b>                 |
| <i>c_P150T_22</i> | 23,6                | 41,6                | 22,4                | 8,02E-05                | 156,3   | 4,03                    | 3,50                    | 7,52                     | 8,07                      | <b>7,2</b>                  | 8,03                     | <b>6,7</b>                 |
| <i>c_P150T_23</i> | 24,4                | 41,6                | 22,2                | 8,35E-05                | 162,9   | 3,39                    | 3,56                    | 6,95                     | 8,08                      | <b>16,2</b>                 | 8,04                     | <b>15,7</b>                |
| <i>c_P150T_24</i> | 25,2                | 40,9                | 22,1                | 7,10E-05                | 165,9   | 3,10                    | 3,65                    | 6,75                     | 7,78                      | <b>15,4</b>                 | 7,75                     | <b>14,9</b>                |
| <i>c_P150T_25</i> | 24,6                | 42,7                | 21,8                | 8,40E-05                | 156,9   | 3,94                    | 3,53                    | 7,46                     | 8,21                      | <b>10,0</b>                 | 8,17                     | <b>9,5</b>                 |

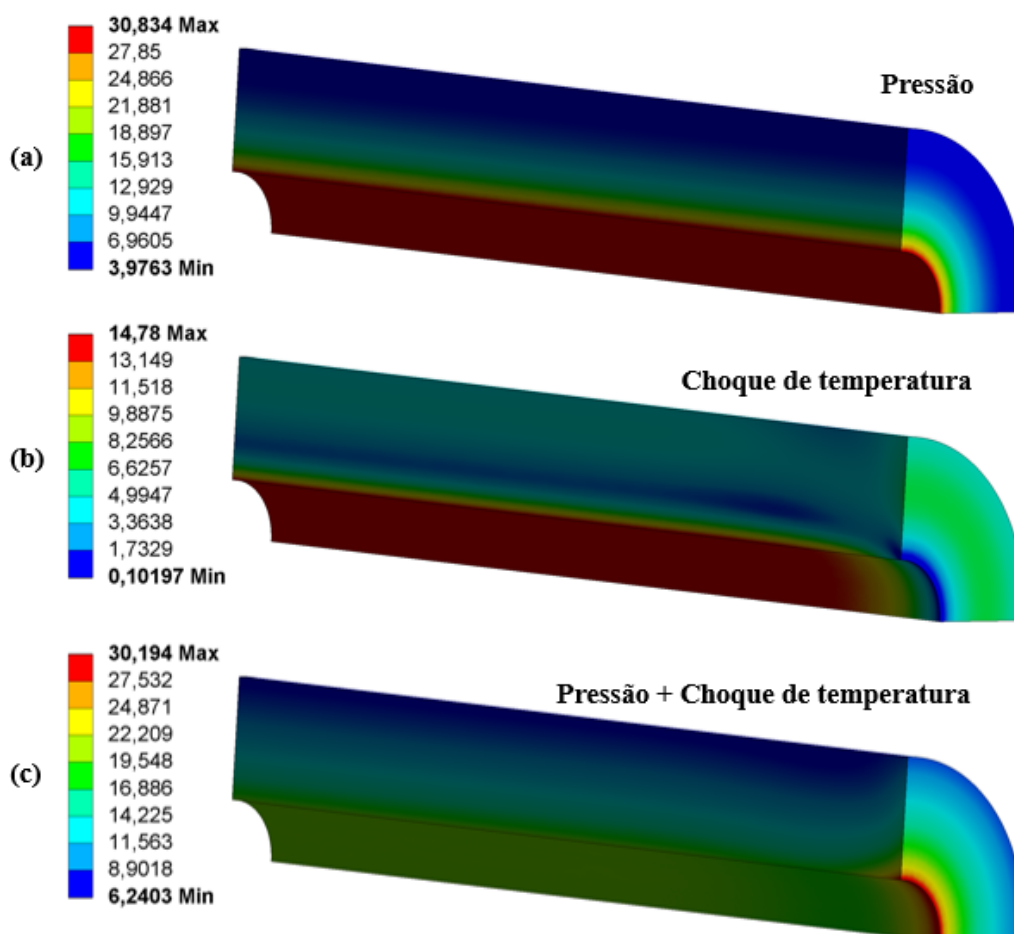
Fonte: Autor (2025).

A Fig. 57 apresenta o campo de tensão termomecânica numérico no cilindro para o experimento *c\_P150T\_21* (150 bar e 20°C). Como experimentalmente não é possível avaliar as tensões na região interna do cilindro, decidiu-se por demonstrar essa análise através do modelo numérico.

Na Fig. 57a pode ser visto as tensões mecânicas no cilindro, devido a pressurização de 156,4 bar, destacando-se a magnitude de tensão em toda a superfície interna do cilindro. A Fig. 57b apresenta as tensões térmicas no cilindro para  $t = 4,74$  s, que é o momento do pico térmico. Ao comparar as duas primeiras imagens fica claro que na superfície interna a pressão apresenta um maior efeito na magnitude de tensão. Ao analisar as tensões termomecânicas (no momento do pico, Fig. 57c) pode ser visto que o estresse máximo ocorre na extremidade livre do cilindro (direita), e é igual ao valor da tensão puramente mecânica. Isso ocorre pois não há tensão térmica na extremidade livre do cilindro, uma vez que está distante de qualquer restrição de movimento. O lado esquerdo representa a metade do cilindro, onde é aplicado a simetria e realizado a comparação com os dados experimentais e analíticos.

O choque de temperatura não aumenta a magnitude de tensão na superfície interna, ele alivia. Esse comportamento ocorre, pois, a tensão circunferencial é aliviada devido ao choque de temperatura. O mesmo não ocorre na superfície externa, pois a componente circunferencial se soma com o choque de temperatura e pressão.

Fig. 57 – Campo de tensões do cilindro (*von Mises*): (a) Tensões mecânicas; (b) Tensões térmicas e (c) Tensões termomecânicas;



Fonte: Autor (2025).

## 4.2 PROTÓTIPO ESTRUTURAL *SLMHE*

### 4.2.1 Tensão termomecânica transiente

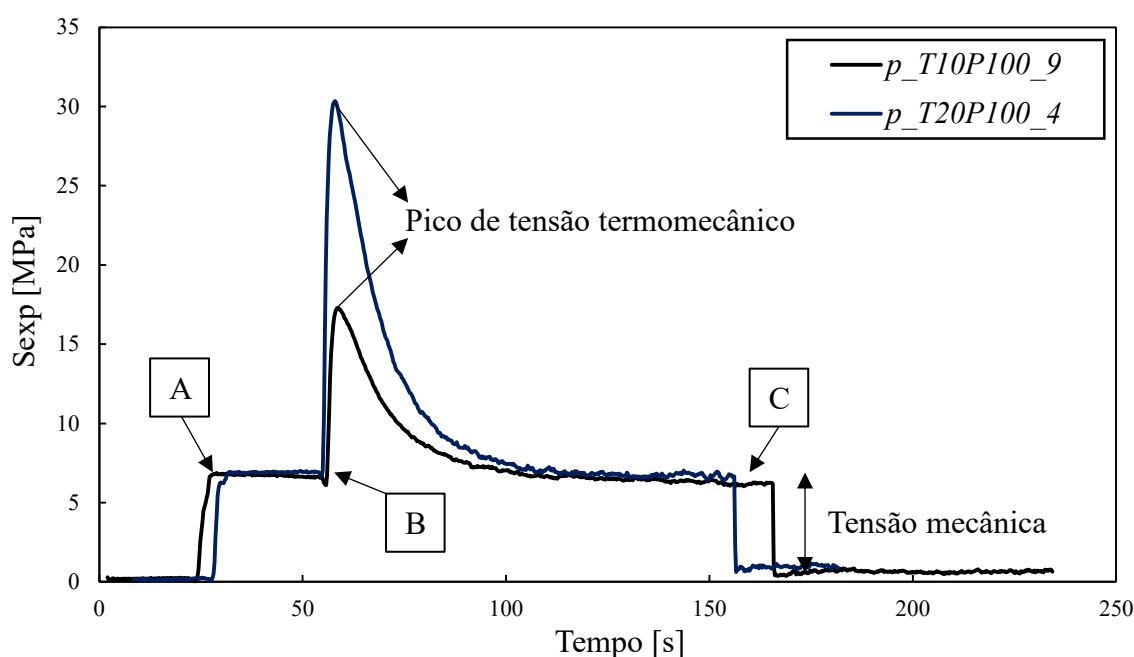
O protótipo do trocador de calor permite a avaliação termomecânica simultânea. Ao mesmo tempo que um ramal está sob pressão interna, no outro é desenvolvido um escoamento para gerar o choque térmico. O experimento consiste em pressurizar a amostra a uma pressão constante, o que gera uma resposta de tensão, e posteriormente liberar o escoamento de água quente para induzir a tensão térmica transiente. O objetivo aqui é demonstrar o caso crítico de operação de um trocador de calor, quando as tensões são sobrepostas. A metodologia experimental foi apresentada na seção 3.1.5.1 e as amostras foram testadas com  $\Delta T = 10$  e  $20^\circ\text{C}$  e pressões de 100 e 200 bar.

A Fig. 58 apresenta o gráfico tensão no tempo para a tensão medida na superfície superior do protótipo. São ilustrados dois casos no gráfico da tensão termomecânica transiente, choque de temperatura de 10°C e 20°C, ambos com pressão de 100 bar.

Inicialmente não há tensão alguma na superfície até o momento em que ocorre a pressurização interna, gerando um degrau de tensão que se mantém constante (A). Neste momento a amostra está em temperatura ambiente. Posteriormente é liberado o fluxo de água quente no ramal cruzado (B), induzindo o aumento de temperatura no interior da amostra e gerando um pico de tensão termomecânica transiente. A tensão térmica vai reduzindo conforme a temperatura é uniformizada na amostra, fazendo com que a tensão retorne para os valores observados no início do experimento – apenas tensão mecânica. Ao final do experimento a pressão interna é aliviada (C).

Para o diferencial de 10°C o pico de tensão termomecânica é 17,3 MPa, enquanto para 20°C a magnitude é 30,6 MPa. Quando analisando as parcelas separadamente, é importante destacar que o pico de tensão térmica é 36,5% e 69,2% maior do que o nível de tensão mecânica para 100 bar e  $\Delta T$  de 10°C e 20°C, respectivamente. As condições para os experimentos, temperatura, pressão e coeficiente convectivo, serão apresentados posteriormente.

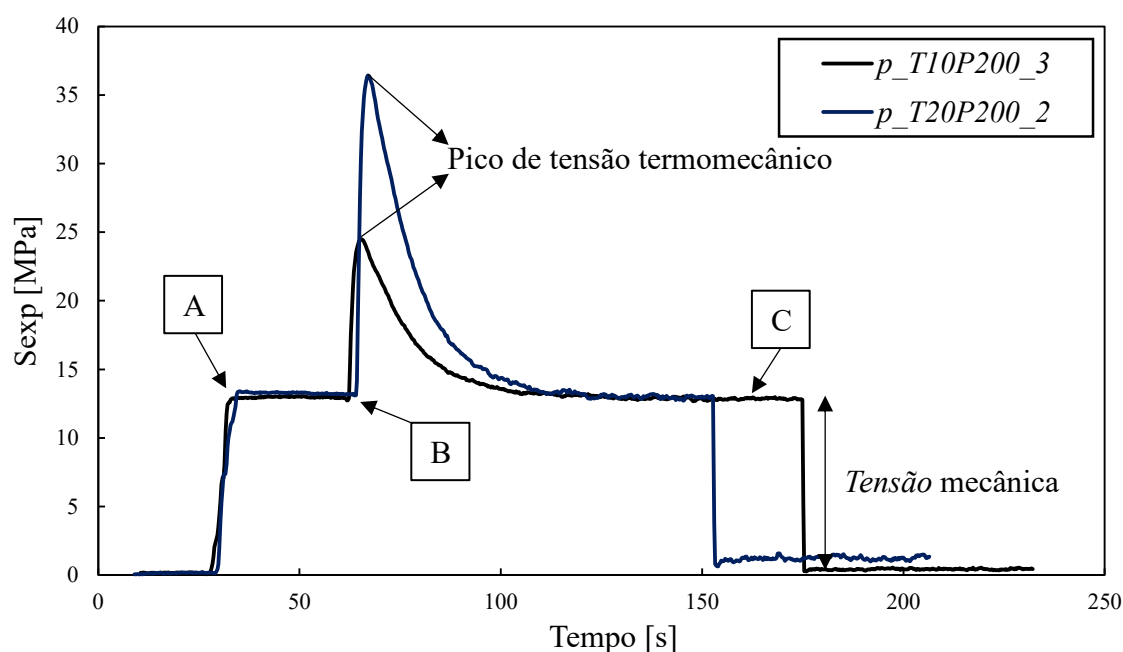
Fig. 58 – Tensão termomecânica transiente no protótipo do trocador de calor para choques de temperatura de 10°C e 20°C e pressão de 100 bar



Fonte: Autor (2025).

É importante ressaltar que tanto a pressão quanto o choque de temperatura induzem tensões de tração na superfície da amostra, sobrepondo as tensões. Na Fig. 59 são apresentados dois experimentos com diferencial de temperatura de 10°C e 20°C e pressão de 200 bar. Os picos de tensão termomecânica são 24,5 MPa e 36,4 MPa, respectivamente. As tensões mecânicas são superiores àquelas do gráfico anterior, mas a parcela térmica não se alterou, visto que foram empregados os mesmos valores de diferenciais de temperatura. Devido a isso, o pico de tensão térmica é 12,2% menor do que a tensão mecânica para 10°C e 42,9% maior do que a tensão mecânica para 20°C.

Fig. 59 – Tensão termomecânica transiente no protótipo do trocador de calor para choques de temperatura de 10°C e 20°C e pressão de 200 bar



Fonte: Autor (2025).

Além dos experimentos realizados no protótipo, o modelo numérico também foi empregado. O objetivo foi avaliar a magnitude da tensão crítica termomecânica: pico de tensão transiente térmica somada com a tensão mecânica. Assim como nos experimentos de tensão térmica transiente no cilindro, apresentados na seção 4.1.1, o valor de vazão mássica é retirado pontualmente no mesmo momento do pico de tensão termomecânica neste caso para avaliar os valores de tensão numérica.

Para o modelo numérico é preciso definir uma condição temporal. A resposta mecânica à pressão definida é imediata e constante. O valor da tensão mecânica é retirado 10 segundos antes do pico termomecânico, definido como  $S_p$ . Com relação a tensão térmica é diferente, pois

depende do desenvolvimento do campo de temperatura no protótipo. Observou-se que o pico de tensão térmica, e consequente termomecânica, ocorre entre 2s e 3s após a liberação do fluxo quente.

O código do experimento  $p\_T10P100\_1$  remete ao diferencial de temperatura “ $T10$ ” e a pressão interna “ $P100$ ”. O termo  $p$  significa que é o teste com o protótipo. A Tabela 29 Tabela 28 apresenta um compilado dos resultados experimentais e numéricos, para  $\Delta T = 10$  e  $20^\circ\text{C}$ . A diferença das tensões entre os experimentos se deve a dificuldade de manter os parâmetros nos testes, principalmente a pressão e levemente a temperatura e vazão.

Para o diferencial de  $10^\circ\text{C}$ , o maior pico de tensão termomecânica (19,5 MPa) ocorre no experimento com o maior diferencial de temperatura (10,1  $^\circ\text{C}$ ). Por outro lado, o teste com o maior coeficiente convectivo ( $p\_T10P100\_3$ ), também resultou em um pico de tensão termomecânico semelhante, 19,35 MPa. Isso demonstra o aumento da tensão termomecânica com o aumento do coeficiente convectivo e diferencial de temperatura entre os ramais.

O menor erro do modelo numérico foi observado com os parâmetros do experimento  $p\_T10P100\_10$  e é de 0,8% e a maior diferença entre modelo e experimento foi observada no  $p\_T10P100\_7$ , igual a 5,4%. A diferença média entre tensão termomecânica experimental e numérica é de 2,5%, o que confere ao modelo alta acurácia em prever o campo de tensão termomecânica em um protótipo de trocador de calor.

Analogamente, no diferencial de temperatura de  $20^\circ\text{C}$  o maior valor de tensão termomecânica é visto no experimento  $p\_T20P100\_2$ , igual a 30,8 MPa. Este caso é um dos casos com maior diferencial de temperatura,  $18,5^\circ\text{C}$  e o caso com a maior pressão interna, 121,5 bar, o que contribui para ser o caso com maior tensão termomecânica. Para o diferencial de temperatura de  $20^\circ\text{C}$ , a tensão térmica é significativamente maior do que a tensão mecânica, chegando a ser 69% superior. A diferença média foi de 3,6%, com um máximo de 7,8% ( $p\_T20P100\_4$ ) e mínimo de 0,4% ( $p\_T20P100\_9$ ).

Tabela 29 – Valores de tensão termomecânica transiente no protótipo em comparação com os resultados numéricos – P = 100bar

| Código do exp.      | T <sub>i</sub><br>[°C] | T <sub>w</sub><br>[°C] | h <sub>c</sub><br>[W/mm²K] | P<br>[bar] | Sp <sub>exp</sub><br>[MPa] | St <sub>pexp</sub><br>[MPa] | u <sub>exp</sub><br>(St <sub>p</sub> )<br>[MPa] | St <sub>exp</sub><br>[MPa] | Sp <sub>num</sub><br>[MPa] | St <sub>num</sub><br>[MPa] | St <sub>pnum</sub><br>[MPa] | dif <sub>num</sub><br>[%] |
|---------------------|------------------------|------------------------|----------------------------|------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| <i>p_T10P100_1</i>  | 21,7                   | 31,8                   | 0,00466                    | 98,7       | 6,70                       | 19,52                       | 0,607                                           | 12,82                      | 6,52                       | 12,38                      | 18,90                       | <b>3,2</b>                |
| <i>p_T10P100_2</i>  | 21,8                   | 31,6                   | 0,00567                    | 114,5      | 7,06                       | 19,37                       | 0,630                                           | 12,31                      | 7,56                       | 12,51                      | 20,07                       | <b>3,6</b>                |
| <i>p_T10P100_3</i>  | 21,9                   | 31,4                   | 0,00635                    | 114,9      | 7,33                       | 19,35                       | 0,629                                           | 12,02                      | 7,58                       | 12,38                      | 19,96                       | <b>3,1</b>                |
| <i>p_T10P100_4</i>  | 21,9                   | 31,3                   | 0,00436                    | 103,5      | 6,57                       | 18,47                       | 0,589                                           | 11,90                      | 6,83                       | 11,35                      | 18,18                       | <b>1,5</b>                |
| <i>p_T10P100_5</i>  | 21,7                   | 30,8                   | 0,00533                    | 99,8       | 6,34                       | 17,74                       | 0,554                                           | 11,40                      | 6,59                       | 11,48                      | 18,06                       | <b>1,8</b>                |
| <i>p_T10P100_6</i>  | 21,7                   | 31,4                   | 0,00425                    | 103,6      | 6,60                       | 18,76                       | 0,568                                           | 12,16                      | 6,84                       | 11,64                      | 18,48                       | <b>1,5</b>                |
| <i>p_T10P100_7</i>  | 22,0                   | 31,3                   | 0,00335                    | 109,1      | 6,99                       | 18,74                       | 0,604                                           | 11,76                      | 7,20                       | 10,52                      | 17,72                       | <b>5,4</b>                |
| <i>p_T10P100_8</i>  | 22,0                   | 31,5                   | 0,00574                    | 107,5      | 6,95                       | 18,76                       | 0,611                                           | 11,81                      | 7,09                       | 12,15                      | 19,24                       | <b>2,6</b>                |
| <i>p_T10P100_9</i>  | 22,1                   | 30,6                   | 0,00489                    | 106,9      | 6,72                       | 17,29                       | 0,558                                           | 10,58                      | 7,06                       | 10,52                      | 17,58                       | <b>1,7</b>                |
| <i>p_T10P100_10</i> | 22,5                   | 30,8                   | 0,00481                    | 112,1      | 7,25                       | 17,49                       | 0,567                                           | 10,24                      | 7,40                       | 10,23                      | 17,63                       | <b>0,8</b>                |
| <i>p_T20P100_1</i>  | 22,1                   | 40,5                   | 0,00659                    | 121,5      | 7,54                       | 30,50                       | 0,882                                           | 22,96                      | 8,02                       | 24,13                      | 32,15                       | <b>5,4</b>                |
| <i>p_T20P100_2</i>  | 22,1                   | 40,6                   | 0,00665                    | 121,4      | 7,52                       | 30,78                       | 0,832                                           | 23,26                      | 8,01                       | 24,31                      | 32,31                       | <b>5,0</b>                |
| <i>p_T20P100_3</i>  | 22,3                   | 40,8                   | 0,00728                    | 106,2      | 6,65                       | 30,08                       | 0,876                                           | 23,43                      | 7,01                       | 24,67                      | 31,68                       | <b>5,3</b>                |
| <i>p_T20P100_4</i>  | 22,3                   | 40,8                   | 0,00364                    | 104,1      | 7,21                       | 30,62                       | 0,917                                           | 23,41                      | 6,87                       | 21,38                      | 28,25                       | <b>7,8</b>                |
| <i>p_T20P100_5</i>  | 21,9                   | 40,5                   | 0,00597                    | 109,4      | 6,99                       | 30,52                       | 0,926                                           | 23,53                      | 7,22                       | 23,96                      | 31,18                       | <b>2,2</b>                |
| <i>p_T20P100_6</i>  | 22,1                   | 40,7                   | 0,00706                    | 108,8      | 7,02                       | 30,45                       | 0,902                                           | 23,43                      | 7,18                       | 24,69                      | 31,87                       | <b>4,7</b>                |
| <i>p_T20P100_7</i>  | 22,6                   | 40,7                   | 0,00569                    | 105,4      | 6,75                       | 29,73                       | 0,894                                           | 22,97                      | 6,95                       | 23,10                      | 30,05                       | <b>1,1</b>                |
| <i>p_T20P100_8</i>  | 22,8                   | 40,7                   | 0,00647                    | 120,7      | 7,71                       | 30,56                       | 0,846                                           | 22,85                      | 7,97                       | 23,39                      | 31,36                       | <b>2,6</b>                |
| <i>p_T20P100_9</i>  | 22,0                   | 40,6                   | 0,00515                    | 109,1      | 6,90                       | 30,35                       | 0,862                                           | 23,45                      | 7,20                       | 23,28                      | 30,47                       | <b>0,4</b>                |
| <i>p_T20P100_10</i> | 22,2                   | 40,5                   | 0,00589                    | 109,7      | 6,86                       | 30,26                       | 0,860                                           | 23,40                      | 7,24                       | 23,52                      | 30,76                       | <b>1,6</b>                |

Fonte: Autor (2025).

A Tabela 30 apresenta os resultados de tensão termomecânica para diferenças de temperatura de 10°C e 20°C com pressão de 200 bar. Para esse conjunto experimental, a tensão mecânica é em média 12% maior do que a tensão térmica com  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ , a menor diferença entre modelo e experimento é de 0,4% (*p\_T10P200\_3*), enquanto a maior é 4,9% (*p\_T10P200\_1*), com uma média de 2,6%. Para o caso do diferencial de 20°C, a tensão térmica é em média 42% maior do que a mecânica. A maior diferença entre modelo numérico e experimento foi de 3,8%, a menor 0,2% e a média 2,1%. Este conjunto é o que apresenta o maior pico de tensão termomecânica, pois apresenta o maior diferencial de temperatura e maior pressão (20°C e 200 bar).

Tabela 30 – Valores de tensão termomecânica transiente no protótipo em comparação com os resultados numéricos – P = 200bar

| Código do exp.      | T <sub>i</sub> [°C] | T <sub>w</sub> [°C] | h <sub>c</sub> [W/mm²K] | P [bar] | Sp <sub>exp</sub> [MPa] | Stp <sub>exp</sub> [MPa] | u <sub>exp</sub> (Stp) [MPa] | St <sub>exp</sub> [MPa] | Sp <sub>num</sub> [MPa] | St <sub>num</sub> [MPa] | Stp <sub>num</sub> [MPa] | dif <sub>num</sub> [%] |
|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|---------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|
| <i>p_T10P200_1</i>  | 22,0                | 31,3                | 0,00575                 | 205,0   | 12,87                   | 24,23                    | 0,794                        | 11,37                   | 13,53                   | 11,90                   | 25,43                    | <b>4,9</b>             |
| <i>p_T10P200_2</i>  | 21,8                | 31,4                | 0,00382                 | 197,5   | 13,31                   | 25,06                    | 0,821                        | 11,75                   | 13,03                   | 11,24                   | 24,27                    | <b>3,1</b>             |
| <i>p_T10P200_3</i>  | 22,1                | 31,5                | 0,00436                 | 201,1   | 12,97                   | 24,52                    | 0,805                        | 11,55                   | 13,27                   | 11,35                   | 24,62                    | <b>0,4</b>             |
| <i>p_T10P200_4</i>  | 22,1                | 31,5                | 0,00520                 | 200,1   | 12,76                   | 24,40                    | 0,795                        | 11,63                   | 13,21                   | 11,79                   | 24,99                    | <b>2,4</b>             |
| <i>p_T10P200_5</i>  | 22,2                | 31,5                | 0,00569                 | 202,5   | 13,05                   | 24,37                    | 0,793                        | 11,32                   | 13,36                   | 11,87                   | 25,23                    | <b>3,5</b>             |
| <i>p_T10P200_6</i>  | 22,2                | 31,4                | 0,00500                 | 202,7   | 12,98                   | 24,30                    | 0,794                        | 11,32                   | 13,38                   | 11,44                   | 24,81                    | <b>2,1</b>             |
| <i>p_T10P200_7</i>  | 22,3                | 31,4                | 0,00628                 | 200,1   | 13,03                   | 24,25                    | 0,794                        | 11,22                   | 13,20                   | 11,83                   | 25,03                    | <b>3,2</b>             |
| <i>p_T10P200_8</i>  | 22,1                | 31,4                | 0,00466                 | 201,9   | 12,96                   | 24,25                    | 0,795                        | 11,29                   | 13,32                   | 11,40                   | 24,72                    | <b>1,9</b>             |
| <i>p_T10P200_9</i>  | 22,2                | 31,5                | 0,00430                 | 202,3   | 13,07                   | 24,36                    | 0,800                        | 11,29                   | 13,35                   | 11,18                   | 24,53                    | <b>0,7</b>             |
| <i>p_T10P200_10</i> | 22,0                | 31,4                | 0,00608                 | 198,9   | 12,76                   | 24,35                    | 0,797                        | 11,59                   | 13,12                   | 12,15                   | 25,27                    | <b>3,8</b>             |
| <i>p_T20P200_1</i>  | 22,4                | 40,7                | 0,00594                 | 200,0   | 12,73                   | 35,66                    | 1,163                        | 22,94                   | 13,20                   | 23,55                   | 36,75                    | <b>3,0</b>             |
| <i>p_T20P200_2</i>  | 22,4                | 40,7                | 0,00474                 | 208,7   | 13,24                   | 36,43                    | 1,186                        | 23,18                   | 13,77                   | 22,51                   | 36,28                    | <b>0,4</b>             |
| <i>p_T20P200_3</i>  | 22,6                | 39,5                | 0,00733                 | 209,4   | 13,42                   | 35,03                    | 1,141                        | 21,61                   | 13,81                   | 22,56                   | 36,37                    | <b>3,8</b>             |
| <i>p_T20P200_4</i>  | 22,7                | 40,8                | 0,00696                 | 213,2   | 13,90                   | 36,90                    | 1,196                        | 23,01                   | 14,07                   | 23,96                   | 38,03                    | <b>3,1</b>             |
| <i>p_T20P200_5</i>  | 22,6                | 40,8                | 0,00658                 | 203,4   | 13,12                   | 36,25                    | 1,178                        | 23,13                   | 13,42                   | 23,86                   | 37,28                    | <b>2,8</b>             |
| <i>p_T20P200_6</i>  | 22,6                | 40,8                | 0,00550                 | 204,2   | 13,11                   | 36,40                    | 1,178                        | 23,29                   | 13,47                   | 23,08                   | 36,55                    | <b>0,4</b>             |
| <i>p_T20P200_7</i>  | 22,6                | 40,8                | 0,00658                 | 202,3   | 13,02                   | 36,19                    | 1,180                        | 23,17                   | 13,35                   | 23,86                   | 37,21                    | <b>2,8</b>             |
| <i>p_T20P200_8</i>  | 22,2                | 40,2                | 0,00652                 | 200,8   | 12,89                   | 35,71                    | 1,161                        | 22,82                   | 13,25                   | 23,56                   | 36,81                    | <b>3,1</b>             |
| <i>p_T20P200_9</i>  | 22,7                | 40,6                | 0,00592                 | 203,0   | 13,08                   | 35,63                    | 1,163                        | 22,55                   | 13,40                   | 23,01                   | 36,41                    | <b>2,2</b>             |
| <i>p_T20P200_10</i> | 22,5                | 40,5                | 0,00638                 | 198,3   | 13,35                   | 36,46                    | 1,187                        | 23,10                   | 13,08                   | 23,46                   | 36,55                    | <b>0,2</b>             |

Fonte: Autor (2025).

A incerteza experimental média, considerando os 4 conjuntos experimentais, é cerca de 3% do valor do pico de tensão termomecânica, valor semelhante ao erro encontrado nos testes.

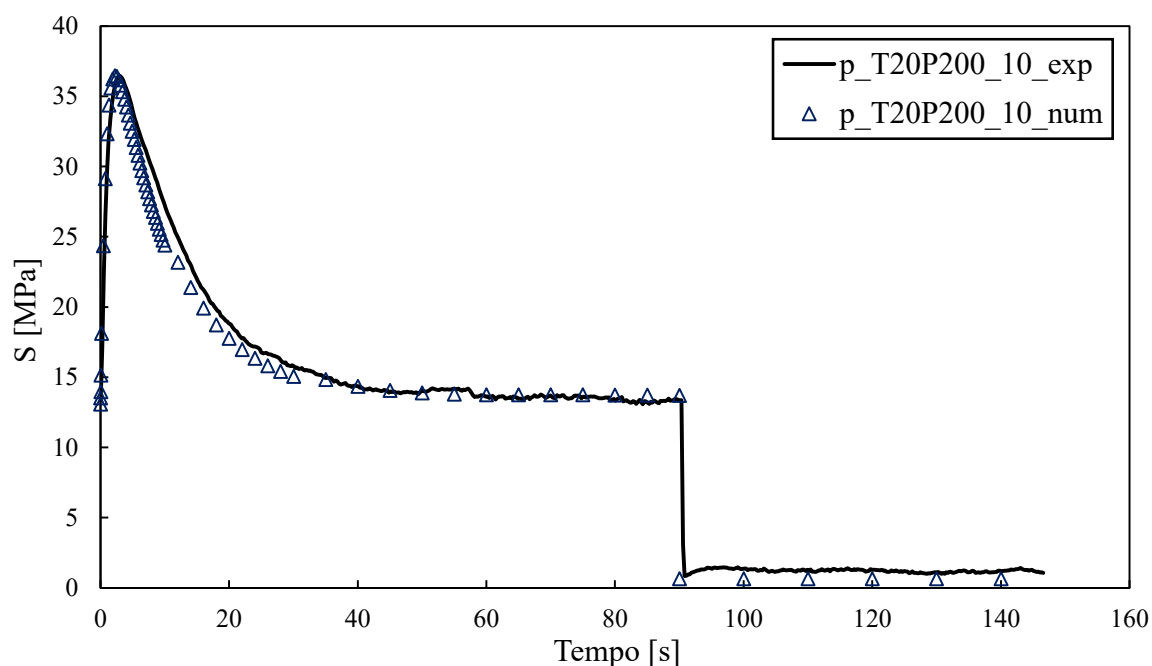
A Fig. 60 mostra uma reconstrução do experimento *p\_T20P200\_10* no modelo numérico – baseando-se no procedimento experimental. Em um primeiro momento foi empregada apenas a pressão em um dos ramais (tensão mecânica) e na sequência foi aplicado a condição de convecção forçada de água a 40,5 °C. Para finalizar, após atingir o regime permanente, foi cessada a pressão. Essa reconstrução caracteriza condições transientes de carregamento aplicadas no modelo numérico.

Para essa reconstrução foram utilizados três degraus diferentes de tempo para avaliar a tensão. Entre 0 e 10 segundos, foi utilizado um degrau de tempo máximo de 0,3 segundos. Entre 10 segundos e 30 segundos, o degrau máximo é 2 segundos. Entre 30 segundos e 90 segundos, o degrau de tempo é 5 segundos. Este procedimento foi empregado para poder

analisar os diferentes momentos do experimento, caracterizado por um aumento rápido da tensão no início e depois uma longa redução. Não foi possível analisar os 90 segundos sob um degrau de 0,3 segundos, pois o arquivo de solução se tornava extenso (*ITB*), não havendo espaço computacional disponível.

Na Fig. 60 é possível visualizar que não somente o valor do pico de tensão, mas também o decaimento da tensão é muito similar entre o modelo e o experimento. Isso se deve a precisão no momento de avaliar os parâmetros de temperatura, vazão e pressão no experimento, fazendo com que estes mesmos parâmetros sejam implementados ao modelo. A tensão equivalente apresentada na Fig. 60 é medida na superfície (Fig. 25).

Fig. 60 – Comparação entre modelo numérico e experimento da tensão termomecânica transiente para o caso  $p\_T20P200\_10$

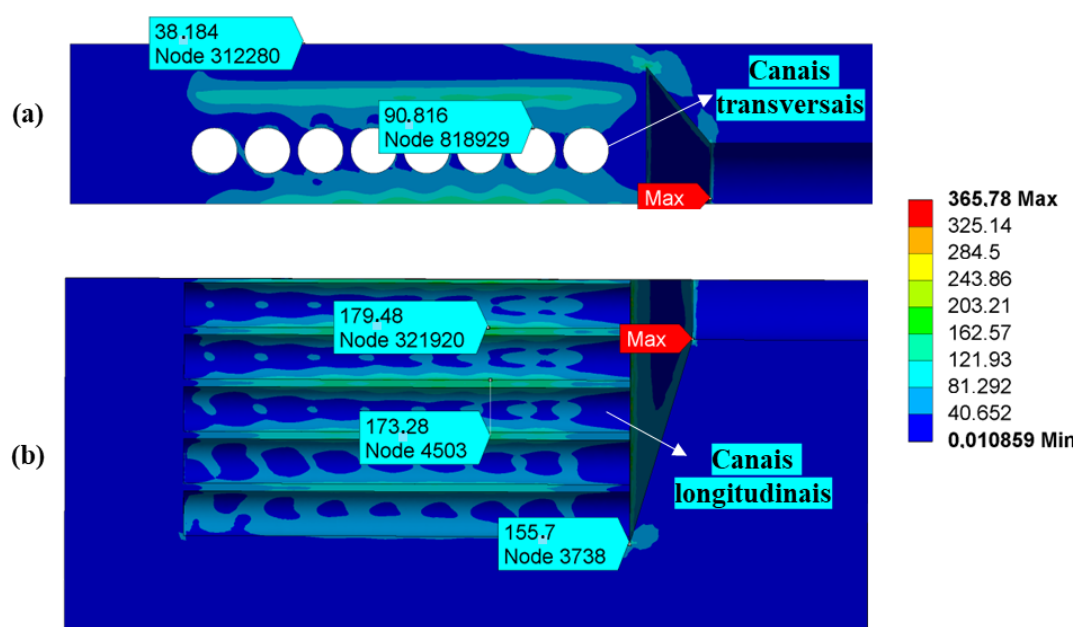


Fonte: Autor (2025).

A Fig. 61 mostra o campo de tensões no protótipo para o experimento  $p\_T20P200\_4$  no instante do pico da tensão termomecânica na superfície ( $t = 2,14s$ ). Na Fig. 61a é apresentado uma vista esquerda do protótipo, mostrando o valor de 38,2 MPa na região onde o extensômetro foi fixado e os canais transversais. A Fig. 61b apresenta a vista inferior do protótipo, onde é possível visualizar o interior dos canais longitudinais. Devido à baixa espessura de parede entre canais, essa é uma localização crítica do protótipo.

A tensão na parede dos canais longitudinais ficou próxima a 180 MPa para o tempo de 2,14s, enquanto nos transversais a tensão mostrada é 90,8 MPa. Como ambos tem a mesma configuração, isso quer dizer que a essa tensão nos canais longitudinais é um efeito da pressurização. Devido à pequena espessura de parede entre as camadas de canais, as tensões térmicas são menos acentuadas, visto que ocorre uma rápida uniformização da temperatura. É também mostrado a tensão máxima de 365 MPa na amostra, que ocorre no interstício entre a pressão e o engaste, gerando essa singularidade de tensão que deve ser desconsiderada.

Fig. 61 – Campo de tensões no protótipo para o caso  $p\_T20P200\_4$ : (a) vista lateral; (b) vista inferior



Fonte: Autor (2025).

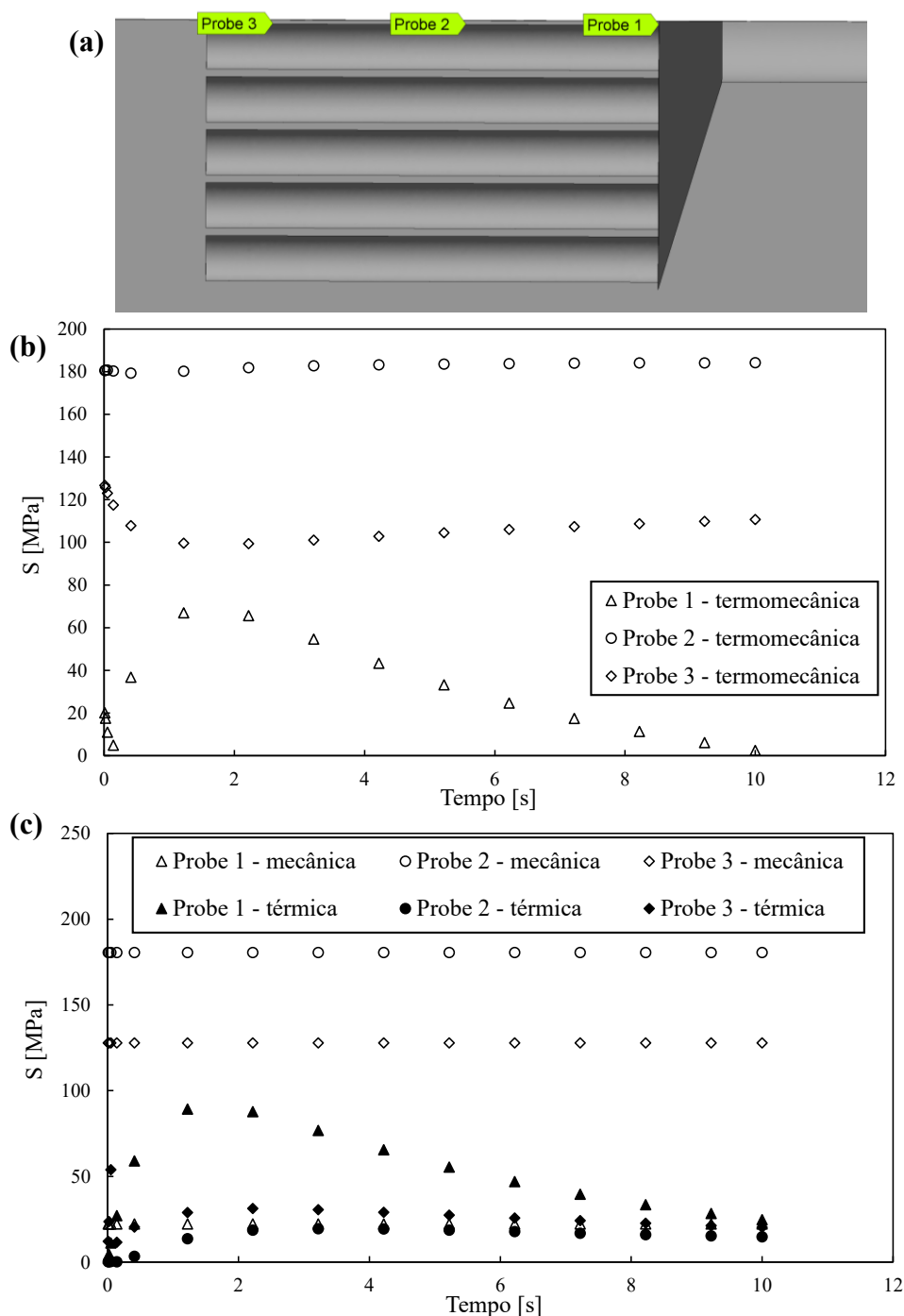
A Fig. 61 mostra o campo de tensão termomecânica em todo o protótipo. No caso analisado, a tensão mecânica é dominante por todo o intervalo para o centro dos canais longitudinais. No entanto, o estresse muda ao longo do tempo devido à variação da temperatura. A Fig. 62a destaca três regiões diferentes: o início do canal longitudinal (*Probe 1*), o meio do canal longitudinal (*Probe 2*) e o final do canal longitudinal (*Probe 3*).

A Fig. 62b apresenta a variação da tensão com o tempo para as três regiões. Para a tensão termomecânica na região 2, não há variação significativa do estresse termomecânico ao longo do tempo (máximo de 184,1 MPa). Valores semelhantes podem ser vistos na tensão mecânica (180,5 MPa), mostrando que a tensão nesta região é controlada pela pressão interna. A região 3 apresenta um comportamento semelhante ao da 2, onde a parcela mecânica (127,8

MPa) é superior a térmica (máximo de 31 MPa), resultando em um estresse termomecânico de 126,7 MPa para  $t = 0,01$  segundos e 110,7 MPa em regime.

O mesmo não ocorre para o *Probe 1*, onde a tensão termomecânica começa em zero, aumenta para 75 MPa e depois retorna a zero, indicando que a tensão térmica transiente é a principal responsável pelo comportamento. A tensão mecânica em 1 é constante e igual a 20 MPa, enquanto a tensão térmica começa em zero e aumenta para 90 MPa. Nessa região, a pressurização e o choque térmico não se sobrepõem, pois a tensão termomecânica não é maior que a tensão térmica.

Fig. 62 – Tensão equivalente em função do tempo: (a) posição de medição; (b) tensão termomecânica e (c) parcelas térmicas e mecânicas isoladas



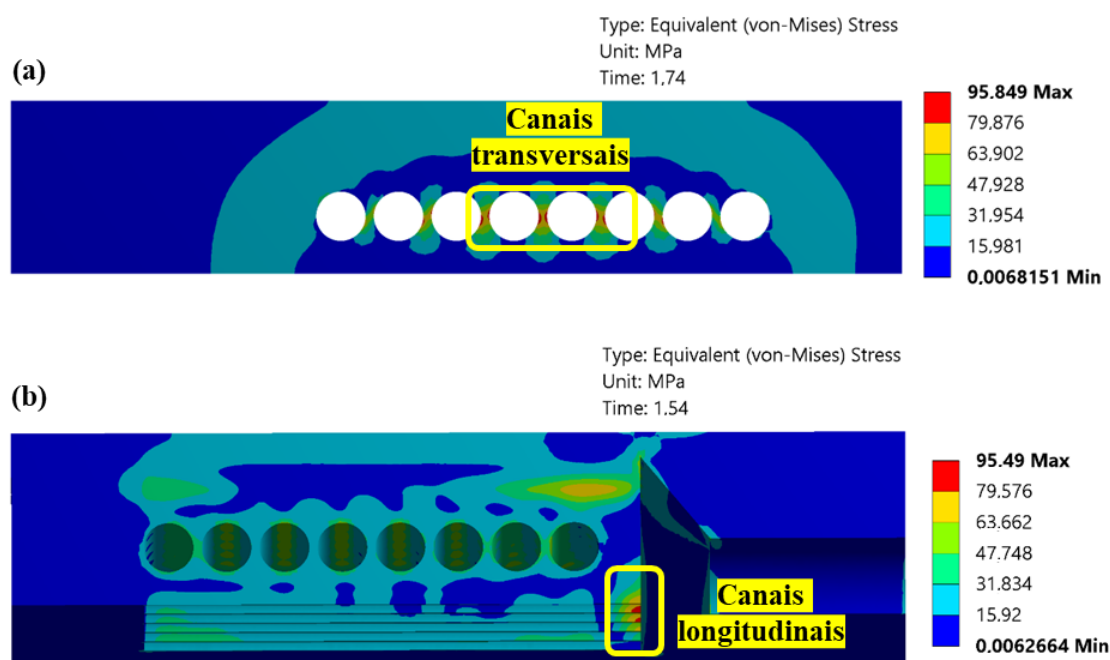
Fonte: Autor (2025).

Para comprovar que, neste caso, a tensão crítica é proveniente principalmente da pressão, foi também realizada uma simulação de tensão puramente térmica. A tensão térmica transiente depende do campo de temperatura no protótipo, atingindo seu pico em diferentes tempos para diferentes regiões. As duas regiões destacadas na Fig. 63 são diferentes da região

onde a tensão está próxima de 180 MPa na Fig. 61b, que é em sua maioria uma resposta a pressurização interna.

A Fig. 63 apresenta uma representação de tensões transientes puramente térmicas. A Fig. 63a mostra que o pico de tensão ocorre em 1,74 segundos na parede entre os canais transversais (àqueles que recebem o escoamento quente) e em 1,54 segundos nos canais longitudinais (Fig. 63b), ambos apresentando uma magnitude de tensão igual a 96 MPa. Ambos trabalhos de Pra et al. (2018) e Zhao et al. (2019) concordam que a região crítica dos trocadores devido a carga térmica é a seção de entrada dos canais, como fica claro na Fig. 63b.

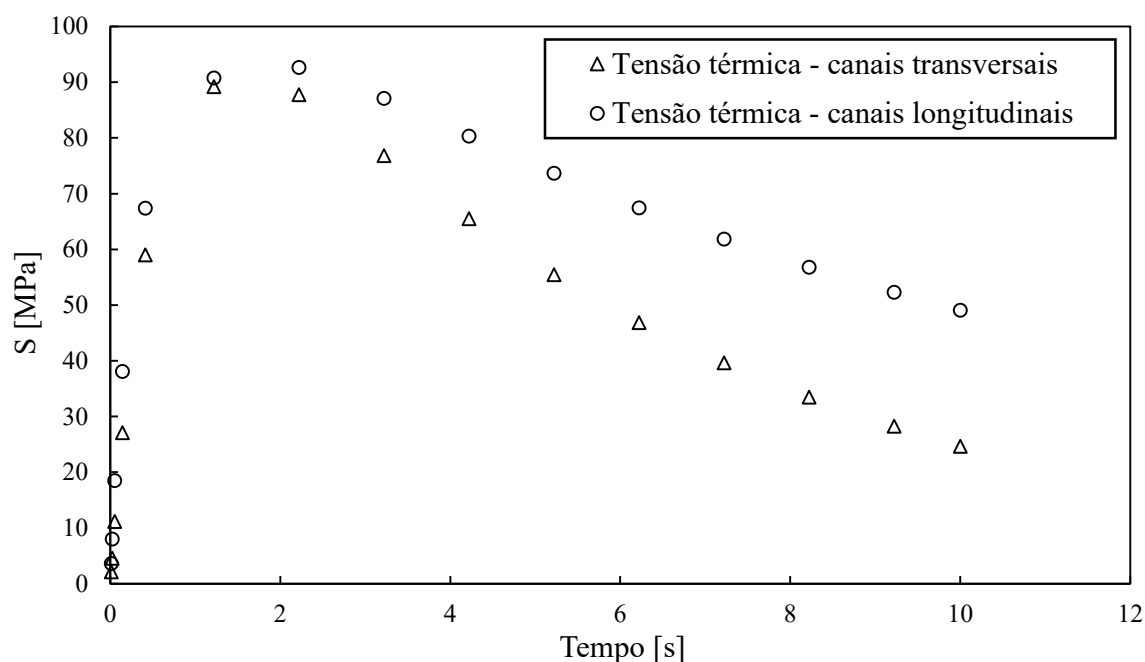
Fig. 63 – Tensão térmica transiente máxima na parede entre canais: (a) transversais; (b) longitudinais



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 64 apresenta o comportamento da tensão térmica em função do tempo para os canais longitudinais e transversais. No gráfico podemos observar o momento em que ocorre o pico de tensão térmico. Após 10 segundos, as tensões reduzem consideravelmente, visto que a amostra atinge o equilíbrio térmico. Podemos verificar que as tensões térmicas são inferiores a maior magnitude de tensão mostrada Fig. 62.

Fig. 64 – Tensão térmica transiente em função do tempo nas regiões críticas para tensão térmica

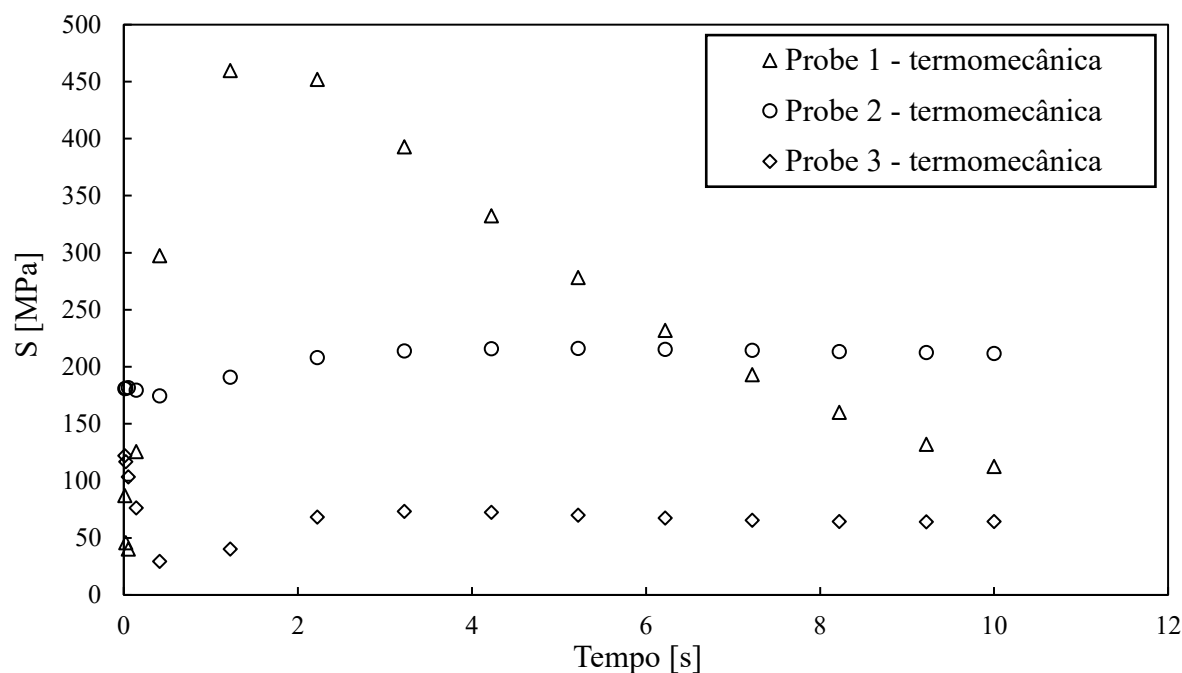


Fonte: Autor (2025).

Uma investigação final foi realizada, uma vez que a tensão depende de componentes térmicas e mecânicas, apresentados na Fig. 65. Um fluxo de água quente a  $T = 120^{\circ}\text{C}$  com o mesmo coeficiente convectivo e pressão do caso  $p\_T20P200\_4$  ( $P = 200$  bar e  $\dot{m} = 0,007$ ), foi estudado. Este caso resultou em um diferencial de temperatura de  $100^{\circ}\text{C}$ , semelhante ao diferencial de temperatura de trocadores reais.

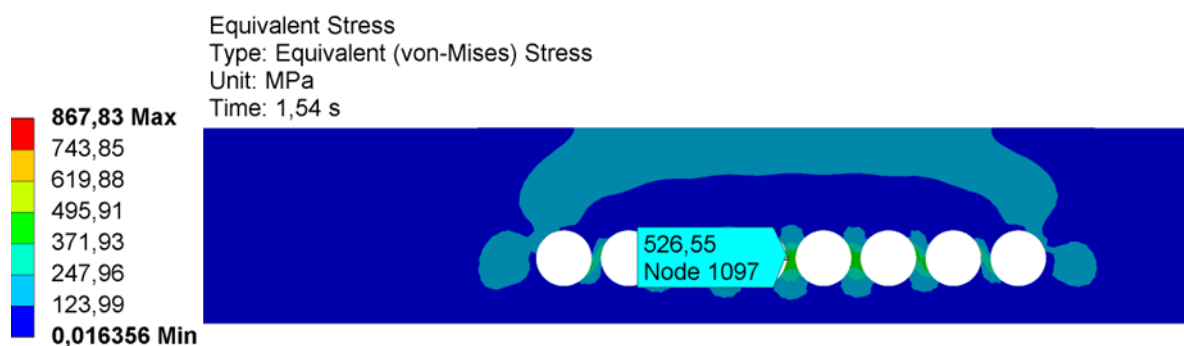
As três regiões de tensão apresentadas na Fig. 62a também foram avaliadas para o novo diferencial de temperatura. A tensão termomecânica transiente em 1 (460 MPa) supera a da região 2 (216 MPa). A tensão em 3 decai em comparação com  $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$  porque nesta região a tensão térmica e mecânica não são sobrepostas.

Fig. 65 – Tensão termomecânica em diferentes regiões para temperatura de 120°C



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 66 apresenta a tensão termomecânica máxima para 120°C, 526,6 MPa entre canais transversais, tendo um aumento de 286% em relação à tensão máxima apresentada na Fig. 61 e 548% em relação à tensão puramente térmica apresentada na Fig. 63. Entretanto, neste caso, o pico de tensão termomecânica é devido ao choque térmico. Nestas magnitudes a tensão de escoamento do material (AISI 316L – 170 MPa) seria superada, e os valores estão próximos ao limite de resistência à tração do material (485 MPa).

Fig. 66 – Tensão térmica transiente para  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$  e  $t = 1.54$  segundos

Fonte: Autor (2025).

O modelo numérico apresentado conseguiu prever com exatidão o comportamento termomecânico de amostras de trocadores de calor compactos. Vale lembrar que as análises

aqui consideraram a amostra com propriedades isotrópicas, descritas na Tabela 13. Essa hipótese poderia resultar em erros, entretanto, isso não foi observado neste estudo, mostrando que protótipos produzidos por impressão podem ter um comportamento semelhante ao metal base.

Normalmente, trocadores compactos operam com pressões similares a 200 bar, entretanto com diferencial de temperatura muito maiores. O modelo pode ser utilizado para avaliar o campo de tensões crítico para um caso com diferencial de temperatura elevado. Analisando o peso da tensão térmica em comparação com a tensão mecânica para o caso com 20°C e 200 bar, mesmo um diferencial pequeno gera uma de tensão térmica maior na superfície do protótipo. Essa tensão térmica transiente não é válida para toda a operação do dispositivo, como pode ser visto, os valores de tensão térmica são rapidamente aliviados, no entanto o choque térmico na partida pode ser tão elevado que ocasione em falhas.

#### 4.3 FADIGA

##### 4.3.1 Curva tensão (*S*) – número de ciclos (*N*) *SLM SS316L*

Os materiais e métodos para obtenção da curva *S-N* do aço inoxidável SLM 316L foi apresentado na seção 3.1.7. Como os corpos de prova padrão foram impressos na mesma máquina em que os outros protótipos avaliados neste estudo, os resultados podem ser utilizados para avaliar a vida em fadiga dos protótipos.

Inicialmente foi necessário encontrar os níveis de tensão que levariam a uma vida em fadiga infinita. Para tal foram utilizados 8 corpos de prova para investigações preliminares, com maiores degraus de tensão alternada. A tensão inicial foi definida em 460MPa e uma vez que os dois corpos de prova romperam à baixos ciclos (175 e 119), a tensão foi diminuída em 100 MPa e novamente ocorreu a ruptura de ambos. Nos 4 corpos de prova subsequentes foi utilizado um decréscimo de 50 MPa, e com 310 MPa e 260 MPa também se observou a ruptura dos corpos. A partir dessa investigação inicial a tensão alternada foi definida em 200 MPa com incremento de 20 MPa até a primeira ruptura e decréscimo de 10 MPa após a ruptura. Os resultados são compilados na Tabela 31 para os 20 corpos de prova.

Tabela 31 – Vida em fadiga dos corpos de prova padrão para fadiga uniaxial

| C.P | Salt [MPa] | Nº de ciclos | Ruptura |
|-----|------------|--------------|---------|
| 1   | 460        | 1,75E+02     | Sim     |
| 2   | 460        | 1,19E+02     | Sim     |
| 3   | 360        | 3,54E+03     | Sim     |
| 4   | 360        | 2,94E+03     | Sim     |
| 5   | 310        | 1,22E+05     | Sim     |
| 6   | 310        | 7,16E+04     | Sim     |
| 7   | 260        | *            | Sim     |
| 8   | 260        | *            | Sim     |
| 9   | 200        | 1,00E+07     | Não     |
| 10  | 220        | 1,00E+07     | Não     |
| 11  | 240        | 1,00E+07     | Não     |
| 12  | 260        | 1,94E+06     | Sim     |
| 13  | 250        | 7,86E+06     | Sim     |
| 14  | 240        | 1,00E+07     | Não     |
| 15  | 250        | 1,00E+07     | Não     |
| 16  | 260        | 3,71E+06     | Sim     |
| 17  | 250        | 7,41E+06     | Sim     |
| 18  | 240        | 6,86E+06     | Sim     |
| 19  | 230        | 1,00E+07     | Não     |
| 20  | 240        | 1,00E+07     | Não     |

Fonte: Autor (2025).

A Fig. 67 apresenta a tensão alternada investigada em cada corpo de prova, indicando se houve a ruptura ou se o espécime não apresentou falha antes de  $10^7$  ciclos. Graficamente fica claro o método *Staircase* empregado, com *x* representando um rompimento e *o* representando vida infinita.

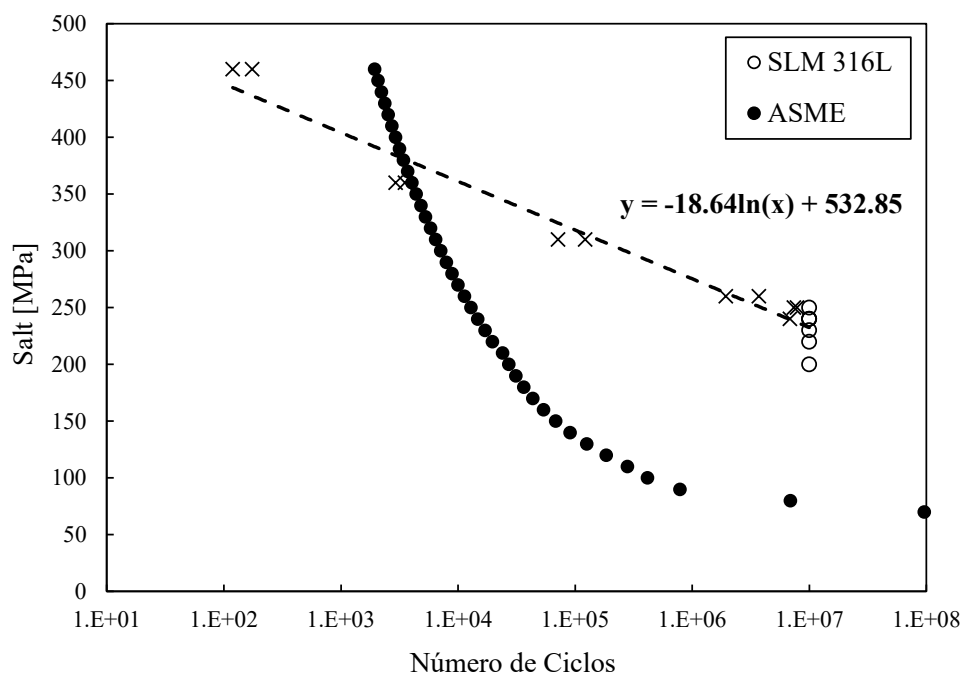
Fig. 67 – Avaliação da ruptura/vida infinita para cada corpo de prova em função da tensão alternada



Fonte: Autor (2025).

Na seção 3.1.7 foi definido as equações relevantes para determinar o limite de resistência em fadiga (LRF) baseado nos resultados experimentais dos corpos de prova. Logo, o LRF do aço inoxidável 316L produzido por SLM foi de  $245 \pm 8,6$  MPa. De acordo com o estudo de Zeng et al. (2022), o limite de resistência em fadiga do aço 316L fabricado via SLM foi de 245 MPa, igual ao encontrado no presente trabalho. O aço inoxidável 316L laminado a quente possui um LRF semelhante, de aproximadamente 270 MPa.

A Fig. 68 apresenta a curva  $S - N$  do material de impressão, destacando o número de ciclos em que cada corpo de prova resiste para uma determinada tensão alternada. Além disso, é apresentada uma interpolação para cálculo do número de ciclos ( $y$ ) em tensões não medidas experimentalmente. Uma comparação foi implementada com a curva disponível na *ASME* para avaliação de fadiga (seção 2.4.1), fica evidente que a curva *ASME* para o aço padrão 316L (tensão máxima admissível de 115 MPa e concentradores de tensão iguais a 1) é conservadora. Para uma tensão alternada de 250 MPa, o aço inoxidável SLM resiste 8 milhões de ciclos, enquanto de acordo com a *ASME* o material resiste 12891 ciclos.

Fig. 68 – Curva  $S - N$  referente ao aço inoxidável *SLM 316L* e *ASME 316L*

Fonte: Autor (2025).

No caso deste trabalho considera-se a tensão alternada ( $Salt$ ) como metade da tensão equivalente máxima. Para o protótipo do trocador de calor submetido a cargas térmicas e mecânicas (seção 4.2.1), Fig. 62, observa-se que a tensão termomecânica crítica apresenta uma magnitude de 184,2 MPa, retornando uma  $Salt = 92,1$  MPa, estando abaixo do limite de fadiga do material em que foi fabricada. Portanto, para as condições de temperatura e pressão avaliadas no experimento, deve representar uma vida infinita em fadiga.

Por outro lado, considerando a simulação com temperatura de  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Fig. 66), a tensão equivalente máxima é de 526,5 MPa, o que dá uma  $Salt = 263,3$  MPa. Considerando a curva  $S - N$  do *SLM 316L* apresentada na Fig. 68, a este nível de tensão o protótipo resistiria 1909168 ciclos. Entretanto, se o protótipo fosse fabricado com aço 316L comum, a tensão equivalente máxima ultrapassaria o limite de escoamento do material (170 MPa) e seu limite de resistência (485 MPa), ocasionando em falha estática. Supondo que a falha estática não ocorresse e baseando-se na curva  $S - N$  da *ASME*, o protótipo resistiria cerca de 10500 ciclos.

#### 4.4 NÚCLEO DO TROCADOR DE CALOR COMPLEXO

##### 4.4.1 Correção do diâmetro e rugosidade dos canais

O processo de manufatura aditiva pode resultar em pequenas variações geométricas da peça e elevada rugosidade, como apresentado no item 2.2.1. Em razão disso, foi necessário medir o diâmetro real dos canais e a sua rugosidade. Empregando os métodos apresentados na seção 3.2.1.1, o diâmetro dos canais do núcleo térmico foi corrigido para utilização nos modelos propostos. A Tabela 32 apresenta o diâmetro considerado para análises e comparações.

Tabela 32 – Diâmetro corrigido dos canais

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| <b>Diâmetro corrigido – canal complexo [mm]</b> | 1,91 |
| <b>Diâmetro corrigido – canal reto [mm]</b>     | 1,86 |

Fonte: Autor (2025).

A rugosidade é um parâmetro essencial para a taxa de transferência de calor e a perda de carga. Para não danificar o núcleo do trocador de calor, um dos protótipos utilizado nos testes de tensão no trabalho de Zilio et al. (2022) foi utilizado para medir a rugosidade. Esse protótipo foi fabricado na mesma impressora, com os mesmos parâmetros e com o mesmo diâmetro do núcleo. O procedimento de medição foi detalhado na seção 3.2.1.2 e os resultados são apresentados na Tabela 33, os termos *hor* e *ver* significam horizontal e vertical, respectivamente. Com relação aos parâmetros de rugosidade avaliados: Ra é o desvio da média aritmética; Rq é a raiz quadrada média do desvio e Rz é a altura máxima.

Tabela 33 – Rugosidade medida no protótipo

| Canal                | medição | Ra [μm]     | Rq [μm]     | Rz [μm]     | canal        | medição | Ra [μm]     | Rq [μm]     | Rz [μm]      |
|----------------------|---------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------|-------------|-------------|--------------|
| <b>ver-1</b>         | 1       | 13,2        | 16,0        | 82,5        | <b>hor-1</b> | 1       | 17,0        | 24,0        | 158,8        |
|                      | 2       | 13,1        | 15,9        | 81,1        |              | 2       | 24,3        | 30,5        | 181,7        |
|                      | 3       | 13,1        | 16,0        | 81,9        |              | 3       | 14,5        | 17,9        | 94,7         |
| <b>ver-2</b>         | 1       | 11,1        | 14,2        | 77,8        | <b>hor-2</b> | 1       | 23,0        | 30,2        | 194,1        |
|                      | 2       | 12,0        | 14,9        | 82,5        |              | 2       | 25,4        | 32,0        | 198,7        |
|                      | 3       | 10,6        | 13,0        | 69,9        |              | 3       | 24,8        | 31,1        | 192,4        |
| <b>média</b>         |         | <b>12,2</b> | <b>15,0</b> | <b>79,3</b> |              |         | <b>21,5</b> | <b>27,6</b> | <b>170,0</b> |
| <b>desvio padrão</b> |         | <b>1,0</b>  | <b>1,1</b>  | <b>4,5</b>  |              |         | <b>4,2</b>  | <b>5,1</b>  | <b>36,2</b>  |

Fonte: Autor (2025).

Alguns autores que propuseram geometrias complexas para *CHE* não consideraram a rugosidade em seus estudos, o que pode levar a resultados não coerentes. Outros autores que experimentaram trocadores fabricados via *MA* também obtiveram canais rugosos. No trabalho de Da Silva et al. (2021) a rugosidade média (Ra) foi de 12,21 μm e no caso de Hein e Mortean (2021) foi 7,4 μm nas faces externas do *CHE*. Wang et al. (2025) avaliaram o impacto da rugosidade variando entre 1,5 μm e 100 μm na taxa de transferência de um *PCHE*.

Com relação a direção da parte fabricada em relação a plataforma, Muller et al. (2017) afirmam que nas partes fabricadas a rugosidade é maior nas superfícies horizontais ( $0^\circ$ ) e menor nas superfícies verticais ( $90^\circ$ ). Os autores ainda definem que o parâmetro Rz pode variar entre  $30\text{ }\mu\text{m}$  até  $140\text{ }\mu\text{m}$  para processos com laser como fonte de calor.

A rugosidade foi medida ao longo da linha do canal, e o resultado da variação da rugosidade ao longo do comprimento pode ser observado na Fig. 69. É possível observar a não uniformidade na medição. Além da variação da rugosidade, existe uma não uniformidade na seção do canal, que pode ser visto na Fig. 33. Salienta-se então que as alturas das rugosidades são corrigidas de acordo com o estudo de Kadivar et al. (2021) para definir uma altura equivalente como não há rugosidade regular na superfície interna do canal.

Baseado nos valores médios de rugosidade  $R_q$ , é possível definir  $k_s$ , Eq. (67), para corrigir no modelo numérico que utilize o método grão de areia. Neste caso,  $k_s$  é igual a  $37\text{ }\mu\text{m}$  para os canais complexos e  $96\text{ }\mu\text{m}$  para os canais retos.

Fig. 69 – Variação da rugosidade ao longo de um canal



Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.2 Térmico – configuração água – ar

##### 4.4.2.1 Ramal complexo – água e Ramal reto – ar

A primeira configuração testada foi de água no ramal complexo e ar no ramal reto, ela foi utilizada para validação do modelo numérico e analítico. Correlações para canais cilíndricos retos são bem difundidas na literatura, como apresentado na seção 2.5.2. Uma simplificação

utilizada para o modelo analítico foi considerar temperatura de parede do canal reto constante (escoamento de ar) e igual a temperatura da água, que escoar no ramal complexo.

O escoamento com água possui uma capacidade térmica muito superior ao escoamento de ar, além disso, o ramal complexo possui três vezes mais área de troca do que o ramal reto. Esses dois fatores fazem com que se tenha uma temperatura praticamente constante no núcleo e que seja possível adotar essa hipótese. Já o modelo numérico não fez essa consideração, e empregou escoamento em ambos os ramais.

Os resultados para os 18 testes são apresentados na Tabela 34, em que os subscritos *exp*, *num* e *analt* significam experimental, numérico e analítico, respectivamente. Os dados de entrada e um maior compilado dos resultados são apresentados no **Apêndice J**.

Tabela 34 – Resultado experimental - ar no ramal reto e água no complexo

| Experimento    | Rec   | Reh  | q <sub>exp</sub><br>[kW] | q <sub>num</sub><br>[kW] | q <sub>canalt</sub><br>[kW] | UA <sub>exp</sub><br>[kW/°C] | UA <sub>num</sub><br>[kW/°C] |
|----------------|-------|------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <i>T40-as1</i> | 2452  | 3878 | 0,140                    | 0,138                    | 0,116                       | 0,0169                       | 0,0161                       |
| <i>T40-as2</i> | 4119  | 3871 | 0,236                    | 0,224                    | 0,206                       | 0,0292                       | 0,0252                       |
| <i>T40-as3</i> | 5026  | 3874 | 0,286                    | 0,270                    | 0,253                       | 0,0357                       | 0,0302                       |
| <i>T40-as4</i> | 6574  | 3885 | 0,371                    | 0,349                    | 0,331                       | 0,0460                       | 0,0386                       |
| <i>T40-as5</i> | 7746  | 3880 | 0,433                    | 0,407                    | 0,390                       | 0,0532                       | 0,0448                       |
| <i>T40-as6</i> | 9007  | 3891 | 0,503                    | 0,473                    | 0,456                       | 0,0608                       | 0,0513                       |
| <i>T40-as7</i> | 10396 | 3890 | 0,584                    | 0,551                    | 0,536                       | 0,0684                       | 0,0583                       |
| <i>T40-as8</i> | 12626 | 3900 | 0,723                    | 0,683                    | 0,673                       | 0,0799                       | 0,0688                       |
| <i>T40-as9</i> | 13690 | 3899 | 0,796                    | 0,756                    | 0,749                       | 0,0843                       | 0,0736                       |
| <i>T50-as1</i> | 2461  | 4507 | 0,219                    | 0,217                    | 0,181                       | 0,0170                       | 0,0163                       |
| <i>T50-as2</i> | 3802  | 4530 | 0,339                    | 0,321                    | 0,294                       | 0,0272                       | 0,0234                       |
| <i>T50-as3</i> | 5468  | 4512 | 0,485                    | 0,453                    | 0,428                       | 0,0393                       | 0,0326                       |
| <i>T50-as4</i> | 6604  | 4516 | 0,582                    | 0,544                    | 0,519                       | 0,0468                       | 0,0388                       |
| <i>T50-as5</i> | 7874  | 4515 | 0,687                    | 0,642                    | 0,618                       | 0,0548                       | 0,0456                       |
| <i>T50-as6</i> | 8929  | 4517 | 0,785                    | 0,734                    | 0,711                       | 0,0611                       | 0,0510                       |
| <i>T50-as7</i> | 10152 | 4523 | 0,902                    | 0,844                    | 0,823                       | 0,0681                       | 0,0572                       |
| <i>T50-as8</i> | 11748 | 4519 | 1,056                    | 0,991                    | 0,975                       | 0,0765                       | 0,0649                       |
| <i>T50-as9</i> | 13422 | 4537 | 1,228                    | 1,155                    | 1,146                       | 0,0849                       | 0,0727                       |

Fonte: Autor (2025).

A Fig. 70a apresenta a taxa de transferência experimental, numérica e analítica em função de Reynolds do ramal frio ( $Re_c$ ). Ambos os modelos apresentaram uma boa coerência com os valores experimentais, com inúmeros pontos dentro da faixa da incerteza experimental. O erro médio do modelo numérico foi de 5,4%, enquanto o analítico foi de 10,4%. A maior diferença entre analítico e experimento foi de 17%, para o caso de menor vazão. Este erro pode

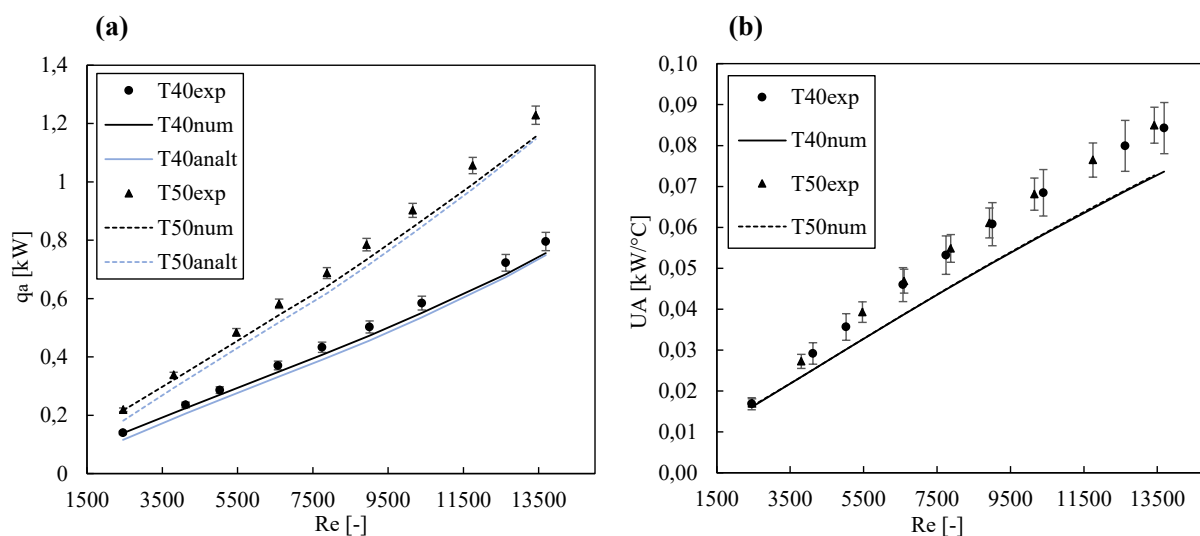
estar relacionado com a correlação empregada para o número de Nu de canais retos, que neste caso foi a de região de transição. Como apresentado no trabalho de Morteau e Mantelli (2019) a previsão da transferência de calor neste caso é complexa, visto que o escoamento não se comporta como puramente laminar, e nem como puramente turbulento.

É possível comparar os resultados térmicos obtidos neste trabalho com os de Da Silva et al. (2021), que também testou um núcleo impresso em SLM operando com água e ar. O núcleo de Da Silva et al. (2021) possuía o mesmo diâmetro e foi testado em  $Re_c$  similares. Para um  $Re_c$  igual a 10000, operando com água a 50°C, o presente núcleo atingiu uma taxa de transferência de calor por unidade de área de troca do ramal reto igual a 11,4 kW/m<sup>2</sup>, enquanto que o núcleo de Da Silva et al. (2021) atingiu 7,6 kW/m<sup>2</sup>. A maior taxa de transferência do presente estudo é devido à elevada capacidade de troca térmica do ramal complexo, que possui maior área de troca e maior coeficiente convectivo.

O modelo analítico utilizado não permite o cálculo do coeficiente global de transferência de calor, pois assume temperatura de parede constante. A Fig. 70b apresenta o valor de UA numérico e experimental para as duas temperaturas avaliadas, assim como a incerteza experimental. Como visualizado, o coeficiente global de transferência de calor não varia com a temperatura, tanto para o numérico quanto para o experimental. A maior diferença entre modelo e experimento é 14,4% para  $Re_c = 13422$  no conjunto de 50°C.

A diferença entre numérico e experimento pode estar relacionada com a baixa diferença de temperatura registrada no ramal da água, que variou em média 0,7°C. Essa pequena variação afeta diretamente o cálculo de UA. Por outro lado, isso mostra que a hipótese empregada anteriormente no modelo teórico estava correta. Tendo em vista os bons resultados do modelo numérico, uma segunda análise foi realizada para confirmar essa hipótese.

Fig. 70 – (a) Taxa de transferência experimental, analítica e numérica para ar no ramal reto;  
(b) Coeficiente global de transferência de calor vezes área

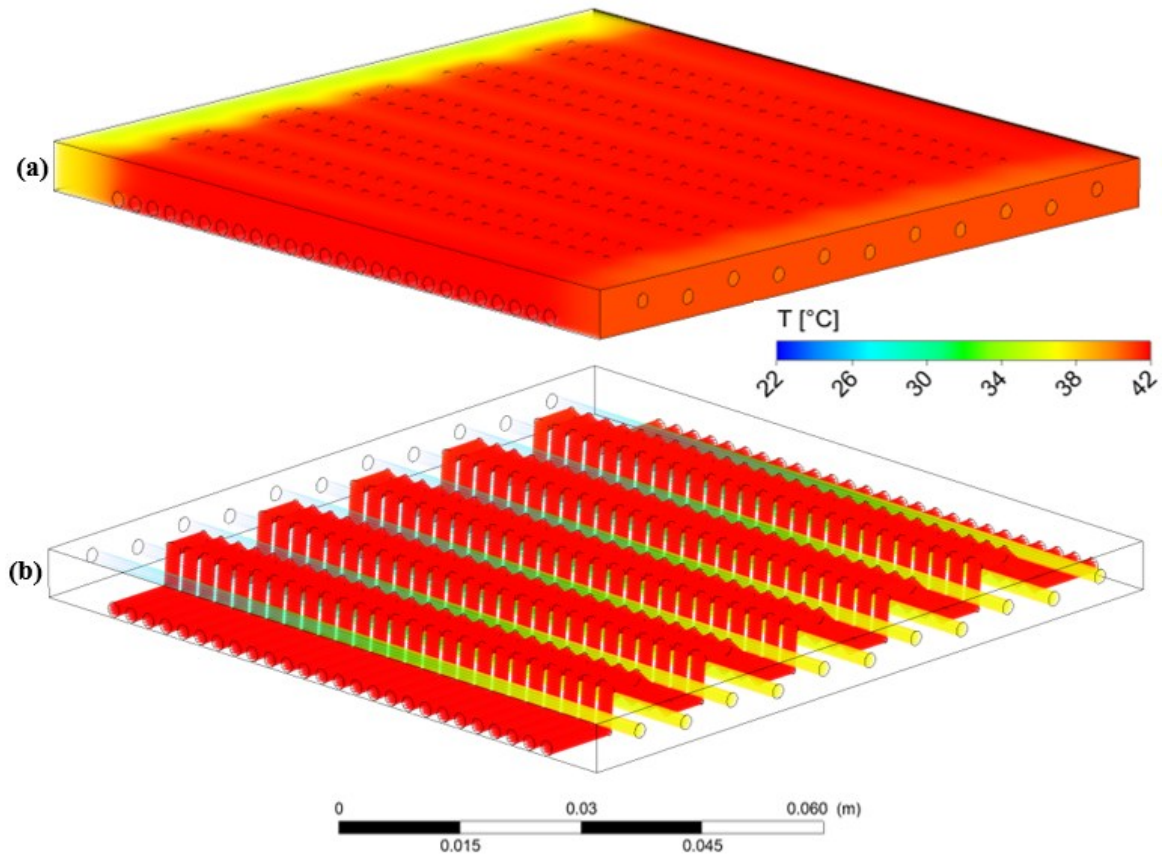


Fonte: Autor (2025).

A Fig. 71 apresenta o modelo numérico simulado para o experimento *T40-as9*, onde o escoamento de ar apresenta o maior número de  $Re$  e consequentemente a maior capacidade térmica dentre os experimentos. Na Fig. 71a pode ser visualizada a temperatura do sólido, onde a lâmina do trocador apresenta temperatura quase-constante, com exceção da região de entrada do ar, justificando a hipótese adotada no modelo analítico de temperatura de parede constante.

A Fig. 71b apresenta a temperatura dos dois fluidos. Observa-se que não há variação de temperatura na água quente, presente no ramal complexo, diferentemente do ar. De acordo com os dados numéricos, o primeiro canal complexo é responsável por fornecer um fluxo de calor para a parede 5 vezes maior do que os demais canais complexos. Portanto o ar no ramal reto apresentou uma variação de temperatura significativa logo no início dos canais.

Fig. 71 – Campo de temperatura no painel do trocador de calor: (a) sólido; (b) fluídos



Fonte: Autor (2025).

A diferença média, para a taxa de transferência de calor, entre modelo numérico e experimento foi de 5,4%. Esses resultados demonstram que a lâmina contendo as malhas fluídicas de ambos os ramais e o sólido é representativa do trocador testado. No modelo apresentado no item 2.5.2, foi apresentada a formulação de resistências térmicas aplicada à trocadores de calor. Para este caso, com água no ramal complexo e ar no ramal reto, foi possível constatar que a resistência térmica do ramal da água e da condução de calor são desprezíveis, de modo que a troca de calor depende apenas do ramal do ar (canal reto).

Dessa forma, a Eq. (49) pode ser simplificada para Eq. (70). Empregando esta correlação e o valor experimental calculado de  $UA$ , foi possível calcular o coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h$ ) para o ar e consequentemente Nusselt ( $Nu$ ).

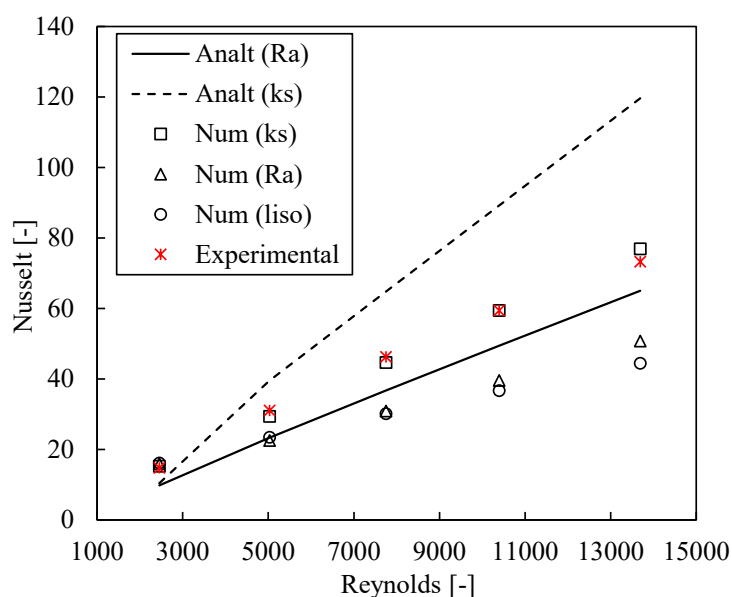
$$\frac{1}{UA_{exp}} = R_{conv,c} = \frac{1}{hA_c} \quad (70)$$

A Fig. 72 apresenta uma comparação entre  $Nu$  experimental, numérico e o teórico, este último calculado com a correlação de *Gnielinski* (Eq. (59)). Para o modelo numérico, foi investigado o efeito da rugosidade, simulando o escoamento com  $k_s$  (96 $\mu$ m),  $R_a$  (21,5  $\mu$ m) e tubo liso. Sendo a rugosidade de 96 $\mu$ m referente a medição de canais impressos horizontalmente a plataforma. Para a correlação de *Gnielinski*, foi investigado o uso da rugosidade  $R_a$  e  $k_s$ , com o objetivo de determinar qual dos dois parâmetros deveria ser usado no cálculo do fator de atrito, parâmetro de entrada da correlação de *Gnielinski*.

Observa-se que a utilização da rugosidade igual a  $k_s$  no modelo analítico faz com que o  $Nu$  seja superior em comparação com o experimento. Essa verificação vai em contraponto daquilo analisado por Kadivar et al. (2021), que apresenta a correção da rugosidade especificamente para a correlação de *Colebrook* (Eq. (46)). Portanto, fica evidente que no que tange a utilização da correlação de *Colebrook* é indicado o uso do parâmetro  $R_a$ , medido diretamente.

Quando se trata de protótipos fabricados via manufatura aditiva, a correta avaliação da rugosidade é primordial. A alta rugosidade destes protótipos (ver trabalhos de Da Silva et al. (2021), Awais e Bhuiyan (2018) e Croce et al. (2007)), afeta diretamente a taxa de transferência de calor e a perda de carga (posteriormente analisada). Através das curvas, apresentadas na Fig. 72, observa-se que a maior coerência ocorre entre o método das resistências e o modelo numérico com a rugosidade igual a 96 $\mu$ m, validando o estudo de Kadivar et al. (2021) em que ele propõe uma correção para altura da rugosidade. Dessa forma, quando se tratar de simulações numéricas a rugosidade foi sempre corrigida e definida como  $k_s$  no presente trabalho. Nota-se que os valores de  $Nu$  considerando  $R_a$  no modelo diferem minimamente de um tubo liso, não representando os números de  $Nu$  experimentais. Analisando as diferentes rugosidades no modelo numérico é possível observar que sua influência no número de  $Nu$  é diretamente proporcional ao  $Re_c$ .

Fig. 72 – Comparação do número de Nusselt do canal reto obtido por correlações, método das resistências e modelo numérico



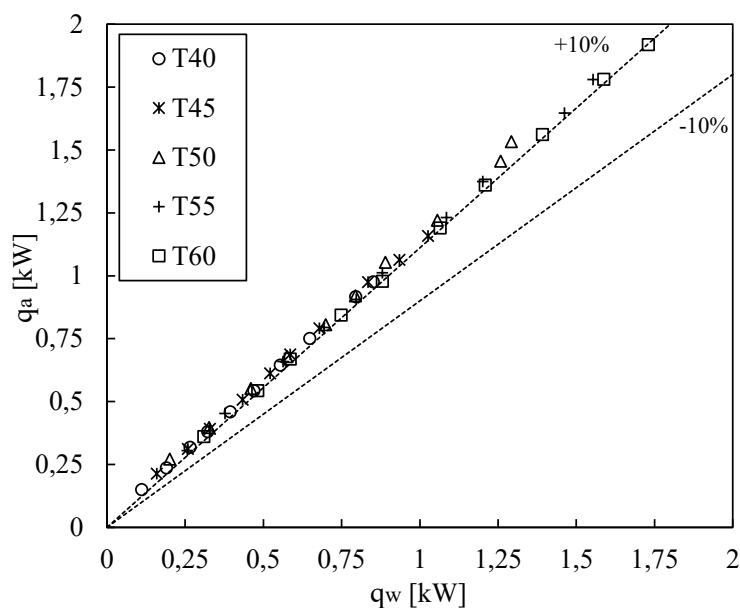
Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.2.2 Ramal complexo – ar e Ramal reto – água

Este tópico visa investigar o efeito do uso de geometrias complexas na transferência de calor. O trocador de calor com canais complexos foi projetado para uma situação específica, onde um ramo possui uma área de troca muito superior a outra. Essa configuração é ideal para casos em que há uma diferença muito grande entre a capacidade térmica dos fluidos ( $mc_p$ ), onde um dos fluidos se comporta como um sumidouro de calor. Os testes realizados foram descritos no item 3.2.2.1.1 especificamente para a configuração água (ramal com canais retos) – ar (ramal com canais complexos).

A Fig. 73 apresenta a taxa de transferência da água e do ar, com as linhas demarcando os limites de  $\pm 10\%$ . Como pode ser visto, os ramos tiveram resultados semelhantes, mostrando que a perda de calor para o ambiente é mínima. No caso da configuração ar – água, o escoamento com ar não tem capacidade térmica suficiente para gerar um diferencial de temperatura significativo na água. Esse pequeno  $\Delta T$  faz com que ao avaliar a taxa do ramo reto com água, a incerteza dos sensores de temperatura seja muito elevada (1,12 kW) no experimento *T60-ac10*, sendo que a taxa de transferência é 1,73 kW. Em razão disso, as demais análises serão baseadas no ramo do ar.

Fig. 73 – Comparação da primeira lei para a taxa de transferência da água e do ar



Fonte: Autor (2025).

O resultado dos testes com  $T = 40^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$  são apresentados na Tabela 35, os demais resultados ( $T = 45, 50$  e  $55^\circ\text{C}$ ) e os parâmetros medidos no experimento são apresentados no **Apêndice K**. O código do experimento apresenta primeiro a temperatura da água ( $T40$ ) e em seguida a vazão do ar ( $acI$ ). Quanto a legenda dos parâmetros,  $c$  remete ao ramal frio (ar),  $h$  ao ramal quente (água),  $i$  a entrada e  $o$  a saída.

Os resultados, experimentais e numéricos, são apresentados em termos de taxa de transferência de calor e coeficiente global de transferência de calor. Diferente do caso anterior, nesta análise não foram aplicadas as correlações, visto que não existem correlações de  $Nu$  para o canal complexo investigado no presente trabalho.

Tabela 35 – Resultado experimental - ar no ramal complexo e água no reto

| Experimento     | Rec  | Reh  | q <sub>exp</sub><br>[kW] | q <sub>num</sub><br>[kW] | dif_q<br>[%] | UA<br>[kW/°C] | UAnum<br>[kW/°C] | dif_UA<br>[%] |
|-----------------|------|------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------|------------------|---------------|
| <i>T40-ac1</i>  | 951  | 5337 | 0,150                    | 0,156                    | <b>4,2</b>   | 0,0275        | 0,0453           | <b>64,5</b>   |
| <i>T40-ac2</i>  | 1530 | 5348 | 0,236                    | 0,241                    | <b>2,0</b>   | 0,0442        | 0,0519           | <b>17,5</b>   |
| <i>T40-ac3</i>  | 2099 | 5351 | 0,318                    | 0,315                    | <b>0,9</b>   | 0,0596        | 0,0566           | <b>5,0</b>    |
| <i>T40-ac4</i>  | 2536 | 5351 | 0,380                    | 0,371                    | <b>2,6</b>   | 0,0691        | 0,0605           | <b>12,5</b>   |
| <i>T40-ac5</i>  | 3090 | 5354 | 0,459                    | 0,437                    | <b>4,9</b>   | 0,0832        | 0,0663           | <b>20,3</b>   |
| <i>T40-ac6</i>  | 3660 | 5365 | 0,543                    | 0,508                    | <b>6,4</b>   | 0,0958        | 0,0727           | <b>24,1</b>   |
| <i>T40-ac7</i>  | 4128 | 5362 | 0,644                    | 0,598                    | <b>7,2</b>   | 0,1048        | 0,0782           | <b>25,4</b>   |
| <i>T40-ac8</i>  | 4650 | 5384 | 0,750                    | 0,689                    | <b>8,2</b>   | 0,1143        | 0,0835           | <b>27,0</b>   |
| <i>T40-ac9</i>  | 5461 | 5370 | 0,916                    | 0,837                    | <b>8,7</b>   | 0,1287        | 0,0941           | <b>26,9</b>   |
| <i>T40-ac10</i> | 5735 | 5391 | 0,976                    | 0,900                    | <b>7,7</b>   | 0,1264        | 0,0973           | <b>23,1</b>   |
| <i>T60-ac1</i>  | 1105 | 7198 | 0,360                    | 0,371                    | <b>3,1</b>   | 0,0335        | 0,0475           | <b>41,8</b>   |
| <i>T60-ac2</i>  | 1683 | 7194 | 0,543                    | 0,548                    | <b>0,9</b>   | 0,0501        | 0,0535           | <b>7,0</b>    |
| <i>T60-ac3</i>  | 2089 | 7189 | 0,669                    | 0,660                    | <b>1,3</b>   | 0,0616        | 0,0568           | <b>7,8</b>    |
| <i>T60-ac4</i>  | 2662 | 7201 | 0,843                    | 0,812                    | <b>3,7</b>   | 0,0751        | 0,0619           | <b>17,5</b>   |
| <i>T60-ac5</i>  | 3111 | 7218 | 0,978                    | 0,928                    | <b>5,1</b>   | 0,0850        | 0,0667           | <b>21,6</b>   |
| <i>T60-ac6</i>  | 3790 | 7218 | 1,190                    | 1,108                    | <b>6,9</b>   | 0,1003        | 0,0745           | <b>25,7</b>   |
| <i>T60-ac7</i>  | 4287 | 7191 | 1,360                    | 1,254                    | <b>7,8</b>   | 0,1105        | 0,0804           | <b>27,2</b>   |
| <i>T60-ac8</i>  | 4872 | 7211 | 1,561                    | 1,429                    | <b>8,4</b>   | 0,1209        | 0,0874           | <b>27,7</b>   |
| <i>T60-ac9</i>  | 5392 | 7199 | 1,780                    | 1,625                    | <b>8,7</b>   | 0,1287        | 0,0935           | <b>27,3</b>   |
| <i>T60-ac10</i> | 5746 | 7194 | 1,918                    | 1,767                    | <b>7,9</b>   | 0,1280        | 0,0977           | <b>23,7</b>   |

Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 74a é apresentado a taxa de transferência do ramal do ar em função do número de  $Re_c$ . Como esperado, a taxa de transferência máxima (1,92 kW) foi obtida para 60°C e  $Re_c = 5745$ , maior temperatura e vazão do ar. A vazão máxima da água (ramal reto) foi fixada para todas as temperaturas, fazendo com que para 60°C o  $Re_h$  fique em 7200, caracterizando um escoamento turbulento. Independentemente, foi observado que a água funcionava como uma fonte de calor para o ar, uma vez que a variação na sua temperatura foi de no máximo 0,5°C.

O desempenho térmico do trocador variou entre 0,15 kW e 1,92 kW. Considerando as dimensões do trocador apresentadas na seção 3.2.1, o núcleo possui um volume total de 0,000848 m<sup>3</sup>. Uma boa fonte para comparação de performance do trocador é comparar a taxa de troca por unidade de volume com outros trabalhos disponíveis na literatura. Para esta configuração, água no ramal reto e ar no ramal complexo, o núcleo troca entre 0,177 MW/m<sup>3</sup> e 2,26 MW/m<sup>3</sup>.

Da Silva et al. (2021) também investigou um trocador de calor fabricado via SLM com canais retos empregando água e ar como fluidos de trabalhos e vazões similares. Em seus resultados, os autores atingiram valores entre 0,08 e 1,24 MW/m<sup>3</sup> para a capacidade de

transferência do núcleo. Para uma temperatura da água de 60°C, o núcleo de Da Silva et al. (2021) apresentou uma taxa por volume de 550 kW/m<sup>3</sup> em um  $Re_c = 5300$ , enquanto que no presente estudo com  $Re_c = 5391$ , a taxa de troca por volume é 1780 kW/m<sup>3</sup>.

Mortean e Mantelli (2019) obtiveram uma taxa por volume de 488 kW/m<sup>3</sup> para  $Re_c = 2496$  (com água no outro ramal a 70°C), enquanto no presente estudo com  $Re_c = 2662$  a taxa por volume é de 994 kW/m<sup>3</sup>. Sarmiento et al. (2020) obtiveram uma taxa por volume de 1278 kW/m<sup>3</sup> para um  $Re_c = 5802$  (também com água a 70°C), enquanto no presente estudo, uma taxa por volume é de 2262 kW/m<sup>3</sup> para  $Re_c = 5746$ .

O trocador desenvolvido teve um bom desempenho térmico, com resultados iguais ou superiores para a troca térmica do que os outros trabalhos. Logo, assim como foi apresentado por Castelain et al. (2016) o uso de canais complexos melhora o desempenho térmico. Castelain et al. (2016) estudou diversas geometrias de canais complexos numericamente, entretanto, o autor estudou apenas um canal.

A Fig. 74b apresenta a comparação entre o modelo numérico e os resultados experimentais. Como pode ser observado, a taxa de transferência pode ser prevista numericamente com boa precisão para menores  $Re_c$ , e consequentemente menores taxas. Em números de  $Re_c$  mais elevados o modelo se afastou um pouco dos dados experimentais, mas em nenhum caso ultrapassou 10%. A menor diferença média foi de 5,3% e ocorreu entre modelo e experimento para temperatura da água de 40°C. A maior diferença média foi de 5,7% nas temperaturas de 50°C e 55°C. Ao considerar todos os experimentos e modelos simulados, a diferença média ficou em 5,5%. A taxa experimental é maior do que a numérica.

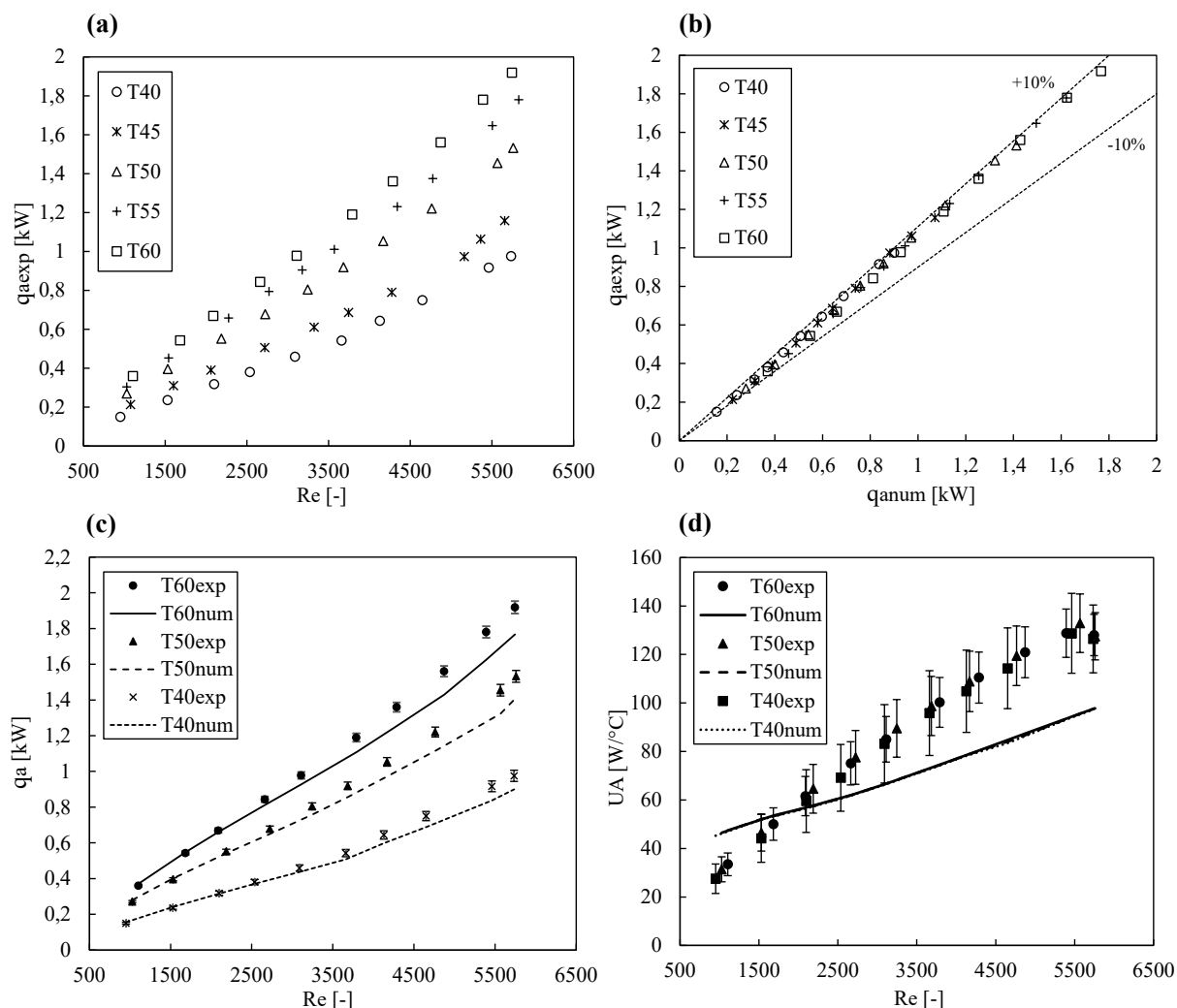
Na Fig. 74c é apresentada a taxa de transferência experimental e numérica em função do número de  $Re_c$ . Como pode ser visto, o modelo numérico e os experimentos tiveram o mesmo comportamento, com os dados numéricos próximos da incerteza experimental. A pequena diferença entre os dados pode estar relacionada com a má distribuição dos fluidos nos canais, visto que no modelo numérico utiliza-se a hipótese de distribuição uniforme.

Outros fatores que podem estar influenciando são a rugosidade do canal e a geometria transversal do canal. Como pode ser visto na Fig. 34, a geometria do canal não é completamente circular e apresenta pequenas variações entre os canais. A rugosidade empregada no modelo numérico foi baseada na amostra produzida para os testes de pressurização do estudo de Zilio et al. (2022), fator que pode resultar em uma pequena diferença na rugosidade do canal. Aliado aos resultados apresentados para todas as temperaturas, é concreto afirmar que o modelo apresenta uma boa coerência com os experimentos.

Na Fig. 74d é apresentado o coeficiente global de transferência de calor do trocador. Fica claro nos dados apresentados que a incerteza experimental é maior do que no caso da taxa de transferência. Isto ocorreu porque o método *LMTD*, utilizado para avaliar o UA experimental, leva em consideração a temperatura da água de entrada e saída, que teve uma variação média de 0,25°C para todos os experimentos. A maior diferença entre numérico e experimento observada nos dados com  $T = 60^{\circ}\text{C}$  foi de 38,4% para  $Re_c = 4872$  e a menor 6,5% para  $Re_c = 1683$ . O parâmetro UA variou entre 27,5 e 134 W/K para todo o conjunto experimental ( $T = 40, 45, 50, 55$  e  $60^{\circ}\text{C}$ ). Por isso, o mais adequado ao se trabalhar com escoamento ar - água com baixa diferença de temperatura é analisar a taxa de transferência de calor do ramal do ar.

Novamente os dados de UA podem ser comparados com o estudo de Da Silva et al. (2021). Para  $Re_c = 5350$ , o coeficiente do estudo de Da Silva et al. (2021) é 20 W/K, enquanto que no presente estudo, este valor é 120 W/K. No caso de Sarmiento et al. (2020), UA é igual a 120 W/K para  $Re_c = 5802$ , enquanto no presente estudo com  $Re_c = 5746$ ,  $UA = 128$  W/K.

Fig. 74 – (a) Taxa de transferência de calor experimental em função de Re; (b) Comparação entre taxa experimental e numérica; (c) Taxa de transferência de calor experimental e numérica em função de Re; (d) UA em função de Re.

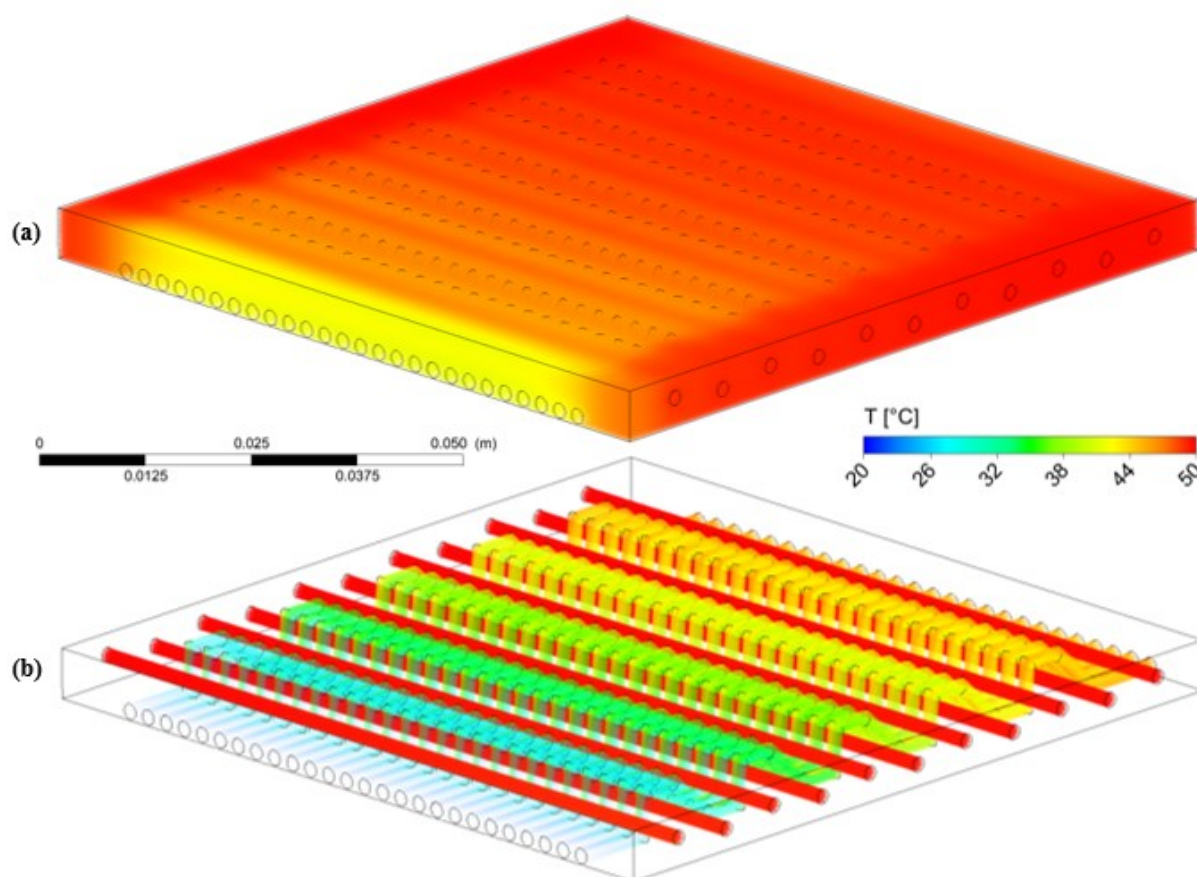


Fonte: Autor (2025).

O que pode ser observado nos dois parâmetros avaliados ( $q$  e  $UA$ ) é uma diferença maior para os números de  $Re$  elevados. Essa diferença é menor quando avaliando a taxa de transferência. Com base na diferença entre numérico e experimental, podemos supor que a rugosidade nos canais do trocador é maior do que a estimada. A rugosidade utilizada no modelo foi medida na amostra produzida para o teste de tensão, não no próprio trocador de calor. Provavelmente os valores do núcleo são levemente diferentes, o que aumentaria a taxa de transferência numérica para altos números de Reynolds. Além disso, essa rugosidade tem a tendência de ser não uniforme ao longo do canal (característica do processo de impressão 3D) o que não é considerado no modelo e também aumenta a taxa de transferência.

A Fig. 75 apresenta o campo de temperaturas no sólido (a) e nos fluídos (b) para os dados do experimento *T50-ac9*. Neste caso, diferente do anterior, a hipótese de temperatura de parede consente não se aplica, visto que há um diferencial de temperatura relevante ao longo do sólido, com temperaturas variando entre 40 e 50°C. Esse diferencial de temperatura se deve a elevada área de troca do ramal complexo (ar), 3 vezes maior do que o ramal reto (água), aumentando sua capacidade de transferência de calor. Dessa maneira não é possível desprezar as resistências de convecção do ramal com água e de condução na parede.

Fig. 75 – Campo de temperatura no modelo numérico com parâmetros do experimento *T50-ac9*: (a) sólido; (b) fluído



Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.2.3 Comparação entre canais complexos e retos

Cada ramal, reto e complexo, possui um coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ). Este coeficiente leva em consideração o desempenho térmico por unidade de área de troca, por isso é um bom parâmetro de comparação entre os canais.

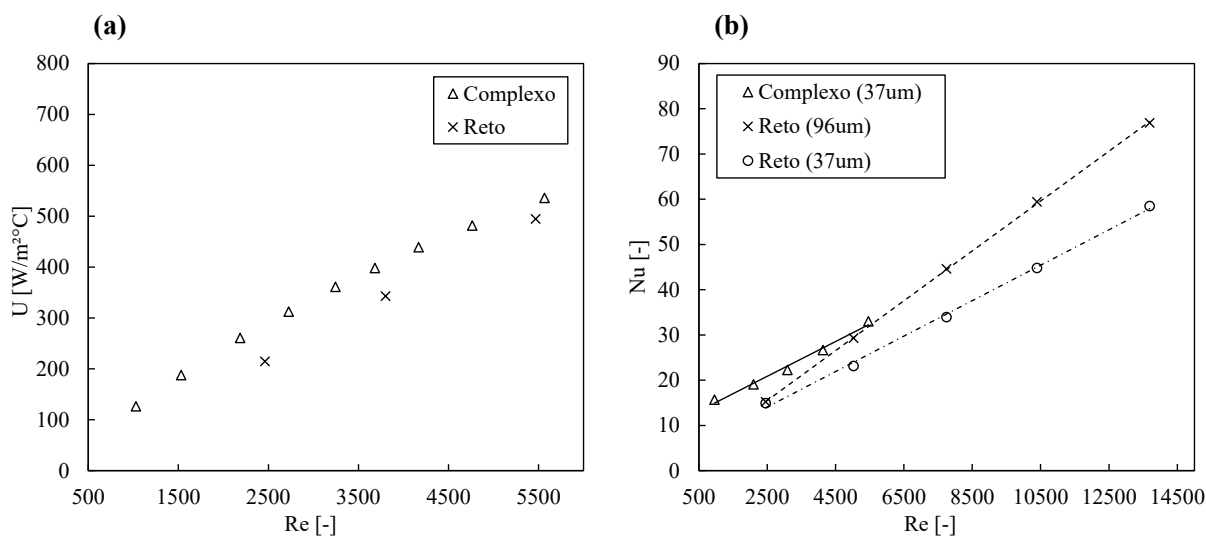
A Fig. 76a apresenta a comparação para o caso com  $T_h = 50^\circ\text{C}$ . Pode ser observado o desempenho superior do canal complexo em toda a faixa de Reynolds avaliada. Para  $Re_c = 3700$  o canal complexo apresenta um aumento de 16% em  $U$  em comparação ao reto. Com o aumento do número de  $Re_c$ , o coeficiente do ramal complexo tende a se aproximar do ramal reto.

De acordo com Incropera (2007), o desenvolvimento da camada limite térmica tem influência direta na transferência de calor. Em escoamentos laminares, o comprimento para o desenvolvimento desta camada é definido pela Eq. (54), enquanto que em escoamentos turbulentos este comprimento é muito curto e normalmente desprezado. Logo, o desenvolvimento da camada limite térmica pode ter relação com o comportamento observado na Fig. 76a. Para escoamentos mais laminares, o canal complexo apresenta um coeficiente de transferência de calor superior ao reto. Neste caso o escoamento nunca chega a se desenvolver, devido as curvas do caminho complexo, enquanto no reto ele desenvolve e a troca é menor. Por outro lado, para escoamentos mais turbulentos, a camada limite do canal reto também se desenvolve rapidamente e seu coeficiente se aproxima daquele observado no canal complexo.

Outra comparação foi realizada entre os canais complexos e retos, utilizando o número de Nusselt (Fig. 76b) obtidos através do modelo numérico. Salienta-se novamente que os canais possuem diferentes rugosidades,  $96\ \mu\text{m}$  para o reto e  $37\ \mu\text{m}$  para o complexo. Ao considerar os valores respectivos de rugosidade, observamos um comportamento muito similar ao do coeficiente global, com o canal complexo sendo superior (em termos de  $Nu$ ) até um Reynolds aproximado de 5500.

Entretanto, essa pode não ser uma comparação justa, uma vez que a rugosidade está intimamente ligada com a taxa de transferência de calor e por consequência, Nusselt. Ao considerarmos o canal reto como se tivesse uma rugosidade de  $37\ \mu\text{m}$ , os números de Nusselt diminuem. Neste caso o canal complexo é superior ao reto para uma ampla gama de Reynolds.

Fig. 76 – Comparação entre canais complexos em retos: (a) coeficiente global de transferência de calor; (b) Nusselt



Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.3 Térmico – configuração água – água

##### 4.4.3.1 Ramal complexo – quente; Ramal reto – frio

O conjunto de experimentos realizado para a configuração água – água foi maior do que para água – ar, visto que neste caso é possível alterar a temperatura de ambos os ramais. Nesta primeira configuração, com água quente no ramal complexo e água fria no ramal reto, foram realizados um total de 156 testes. Todos os resultados experimentais são apresentados no **Apêndice L**.

Foram investigadas três temperaturas para o fluido quente: 40, 50 e 60 °C. Na Tabela 36 são apresentados dados coletados durante o teste (temperatura de entrada e saída, vazão), além dos números de  $Re$ , taxas de transferência de calor e incertezas experimentais ( $u$ ) – **Apêndice G**.

Tabela 36 – Resultados dos experimentos com água quente no ramal complexo e fria no ramal reto para  $T_h = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Experimento       | Thi<br>[°C] | Tci<br>[°C] | Tco<br>[°C] | Tho<br>[°C] | mc<br>[kg/s] | mh<br>[kg/s] | Rec  | Reh  | qh<br>[kW] | qc<br>[kW] | u(qh)<br>[kW] | u(qc)<br>[kW] |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|------|------|------------|------------|---------------|---------------|
| <i>aqc1-afr1</i>  | 51,84       | 17,80       | 24,17       | 48,26       | 0,27         | 0,46         | 1434 | 1752 | 6,94       | 7,28       | 1,35          | 0,61          |
| <i>aqc2-afr1</i>  | 52,25       | 17,80       | 24,38       | 49,00       | 0,27         | 0,52         | 1435 | 1999 | 7,13       | 7,51       | 1,53          | 0,61          |
| <i>aqc3-afr1</i>  | 52,33       | 17,83       | 24,51       | 49,35       | 0,27         | 0,58         | 1436 | 2232 | 7,29       | 7,62       | 1,70          | 0,61          |
| <i>aqc4-afr1</i>  | 52,23       | 17,83       | 24,61       | 49,55       | 0,27         | 0,65         | 1436 | 2505 | 7,34       | 7,71       | 1,91          | 0,61          |
| <i>aqc5-afr1</i>  | 52,11       | 17,84       | 24,82       | 50,01       | 0,27         | 0,86         | 1445 | 3293 | 7,53       | 7,97       | 2,51          | 0,62          |
| <i>aqc6-afr1</i>  | 52,06       | 17,90       | 24,98       | 50,24       | 0,27         | 1,00         | 1448 | 3841 | 7,59       | 8,07       | 2,92          | 0,62          |
| <i>aqc7-afr1</i>  | 51,95       | 17,91       | 25,06       | 50,34       | 0,27         | 1,14         | 1449 | 4382 | 7,65       | 8,16       | 3,34          | 0,62          |
| <i>aqc8-afr1</i>  | 51,99       | 17,95       | 25,18       | 50,56       | 0,27         | 1,29         | 1451 | 4967 | 7,70       | 8,24       | 3,78          | 0,62          |
| <i>aqc9-afr1</i>  | 52,13       | 17,98       | 25,29       | 50,83       | 0,27         | 1,42         | 1455 | 5489 | 7,75       | 8,35       | 4,17          | 0,62          |
| <i>aqc10-afr1</i> | 52,22       | 17,98       | 25,40       | 51,04       | 0,27         | 1,57         | 1455 | 6072 | 7,79       | 8,45       | 4,60          | 0,62          |
| <i>aqc11-afr1</i> | 52,22       | 18,00       | 25,45       | 51,12       | 0,27         | 1,70         | 1457 | 6587 | 7,82       | 8,50       | 4,99          | 0,62          |
| <i>aqc1-afr2</i>  | 51,66       | 18,06       | 24,21       | 47,33       | 0,33         | 0,46         | 1719 | 1736 | 8,41       | 8,40       | 1,34          | 0,73          |
| <i>aqc2-afr2</i>  | 52,14       | 18,08       | 24,45       | 48,16       | 0,33         | 0,53         | 1719 | 1987 | 8,74       | 8,66       | 1,53          | 0,73          |
| <i>aqc3-afr2</i>  | 52,75       | 18,05       | 24,64       | 48,99       | 0,32         | 0,58         | 1720 | 2213 | 9,10       | 8,96       | 1,69          | 0,73          |
| <i>aqc4-afr2</i>  | 52,96       | 18,05       | 24,77       | 49,52       | 0,33         | 0,65         | 1752 | 2503 | 9,34       | 9,28       | 1,90          | 0,74          |
| <i>aqc5-afr2</i>  | 52,85       | 18,13       | 25,07       | 50,16       | 0,33         | 0,85         | 1761 | 3292 | 9,60       | 9,58       | 2,50          | 0,75          |
| <i>aqc6-afr2</i>  | 52,44       | 18,17       | 25,14       | 50,15       | 0,33         | 0,99         | 1762 | 3799 | 9,47       | 9,62       | 2,89          | 0,75          |
| <i>aqc7-afr2</i>  | 51,99       | 18,16       | 25,14       | 49,99       | 0,33         | 1,13         | 1762 | 4340 | 9,48       | 9,65       | 3,31          | 0,75          |
| <i>aqc8-afr2</i>  | 51,33       | 18,20       | 25,10       | 49,58       | 0,33         | 1,28         | 1759 | 4878 | 9,37       | 9,52       | 3,73          | 0,74          |
| <i>aqc9-afr2</i>  | 51,28       | 18,18       | 25,15       | 49,72       | 0,33         | 1,43         | 1764 | 5442 | 9,35       | 9,62       | 4,17          | 0,75          |
| <i>aqc10-afr2</i> | 51,36       | 18,19       | 25,23       | 49,93       | 0,33         | 1,57         | 1762 | 5997 | 9,42       | 9,72       | 4,58          | 0,75          |
| <i>aqc11-afr2</i> | 51,52       | 18,21       | 25,36       | 50,18       | 0,33         | 1,71         | 1766 | 6538 | 9,55       | 9,86       | 4,99          | 0,75          |
| <i>aqc1-afr3</i>  | 51,36       | 18,24       | 23,87       | 46,82       | 0,39         | 0,47         | 2042 | 1763 | 9,01       | 9,15       | 1,37          | 0,87          |
| <i>aqc2-afr3</i>  | 51,48       | 18,21       | 23,98       | 47,28       | 0,39         | 0,53         | 2048 | 1970 | 9,26       | 9,39       | 1,52          | 0,87          |
| <i>aqc3-afr3</i>  | 51,48       | 18,22       | 24,09       | 47,63       | 0,39         | 0,59         | 2044 | 2195 | 9,45       | 9,52       | 1,69          | 0,87          |
| <i>aqc4-afr3</i>  | 51,42       | 18,30       | 24,28       | 48,01       | 0,39         | 0,67         | 2050 | 2512 | 9,54       | 9,69       | 1,94          | 0,87          |
| <i>aqc5-afr3</i>  | 51,40       | 18,27       | 24,48       | 48,71       | 0,39         | 0,88         | 2059 | 3310 | 9,87       | 10,10      | 2,54          | 0,87          |
| <i>aqc6-afr3</i>  | 51,22       | 18,35       | 24,63       | 48,89       | 0,39         | 1,01         | 2060 | 3830 | 9,89       | 10,17      | 2,94          | 0,87          |
| <i>aqc7-afr3</i>  | 51,12       | 18,41       | 24,74       | 49,07       | 0,39         | 1,16         | 2066 | 4378 | 9,92       | 10,28      | 3,36          | 0,87          |
| <i>aqc8-afr3</i>  | 50,82       | 18,43       | 24,78       | 49,02       | 0,39         | 1,31         | 2067 | 4950 | 9,90       | 10,30      | 3,81          | 0,87          |
| <i>aqc9-afr3</i>  | 50,86       | 18,43       | 24,84       | 49,21       | 0,39         | 1,45         | 2068 | 5469 | 10,03      | 10,39      | 4,20          | 0,87          |
| <i>aqc10-afr3</i> | 51,03       | 18,45       | 24,94       | 49,51       | 0,39         | 1,58         | 2071 | 6001 | 10,05      | 10,52      | 4,60          | 0,88          |
| <i>aqc11-afr3</i> | 51,18       | 18,39       | 24,96       | 49,74       | 0,39         | 1,70         | 2072 | 6455 | 10,22      | 10,67      | 4,94          | 0,88          |
| <i>aqc1-afr4</i>  | 52,47       | 18,40       | 23,95       | 47,36       | 0,44         | 0,47         | 2323 | 1769 | 10,03      | 10,23      | 1,36          | 0,99          |
| <i>aqc2-afr4</i>  | 52,85       | 18,35       | 24,10       | 48,17       | 0,44         | 0,53         | 2324 | 2005 | 10,34      | 10,57      | 1,53          | 0,99          |
| <i>aqc3-afr4</i>  | 52,62       | 18,40       | 24,19       | 48,33       | 0,44         | 0,58         | 2323 | 2200 | 10,37      | 10,63      | 1,68          | 0,99          |
| <i>aqc4-afr4</i>  | 52,15       | 18,44       | 24,27       | 48,32       | 0,44         | 0,66         | 2329 | 2482 | 10,49      | 10,71      | 1,90          | 0,99          |
| <i>aqc5-afr4</i>  | 52,31       | 18,24       | 24,41       | 49,25       | 0,44         | 0,86         | 2327 | 3281 | 10,99      | 11,33      | 2,51          | 0,99          |
| <i>aqc6-afr4</i>  | 51,99       | 18,33       | 24,53       | 49,34       | 0,44         | 1,00         | 2338 | 3800 | 11,05      | 11,43      | 2,90          | 0,99          |
| <i>aqc7-afr4</i>  | 51,47       | 18,36       | 24,56       | 49,16       | 0,44         | 1,14         | 2335 | 4303 | 10,95      | 11,40      | 3,30          | 0,99          |
| <i>aqc8-afr4</i>  | 51,29       | 18,24       | 24,50       | 49,22       | 0,44         | 1,28         | 2331 | 4845 | 11,05      | 11,51      | 3,72          | 0,99          |

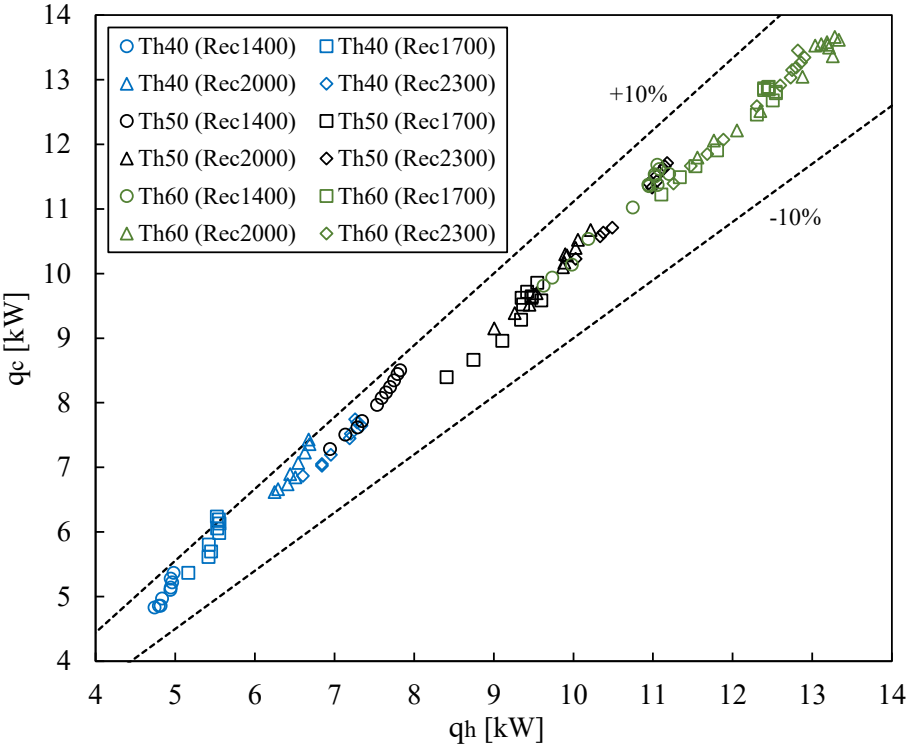
|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |       |       |      |      |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|
| <i>aqc9-afr4</i>  | 51,21 | 18,16 | 24,48 | 49,33 | 0,44 | 1,41 | 2328 | 5356 | 11,13 | 11,62 | 4,11 | 0,99 |
| <i>aqc10-afr4</i> | 51,23 | 18,30 | 24,65 | 49,51 | 0,44 | 1,55 | 2335 | 5898 | 11,15 | 11,66 | 4,52 | 0,99 |
| <i>aqc11-afr4</i> | 51,29 | 18,39 | 24,78 | 49,71 | 0,44 | 1,68 | 2337 | 6402 | 11,18 | 11,71 | 4,90 | 0,99 |

Fonte: Autor (2025).

Como pode ser observado na Tabela 36, no ramal complexo (com água quente) obteve-se uma pequena variação na temperatura, isso resultou em uma elevada incerteza experimental. Por outro lado, o escoamento de água fria (no ramal reto), teve um  $\Delta T$  de no mínimo 6°C. Essa diferença na temperatura se deve aos fluxos de massa utilizados em cada um dos ramais.

Na Fig. 77 é apresentado a comparação entre a taxa de transferência de calor do fluido frio e quente. A diferença entre as duas taxas ficou dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ , validando a primeira lei da termodinâmica. Pode ser visto claramente a evolução da taxa de transferência com a temperatura. A maior taxa de transferência de calor foi de 13,5 kW para 60°C. Observa-se um aumento considerável na taxa de transferência entre as temperaturas de 40°C e 50°C, o que não ocorreu entre as temperaturas de 50°C e 60°C. Possivelmente esse comportamento ocorre porque a bancada está próxima de seu limite de refrigeração, em torno de 12 kW.

Fig. 77 – Comparação da taxa de transferência do ramal frio e quente para os experimentos

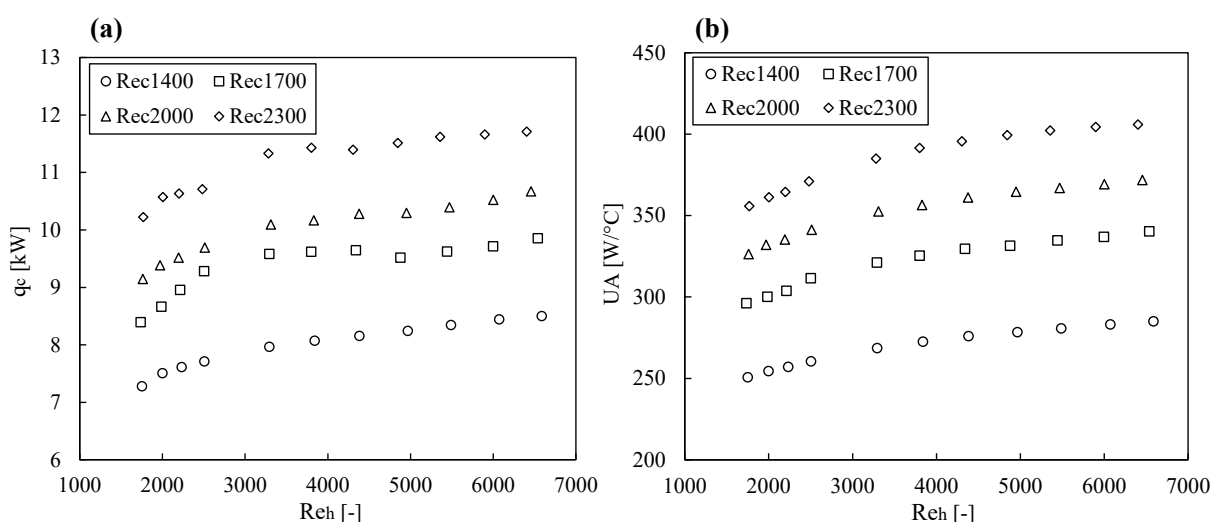


Fonte: Autor (2025).

Para a visualização dos resultados será empregada a taxa de transferência de calor e o coeficiente global de transferência de calor do ramal frio, visto que este apresentou a menor incerteza experimental e como mostrando anteriormente, os resultados experimentais do lado quente e frio foram semelhantes. Além disso, como a temperatura do ramal frio está mais próxima da temperatura ambiente em comparação com o ramal quente, este ramal apresenta menor perda de calor para o ambiente.

A Fig. 78a apresenta a taxa de transferência em função do número de Reynolds. Para  $Re_h$  entre 1000 e 3000 há um aumento significativo na taxa enquanto para vazões mais elevadas ( $Re_h > 3000$ ) a taxa tende a estabilizar. Ou seja, mesmo com um aumento da vazão do ramal quente, a variação na taxa de transferência de calor é muito pequena. O coeficiente global de transferência de calor para 50°C e ramal quente é apresentado na Fig. 78b. O mesmo comportamento observado na taxa de transferência de calor é encontrado para o coeficiente global de transferência de calor, uma estabilização em números de Re maiores.

Fig. 78 –  $T_h = 50^\circ\text{C}$ : (a) taxa de transferência de calor; (b) coeficiente global de transferência de calor vezes área.



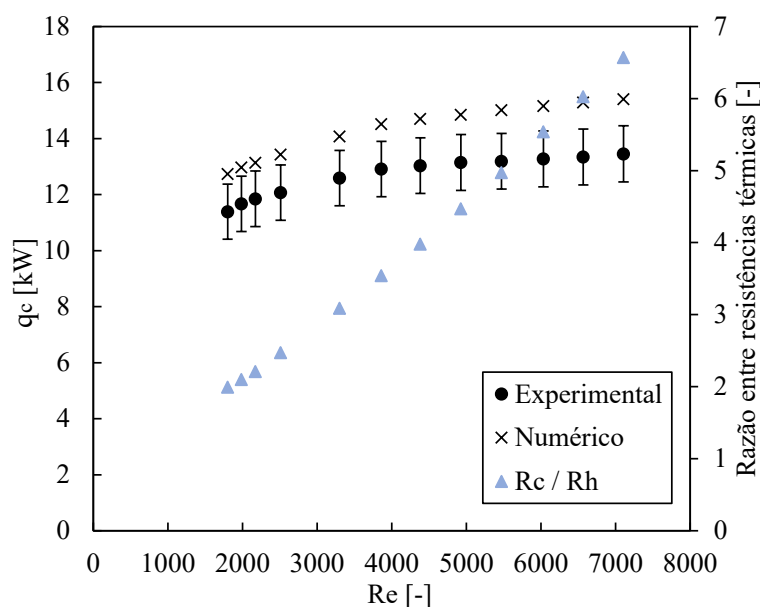
Fonte: Autor (2025).

O modelo numérico também foi desenvolvido para este caso, para ajudar a entender o comportamento térmico do trocador de calor. A Fig. 79 apresenta a taxa de transferência de calor em função do número de  $Re_h$  para o caso *afr4* ( $T_h = 60^\circ\text{C}$  e  $Re_c = 2300$ ), que variou experimentalmente entre 11,4 kW e 13,5 kW, e numericamente entre 12,7 kW e 15,4 kW. O modelo numérico diverge em média 11,2% dos resultados experimentais, com resultados próximos da incerteza experimental. A maior diferença foi observada para  $Re_h = 6568$  (12,8%)

e a menor para  $Re_h = 2172$  (9,8%). A diferença entre os resultados pode estar relacionada com a má distribuição do fluido na entrada do trocador, que é mais afetada no escoamento de água do que ar, como mostram os resultados de Strobel e Morteau (2022).

Ainda na Fig. 79 é apresentada a razão entre a resistência térmica do ramal frio e quente ( $R_c / R_h$ ) em função de  $Re$ . No início dos testes a resistência térmica do ramal frio (canal reto) é 2 vezes maior que do ramal quente, e a partir de  $Re_h = 4000$  é 3,5 vezes maior. Isso demonstra que os testes realizados retratam mais o comportamento do ramal reto do que do complexo, uma vez que ele é o responsável pela maior resistência térmica. Isso está relacionado com a diferença entre as áreas de transferência de calor e as resistências térmicas de convecção dos dois ramais. O canal complexo possui três vezes mais área de troca e um coeficiente convectivo maior, resultando em uma resistência à transferência de calor muito inferior à do ramal reto. Para  $Re_h > 3000$ , a resistência de convecção do ramal quente se torna tão baixa que aumentar a vazão já não interfere na troca de calor. O fluido quente começa a operar como uma fonte de calor sem variação de temperatura, e a taxa de transferência é regida pelo escoamento frio no ramal reto.

Fig. 79 – Comparação da taxa de transferência de calor experimental e numérica e razão entre resistências térmicas para o conjunto *afr4*:  $T_h = 60^\circ\text{C}$  e  $Re_c = 2300$



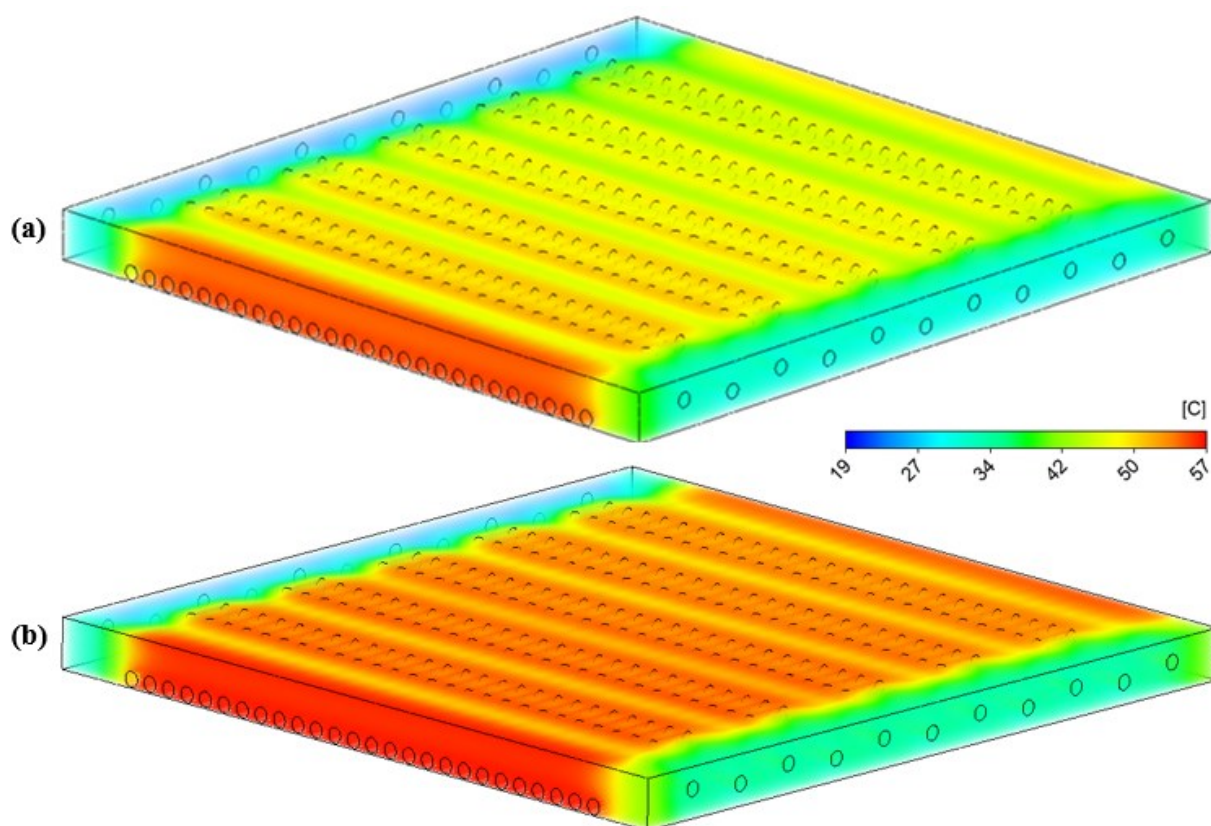
Fonte: Autor (2025).

A Fig. 80a apresenta a temperatura da lâmina do trocador de calor para o experimento *aqc1-afr4* ( $Re_c = 2325$  e  $Re_h = 1799$ ). Para os testes com  $T_h = 60^\circ\text{C}$ , este é o caso que resulta

na maior diferença de temperatura entre entrada e saída no ramal complexo ( $6,7^{\circ}\text{C}$ ), enquanto no ramal reto a diferença é de  $6,9^{\circ}\text{C}$ . Para este caso específico, a razão entre resistências ( $R_c / R_h$ ) é de 2, a menor razão entre as resistências térmicas e os dois ramais influenciaram na transferência de calor. Como destacado na Fig. 80a, a temperatura do sólido (lâmina) não é dominada pelo escoamento de nenhum ramal e fica em média  $42,1^{\circ}\text{C}$ . No fluido complexo a intensidade de turbulência é  $5,9\%$  enquanto no fluido reto,  $11,2\%$ . Dois fatores fazem com que a turbulência seja maior no ramal reto em relação ao complexo: um maior número de  $Re$  ( $2325 > 1799$ ) e uma maior rugosidade ( $96\mu\text{m} > 37\mu\text{m}$ ).

Para o caso de maior número de Reynolds do conjunto *aqc12-afr4*,  $Re_h = 7107$ , a diferença de temperatura no ramal quente é  $2,1^{\circ}\text{C}$  e no frio ( $Re_h = 2407$ ) a diferença é  $8,4^{\circ}\text{C}$ . Este caso possui uma razão entre as resistências térmicas de 6,6 e a temperatura média do sólido ficou  $47,2^{\circ}\text{C}$ ,  $5^{\circ}\text{C}$  mais quente que no caso anterior. Esse aumento representa a diferença entre resistências mencionada acima, sendo que neste caso a resistência do ramal quente é ainda menor, influenciando em um coeficiente convectivo maior e aumentando a temperatura média do sólido. A intensidade de turbulência neste caso subiu para  $23\%$  no fluido complexo enquanto no ramal reto se manteve a mesma. Agora, mesmo com a rugosidade maior no ramal reto, a intensidade de turbulência é superior devido ao aumento do  $Re_h$ .

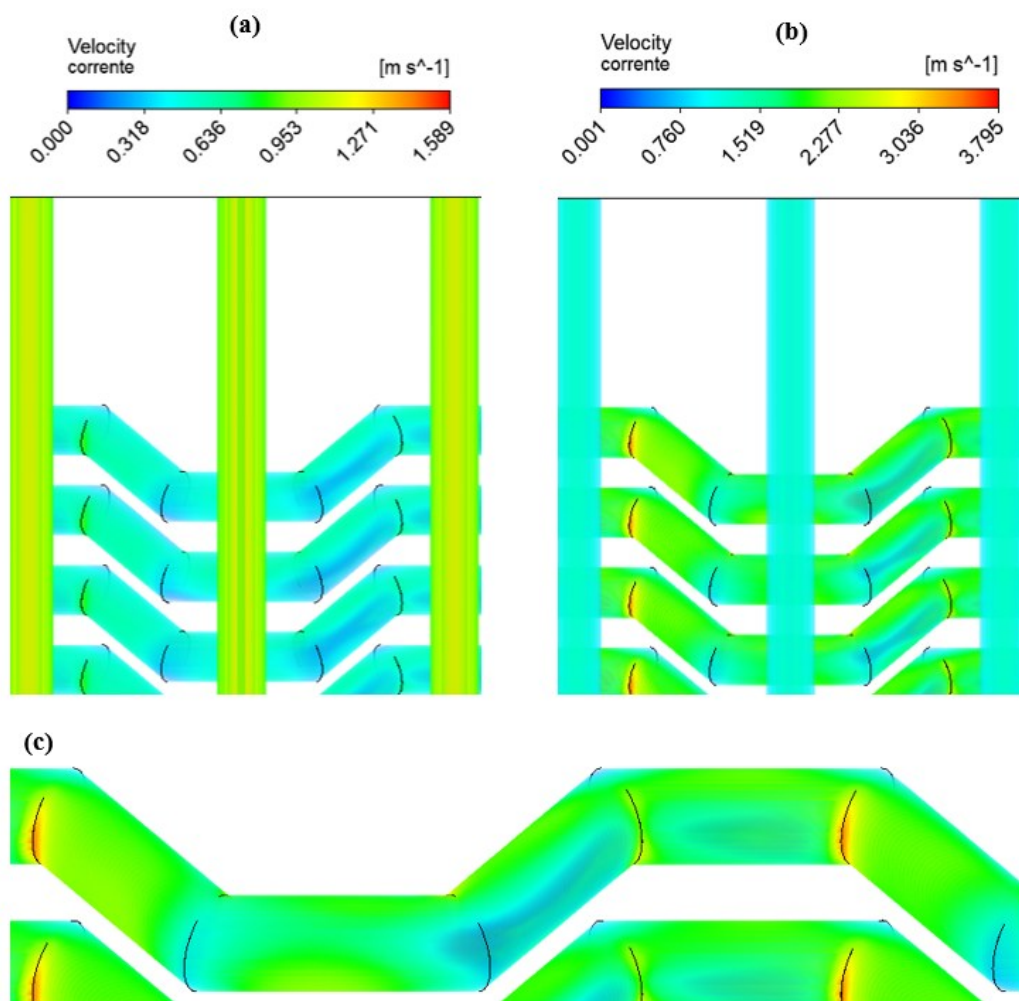
Fig. 80 – Campo de temperatura na lâmina núcleo: (a)  $T_h = 60^\circ\text{C}$ ,  $Re_c = 2325$  e  $Re_h = 1799$ ; (b)  $T_h = 60^\circ\text{C}$ ,  $Re_c = 2407$  e  $Re_h = 7107$ .



Fonte: Autor (2025).

Na Fig. 81 são apresentadas as linhas de corrente dos dois experimentos discutidos acima (*aqc1-afr4* e *aqc12-afr4*). É demonstrado um campo de velocidade constante no canal reto, enquanto nos canais complexos há certa variação da velocidade nas curvaturas. A discussão abordada anteriormente com relação desenvolvimento do escoamento pode ser explicada com auxílio dessas imagens. Na aproximação, Fig. 81c, observa-se que a quebra de geometria do canal complexo faz com que o campo de velocidade se altere toda vez que encontra uma quebra de geometria, aumentando a capacidade de transferência de calor deste canal. Salienta-se que a legenda da Fig. 81b também é válida para Fig. 81c.

Fig. 81 – Linhas de corrente nos canais retos e complexos para: (a) *aqc12-af4*; (b) *aqc12-af4*; (c) aproximação do canal complexo para *aqc12-af4*



Fonte: Autor (2025).

Os resultados numéricos ajudam a entender o comportamento experimental do trocador na configuração água – água. Os resultados experimentais não são adequados para discutir sobre o comportamento do canal complexo usando um modelo analítico, visto que para o modelo teórico seriam necessárias muitas aproximações, levando a altas divergências.

#### 4.4.3.2 Ramal complexo – frio; Ramal reto – quente

Uma segunda configuração de teste foi realizada, usando água fria no ramal complexo e água quente no ramal reto. A configuração anterior resultou em elevados  $Re$  para o ramal complexo, até 7000. Esta configuração, por outro lado, resultou em  $Re$  menores, no máximo

3000. Essa diferença se deve a mudança na temperatura do fluido, escoamentos à baixas temperaturas resultam em menores  $Re$  devido a viscosidade.

Os testes foram realizados com uma temperatura fixa no ramal frio ( $T_c = 20^\circ\text{C}$ ) e  $Re$  fixo no ramal quente ( $Re_h = 4600, 7000, 9200$  e  $11500$ ). Nos testes foi variado o número de  $Re_c$  entre 500 e 3000 e a temperatura do ramal quente ( $T_h$ ) entre  $30^\circ\text{C}$  e  $50^\circ\text{C}$ . Para maiores detalhes ver o item 3.2.2.2. A Tabela 37 apresenta os resultados para o teste realizado com  $T_h = 50^\circ\text{C}$  e a incerteza experimental para a taxa de transferência de calor ( $u$ ). Os demais resultados são mostrados no **Apêndice M**.

Tabela 37 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 50^\circ\text{C}$

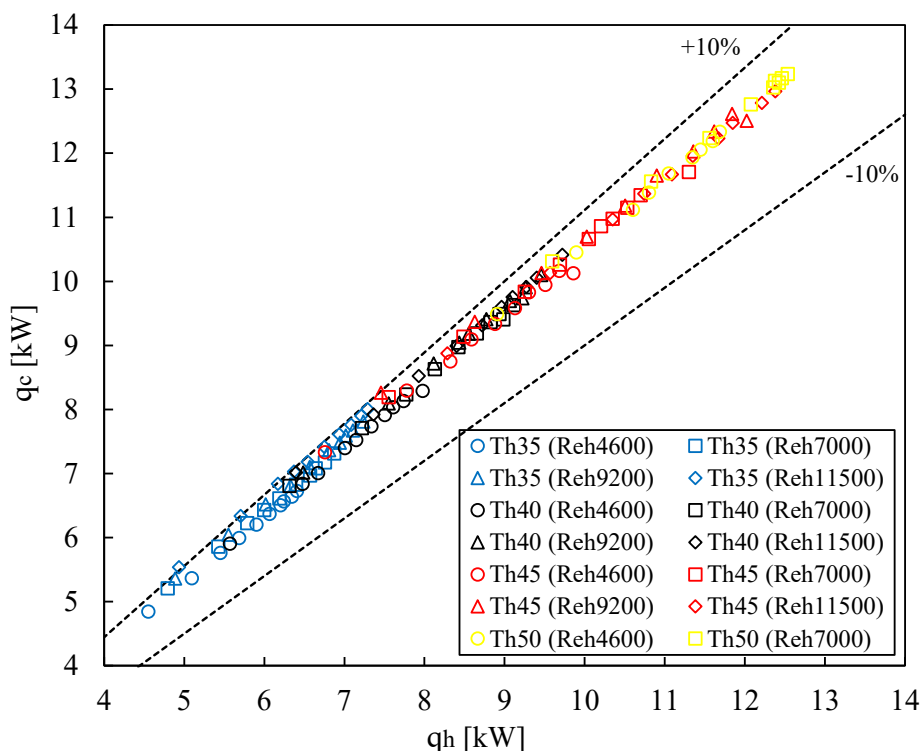
| Experimento      | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | Rec  | Reh  | qh [kW] | qc [kW] | u(qh) [kW] | u(qc) [kW] |
|------------------|----------|----------|----------|----------|------|------|---------|---------|------------|------------|
| <i>afc1-aqr1</i> | 52,93    | 20,09    | 29,57    | 48,66    | 553  | 4738 | 8,90    | 9,49    | 1,45       | 0,56       |
| <i>afc2-aqr1</i> | 52,46    | 20,20    | 27,03    | 47,71    | 821  | 4691 | 9,90    | 10,45   | 1,45       | 0,84       |
| <i>afc3-aqr1</i> | 52,17    | 20,28    | 25,63    | 47,12    | 1097 | 4693 | 10,60   | 11,11   | 1,45       | 1,13       |
| <i>afc4-aqr1</i> | 51,57    | 20,40    | 24,73    | 46,39    | 1375 | 4608 | 10,80   | 11,38   | 1,43       | 1,43       |
| <i>afc5-aqr1</i> | 51,31    | 20,47    | 24,15    | 46,00    | 1654 | 4575 | 11,05   | 11,68   | 1,43       | 1,72       |
| <i>afc6-aqr1</i> | 51,13    | 20,56    | 23,75    | 45,71    | 1937 | 4587 | 11,35   | 11,93   | 1,43       | 2,02       |
| <i>afc7-aqr1</i> | 50,89    | 20,65    | 23,48    | 45,43    | 2204 | 4574 | 11,45   | 12,05   | 1,43       | 2,30       |
| <i>afc8-aqr1</i> | 50,74    | 20,70    | 23,26    | 45,22    | 2455 | 4562 | 11,60   | 12,19   | 1,43       | 2,56       |
| <i>afc9-aqr1</i> | 50,57    | 20,79    | 23,06    | 45,01    | 2793 | 4551 | 11,69   | 12,33   | 1,43       | 2,92       |
| <i>afc1-aqr2</i> | 52,43    | 19,69    | 30,02    | 49,28    | 551  | 6940 | 9,60    | 10,31   | 2,13       | 0,56       |
| <i>afc2-aqr2</i> | 52,07    | 19,85    | 27,42    | 48,49    | 819  | 6836 | 10,83   | 11,56   | 2,10       | 0,84       |
| <i>afc3-aqr2</i> | 51,32    | 19,98    | 25,79    | 47,52    | 1111 | 6779 | 11,56   | 12,24   | 2,10       | 1,15       |
| <i>afc4-aqr2</i> | 51,04    | 20,26    | 25,11    | 47,21    | 1380 | 6986 | 12,07   | 12,76   | 2,17       | 1,43       |
| <i>afc5-aqr2</i> | 50,41    | 20,36    | 24,46    | 46,55    | 1654 | 7001 | 12,35   | 13,03   | 2,19       | 1,72       |
| <i>afc6-aqr2</i> | 50,04    | 20,54    | 24,09    | 46,12    | 1921 | 6904 | 12,42   | 13,10   | 2,16       | 2,00       |
| <i>afc7-aqr2</i> | 49,67    | 20,70    | 23,82    | 45,73    | 2205 | 6888 | 12,54   | 13,23   | 2,17       | 2,29       |
| <i>afc8-aqr2</i> | 48,97    | 20,81    | 23,57    | 45,13    | 2472 | 6929 | 12,46   | 13,17   | 2,19       | 2,57       |
| <i>afc9-aqr2</i> | 48,48    | 20,96    | 23,43    | 44,67    | 2760 | 6910 | 12,38   | 13,13   | 2,19       | 2,87       |

Fonte: Autor (2025).

A incerteza experimental do ramal frio  $u(qc)$  aumenta proporcionalmente com a vazão. Isso aconteceu devido à redução no  $\Delta T$  deste ramal, para o conjunto *afc-aqr1* o primeiro ponto experimental apresenta  $\Delta T = 9,5^\circ\text{C}$  e o último  $\Delta T = 2,5^\circ\text{C}$ . Tomou-se como padrão neste trabalho utilizar a taxa de transferência do ramal frio, devido a menor perda para o ambiente e o mesmo foi adotado para a incerteza experimental. A Fig. 82 apresenta as taxas de transferência de calor para o ramal quente e frio para todos os casos. A taxa de transferência variou entre 4,5 kW e 13,2 kW. Pode ser observado também que  $Re_c$  e  $T_h$  afetam diretamente a taxa de

transferência, maiores vazões e maiores temperaturas resultam em maiores taxas de transferência. A diferença entre a taxa do fluido frio e quente fica dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ .

Fig. 82 – Comparação da taxa de transferência do ramal frio e quente para os experimentos

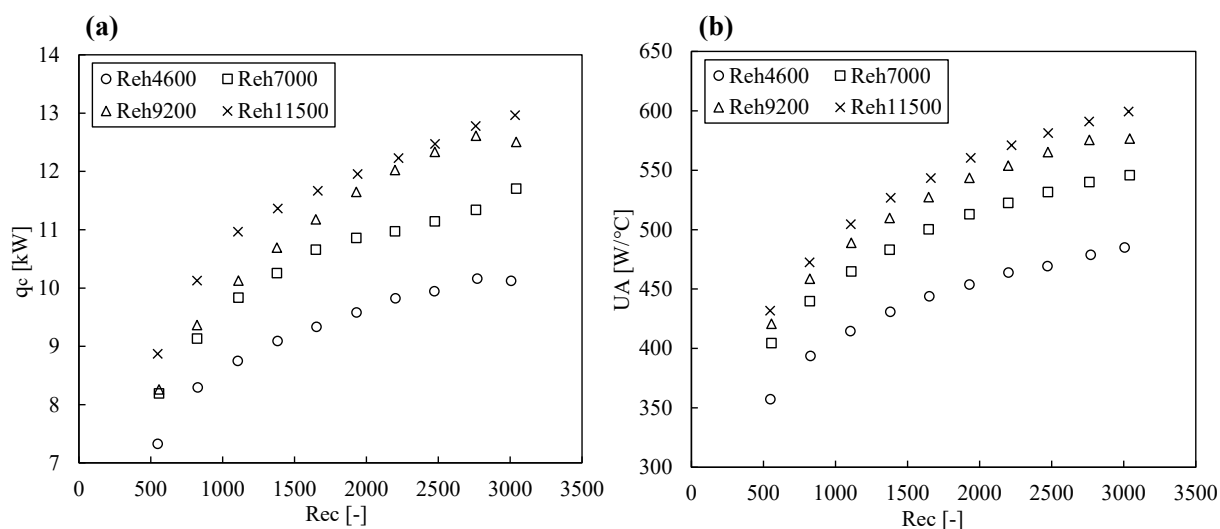


Fonte: Autor (2025).

A Fig. 83a apresenta a variação da taxa de transferência no ramal complexo em função do seu número de  $Re$ , para vazões fixas no ramal quente e  $T_h = 45^\circ\text{C}$ . Diferente do caso anterior (água quente no ramal complexo), a taxa aumenta em todo o intervalo avaliado, mostrando que a resistência do ramal complexo não pode ser desprezada, como ocorreu no caso anterior em que era até 6,5 vezes menor que a do ramal reto.

A Fig. 83b apresenta o coeficiente global de taxa de transferência de calor multiplicado pela área em função de  $Re$ . O coeficiente aumenta consideravelmente conforme  $Re_c$  aumenta, por outro lado, esse aumento significativo não é observado no aumento do  $Re_h$ . Entre uma faixa de  $Re_h$  e outra, o incremento de  $UA$  diminui.

Fig. 83 –  $T_h = 45^\circ\text{C}$ : (a) taxa de transferência de calor; (b) coeficiente global de transferência de calor vezes área.

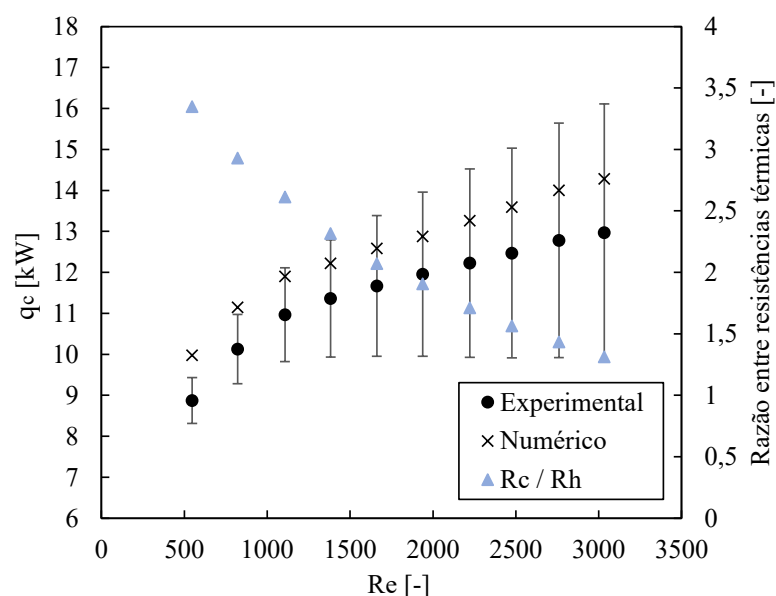


Fonte: Autor (2025).

Para compreender o comportamento do trocador de calor, foi realizada a simulação numérica do conjunto *aqr4*. A Fig. 84 apresenta uma comparação entre a taxa de transferência de calor experimental e numérica. O modelo numérico teve o mesmo comportamento dos dados experimentais, ficando próximo (2 casos) ou dentro da incerteza experimental (8 casos). No experimento a taxa de transferência fica entre 8,9 kW e 13 kW, enquanto no modelo entre 10 kW e 14,3 kW. A diferença média entre taxa de transferência numérica e experimental é de 8,4%.

Também na Fig. 84 é apresentada a razão da resistência térmica de convecção do ramal frio (complexo) pelo quente (reto), variando entre 1,3 e 3,3. Portanto, ao contrário do que ocorreu na configuração anterior, a maior resistência é do ramal complexo e nesta configuração é ele quem foi avaliado adequadamente. Entretanto, a discrepância entre resistências não foi elevada como constatado no caso do item anterior (4.4.3.1).

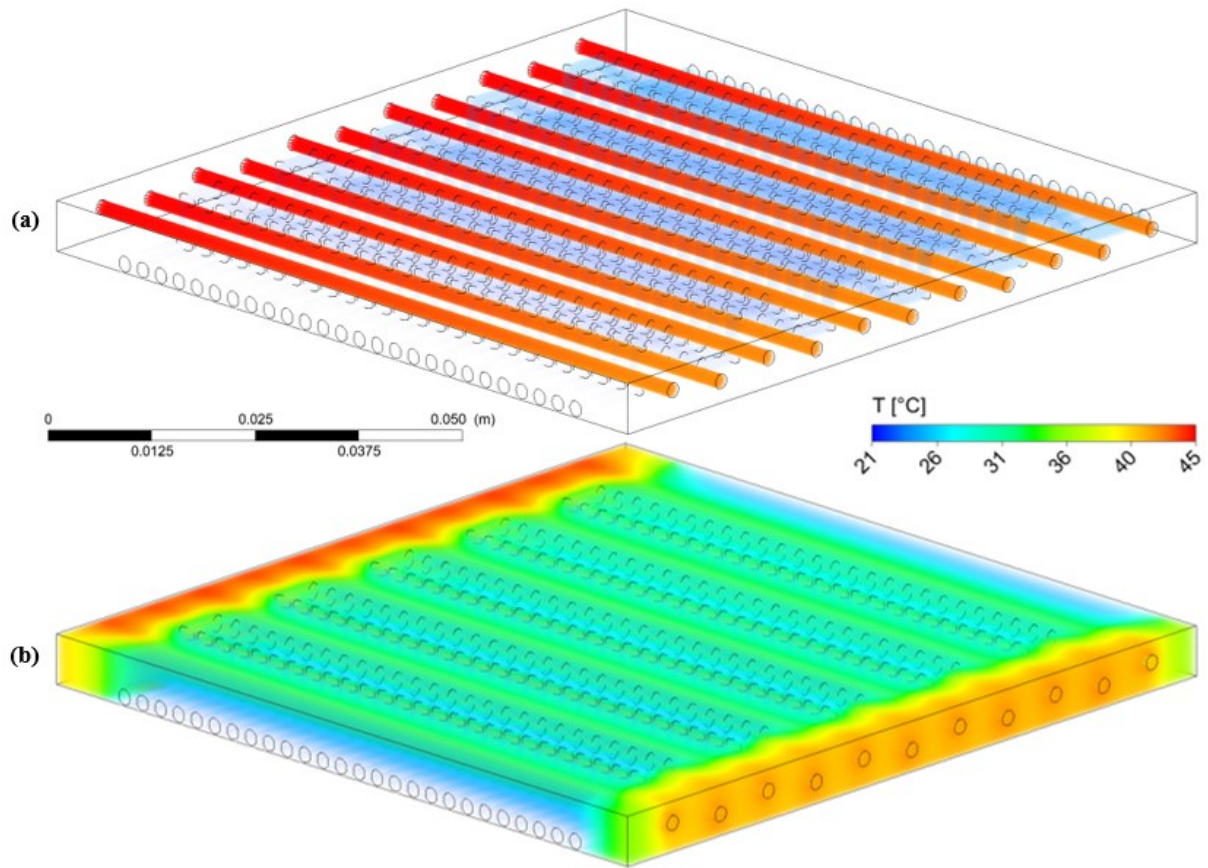
Fig. 84 – Comparação da taxa de transferência de calor e razão entre resistências térmicas para o conjunto *aqr4*:  $T_h = 45^\circ\text{C}$  e  $Re_h = 11500$



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 85 apresenta a temperatura da lâmina do trocador de calor para o experimento *afc10-aqr4*. Diferente do observado na simulação da configuração água – ar, a temperatura da lâmina não é dominada pelo escoamento de nenhum ramal. Experimentalmente, a diferença de temperatura no ramal quente e frio é a mesma ( $2,2^\circ\text{C}$ ), com  $Re_h = 11539$  e  $Re_c = 3034$ , respectivamente. Numericamente, a diferença de temperatura fica em  $2,5^\circ\text{C}$  para ambos os ramos. Para o experimento *afc1-aqr4*, a diferença de temperatura experimental no ramal complexo foi de  $9^\circ\text{C}$  e para o modelo numérico,  $9,9^\circ\text{C}$ .

Fig. 85 – Lâmina do trocador de calor complexo com parâmetros do experimento *afc10-aqr* ( $T_h = 45^\circ\text{C}$ ,  $Re_c = 3034$  e  $Re_h = 11539$ ): (a) fluidos; (b) sólido



Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.4 Correlação de Nusselt para canal complexo

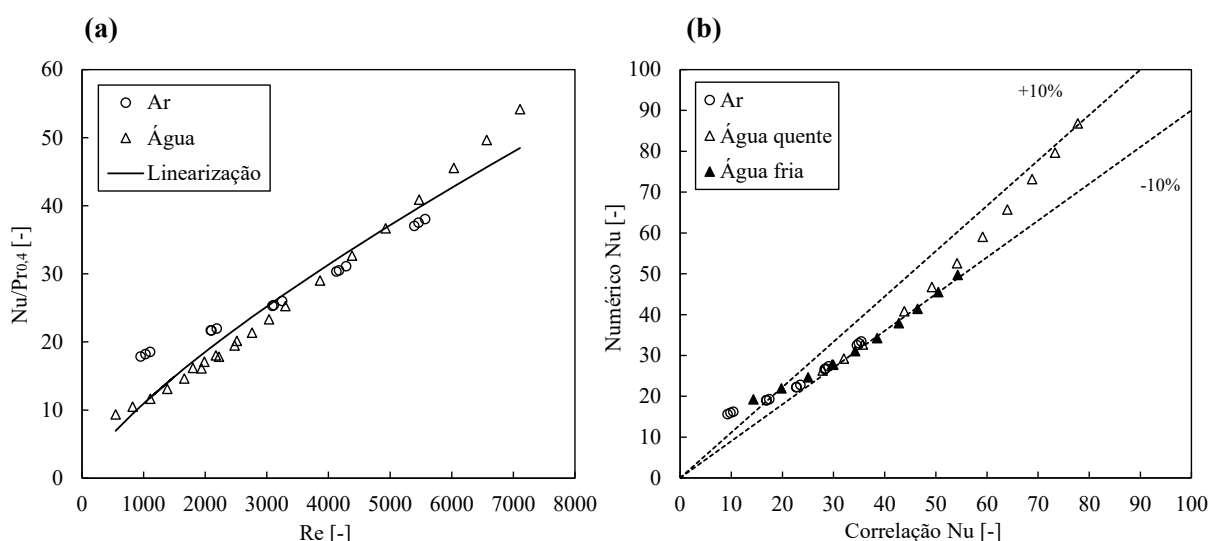
Como o ramal complexo não tem uma geometria comum encontrada na literatura, foi necessário propor uma correlação de Nu para este canal, que depende de fatores adimensionais relevantes, como Re e Pr. Para este propósito, a correlação de *Dittus-Boelter* foi modificada para encontrar as constantes envolvidas, ver Eq. (71). No total, dados de 37 simulações foram utilizados para desenvolver a correlação. O método de linearização de *Levenberg-Marquardt* foi utilizado para encontrar as constantes  $C$  e  $a$ .

$$Nu = C Re^a Pr^{0,4} \quad (71)$$

Os valores de Nu foram obtidos a partir dos modelos numéricos. O número de Nu foi definido de acordo com a Eq. (68) considerando parâmetros puramente numéricos. A Fig. 86a

apresenta o  $Nu$  obtido a partir do modelo numérico em função de  $Re$ . Os resultados consideram água quente, fria e ar no ramal complexo. A correlação obtida é apresentada na Eq. (72) e considera as 37 simulações. Na Fig. 86b os resultados numéricos e aqueles obtidos a partir da correlação desenvolvida são comparados. A maioria dos pontos ficou dentro da faixa de  $\pm 10\%$ , com exceção de alguns escoamentos laminares.

Fig. 86 – (a)  $Nu/Pr^{0,4}$  em função de  $Re$ ; (b) Comparação entre  $Nu$  obtido no modelo numérico com a correlação proposta



Fonte: Autor (2025).

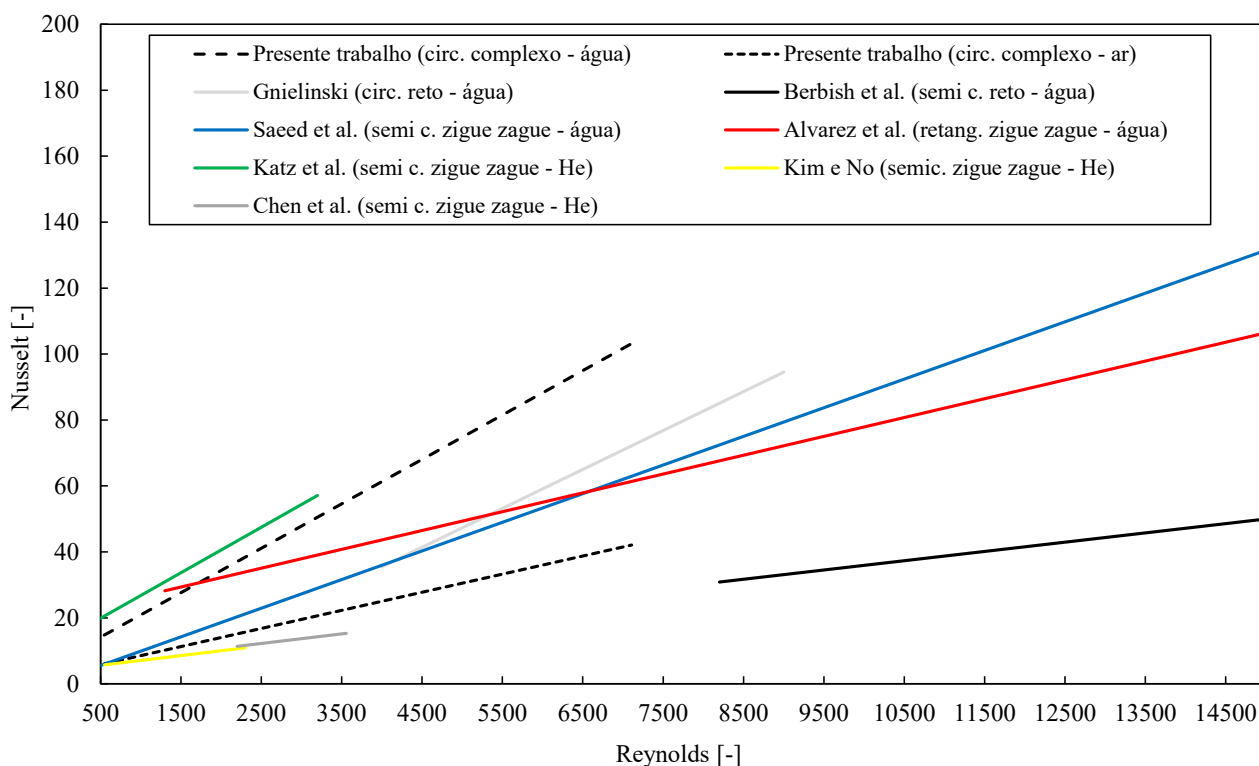
$$Nu = 0,0581Re^{0,7585}Pr^{0,4} \quad (72)$$

A última etapa da investigação térmica do trocador complexo proposto é a comparação com outras correlações de trocadores similares, para verificar o desempenho do canal complexo proposto. Para tanto outras correlações são plotadas na Fig. 87. A comparação restringiu estudos com fluidos de trabalho similares, como ar, água e hélio. As referências para água consideraram  $Pr = 6,6$  e para hélio e ar  $Pr = 0,7$ . Para sintetizar os resultados, a correlação obtida no presente trabalho foi comparada com as demais correlações (ver Tabela 5), uma vez que essa considerou tanto ar como água no ramal complexo. A correlação teórica de *Gnielinski* considerou um canal rugoso ( $k_s$ ).

Como pode ser visto, a geometria proposta apresentou melhor desempenho do que a maioria dos trabalhos, com exceção de (Katz et al., 2021) que utilizou ângulos de zigue-zague elevados. De acordo com (Zilio et al., 2022) esses trocadores são capazes de suportar pressões

elevadas. Como foi mostrado no presente trabalho, o núcleo complexo desenvolvido apresentou um desempenho térmico superior em comparação com outras configurações de canais. Esses dois fatores os tornam adequado para uma possível substituição de *PCHEs*.

Fig. 87 – Comparação entre correlação de Nu proposta com demais disponíveis na literatura



Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.5 Hidrodinâmico

Para o modelo hidrodinâmico foram realizadas algumas considerações, tais como distribuição uniforme da vazão nos canais, sem variação de pressão na entrada do núcleo e pressão tomada na entrada do canal. No modelo numérico foi utilizada a rugosidade definida como  $k_s$ , definida na seção 3.2.4.

##### 4.4.5.1 Ramal complexo

O ramal complexo foi impresso verticalmente à plataforma de construção da impressora, isso garante uma boa qualidade circunferencial do canal, como mostrado por Kempen et al. (2014), ver Fig. 7. Na comparação com resultados numéricos, o canal simulado

numericamente apresenta seção perfeitamente circular e leva em conta a rugosidade medida no protótipo auxiliar, ver seção 4.4.1.

Na Fig. 88a são apresentados nove experimentos e simulações avaliadas no canal complexo, abrangendo um intervalo de  $Re$  entre 387 e 2718 para escoamento com água. A queda de pressão ( $\Delta P$ ) experimental total variou entre 0,005 bar e 0,17 bar, com uma incerteza experimental constante de 0,0027 bar. O modelo numérico teve o mesmo comportamento dos dados experimentais, com um  $\Delta P$  variando entre 0,0046 bar e 0,123 bar. O erro médio do modelo foi de 20.5%, e a maior diferença ocorreu para maiores vazões.

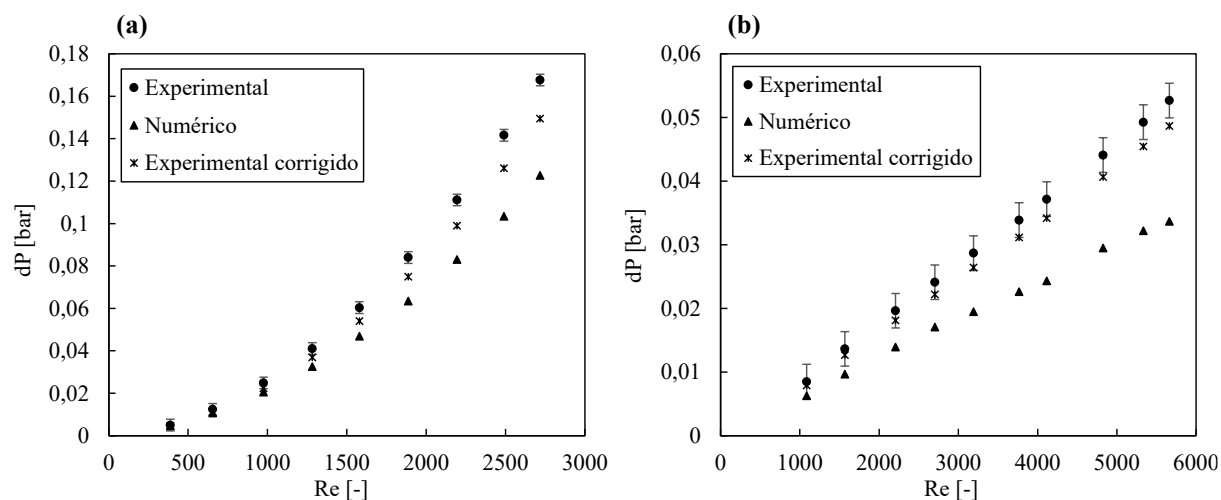
Também na Fig. 88a é realizada uma correção nos resultados experimentais, subtraindo a queda de pressão devido a expansão e contração do fluido ao entrar nos canais. Essas parcelas não são contabilizadas no modelo numérico, uma vez que foi modelado apenas um canal. Ao descontá-las, a diferença entre modelo numérico e experimento reduz, apresentando uma média de 12%.

Se tratando de resultados hidrodinâmicos, foram assumidas algumas hipóteses que podem afetar os resultados. Uma das hipóteses adotadas é a distribuição uniforme do fluido, que pode não ser totalmente válida. Segundo Strobel e Morteau (2022) a má distribuição resulta em maiores quedas de pressão em trocadores de calor compactos, justificando maiores  $\Delta P$  nos experimentos.

Como o canal complexo foi impresso na vertical, ele apresenta uma boa circularidade, logo o formato provavelmente não está influenciando nos resultados. Por outro lado, a rugosidade dentro do canal pode estar afetando os resultados, visto que canais produzidos por impressão 3D possuem uma grande variação na rugosidade. Além disso, a rugosidade foi medida dentro do canal de uma amostra auxiliar, não no próprio núcleo, podendo afetar os resultados.

Na Fig. 88b são apresentados os dados experimentais de queda de pressão com ar no ramal complexo e sua respectiva comparação com o modelo numérico. Neste caso, o modelo numérico trata o ar como um fluido ideal compressível, devido as altas pressões apresentadas no núcleo. A perda de carga experimental apresentou valores entre 0,008 bar e 0,053 bar e uma diferença para o modelo numérico média de 32%. Novamente os resultados numéricos são de menor magnitude em comparação com o experimento. Ao considerar as perdas de entrada e saída do núcleo, o erro médio do modelo numérico cai para 26%. Portanto, o modelo numérico desenvolvido para prever a queda de pressão apresentou bons resultados, com um erro médio considerando água e ar de 19%.

Fig. 88 – Queda de pressão do ramal complexo: (a) água; (b) ar

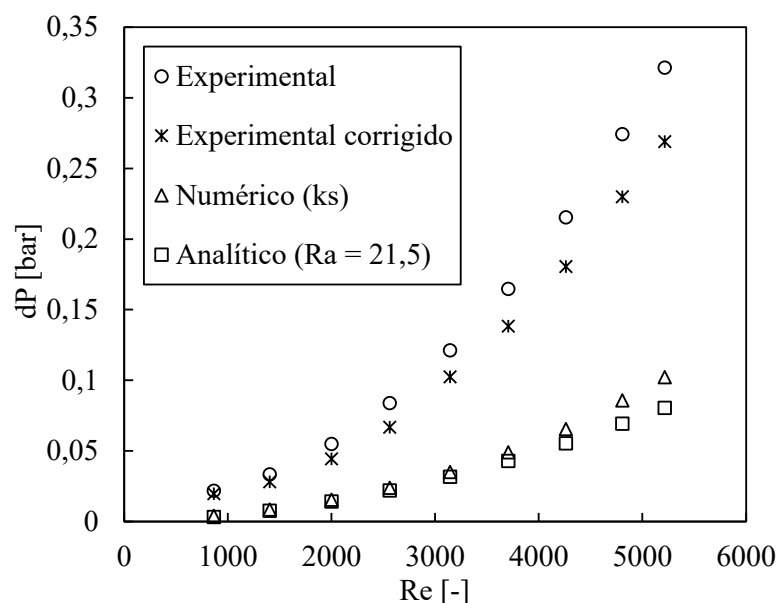


Fonte: Autor (2025).

#### 4.4.5.2 Ramal reto

A Fig. 89 apresenta os resultados experimentais, numéricos e analíticos da perda de carga para o escoamento de água no ramal reto. Observa-se que a perda de carga experimental no ramal reto é consideravelmente superior àquelas previstas por quaisquer um dos modelos, seja analítico ou numérico. Em valores absolutos, a queda de pressão experimental dentro do canal, descontando a parcela de expansão e contração, variou entre 0,022 bar e 0,32 bar, resultando em uma diferença média de 66% e 76% em relação aos resultados numéricos e analíticos, respectivamente. A incerteza experimental é constante ao longo de todo o intervalo e igual a 0,008 bar.

Fig. 89 – Comparação da queda de pressão avaliada com água no ramal reto – experimental, analítico e numérico



Fonte: Autor (2025).

No estudo do canal complexo foi possível constatar que o modelo numérico apresentou bons resultados, com um erro médio de 19%. Por outro lado, o presente caso teve um erro elevado. Nenhum dos modelos, analítico ou numérico, foi capaz de prever a queda de pressão dos canais retos. O canal complexo possui uma geometria mais difícil de analisar do que o reto, entretanto, o reto foi o caso que apresentou os maiores erros. Acredita-se que no caso do canal reto fabricado via manufatura aditiva, a rugosidade não é o único fator que esteja influenciando na divergência dos resultados.

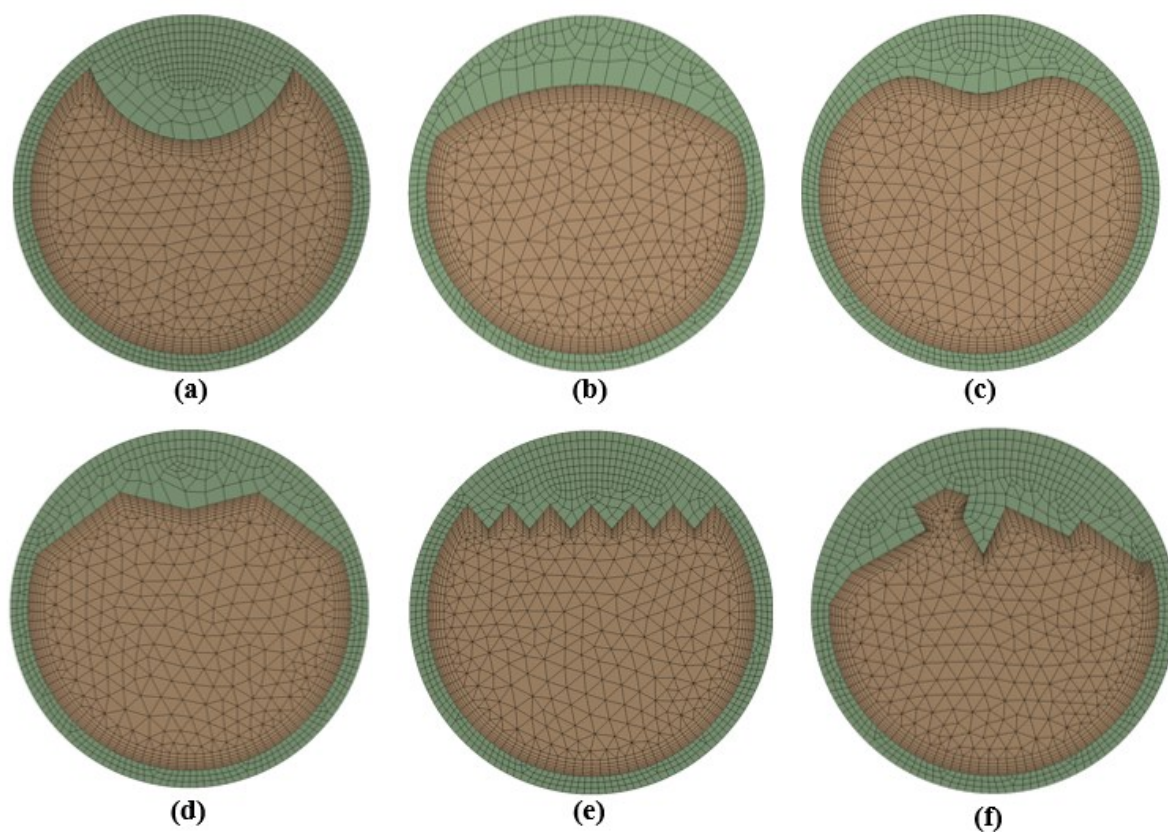
O canal complexo foi impresso na vertical da plataforma de impressão (ver Fig. 7), e como pode ser visto, canais de 2 mm impressos na vertical apresentam uma seção quase que perfeitamente circular, enquanto aqueles impressos na horizontal (canal reto) apresentam variação de seção na parte superior. Essa variação se deve ao pó metálico que não deveria ser fundido, mas foi, devido ao elevado fluxo de calor proveniente do laser. Muller et al. (2017) verificou o mesmo comportamento em canais com 1 mm de diâmetro, mostrando que canais paralelos à plataforma de fabricação apresentam a circularidade afetada.

Devido à essa particularidade do processo de fabricação, foi necessário fazer um estudo da influência da seção do canal na queda de pressão. Para isso foram modeladas 6 geometrias adicionais, apresentadas na Fig. 90, buscando uma representação geométrica mais fiel ao canal real. As geometrias (a), (b) e (c) da Fig. 90 consideram apenas a perda de

circularidade na porção superior do canal. Em contrapartida, as geometrias (d), (e) e (f) foram replicadas a partir das imagens obtidas do núcleo impresso, apresentadas na Fig. 33.

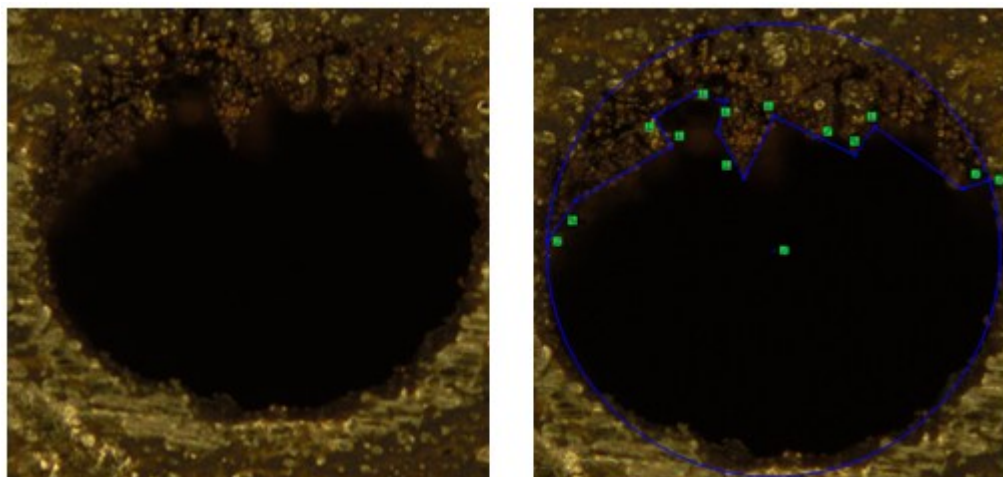
A geometria **(f)** foi replicada diretamente de uma imagem de um canal reto do protótipo de rugosidade (Fig. 35), utilizando um estereoscópio, e essa aproximação é apresentada na Fig. 91. O depósito na parte superior do canal fica claro na imagem. Este depósito não apresenta um padrão regular em todos os canais e a replicação é utilizada para uma aproximação apenas.

Fig. 90 – Geometrias alternativas para investigação da divergência de perda de carga no canal reto



Fonte: Autor (2025).

Fig. 91 – Imagem de um dos canais retos utilizados para concepção da geometria (f)



Fonte: Autor (2025).

Para o modelo numérico foram empregadas as mesmas hipóteses e condições descritas no item 3.2.4. Para essa investigação das geometrias foi investigado apenas um ponto experimental, caso com vazão igual a 0.992 kg/s. Na Tabela 38 são apresentados dados de queda de pressão para cada geometria e a queda de pressão experimental corrigida.

Dentre as 6 geometrias avaliadas, duas apresentaram uma perda de carga similar àquela observada no experimento: **a** e **f**. A geometria **a** divergiu em 19,5% em relação ao ponto experimental, enquanto a geometria **f**, 19,1%, ambos resultados são considerados aceitáveis em uma comparação hidrodinâmica. As demais geometrias divergem consideravelmente do resultado experimental.

Tabela 38 – Queda de pressão avaliada nas geometrias alternativas

| <i>Geometria</i> | $\Delta P$ experimental corrigido [bar] | $\Delta P$ numérico [bar] | Diferença [%] |
|------------------|-----------------------------------------|---------------------------|---------------|
| (a)              | 0.26898                                 | 0.21657                   | 19.5%         |
| (b)              |                                         | 0.16095                   | 40.2%         |
| (c)              |                                         | 0.14603                   | 45.7%         |
| (d)              |                                         | 0.15533                   | 42.3%         |
| (e)              |                                         | 0.17364                   | 35.4%         |
| (f)              |                                         | 0.2176                    | 19.1%         |

Fonte: Autor (2025).

A seção transversal usada na geometria **f** é uma replicação de uma imagem real do canal. Entretanto, não é possível garantir que essa mesma geometria se mantém ao longo de todo o caminho, visto que diferentes geometrias foram observadas nos canais retos, ver Fig. 33.

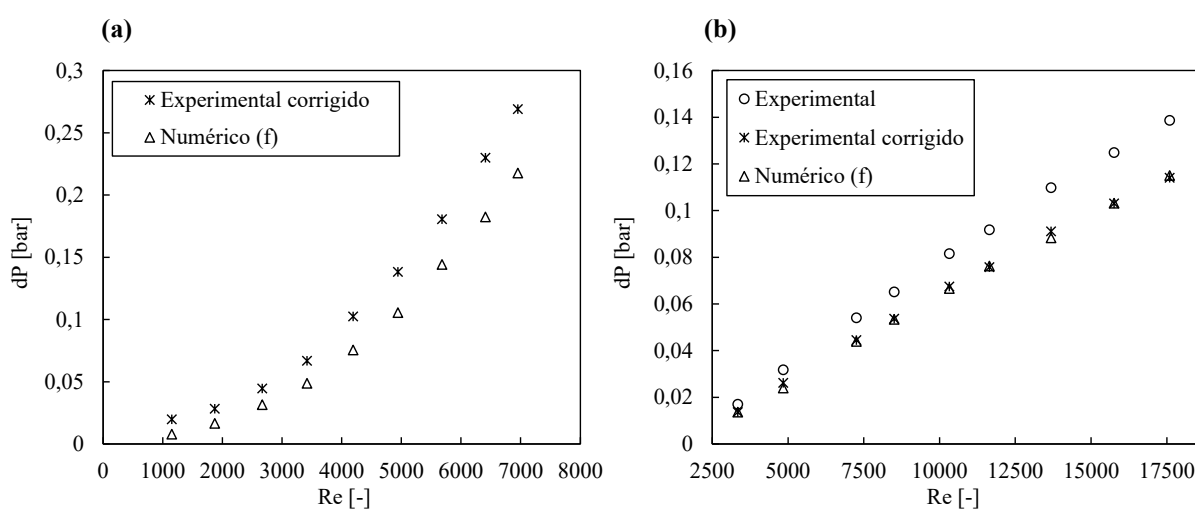
Essa variação da seção ao longo do canal pode resultar em um aumento na queda de pressão. Para a geometria **f** o  $D_h = 1,4$  mm de acordo com a Eq. (3), o que por consequência gera um aumento no Re dos canais. Por este motivo a Fig. 92 apresenta maiores Re.

Como a geometria **f** apresentou a menor divergência de resultados e pode ser considerada a representação mais fiel da geometria do canal reto, ela foi utilizada para comparação com todos os pontos experimentais. Os resultados são representados na Fig. 92a para água. A alteração da geometria faz com que a diferença média entre experimento e modelo fique em 30% com água.

A verificação da perda de carga no ramal reto também foi realizada com ar como fluido. Os resultados são compilados na Fig. 92b, em que o  $\Delta P$  experimental variou entre 0,017 bar e 0,14 bar. O modelo numérico foi avaliado diretamente com a geometria **f** descrita acima. Após corrigir os dados experimentais com as parcelas referentes a expansão e contração no canal, a diferença entre a perda de carga experimental e numérica foi de 1,5%.

Pode ser visto que o modelo numérico considerando a geometria **f** é capaz de prever a perda de carga experimental tanto do canal reto com ar quanto com água, com resultados melhores do que os obtidos com um canal completamente circular. Fatores como má distribuição e variação da rugosidade ainda podem estar afetando os resultados e justificam essa diferença entre os dados.

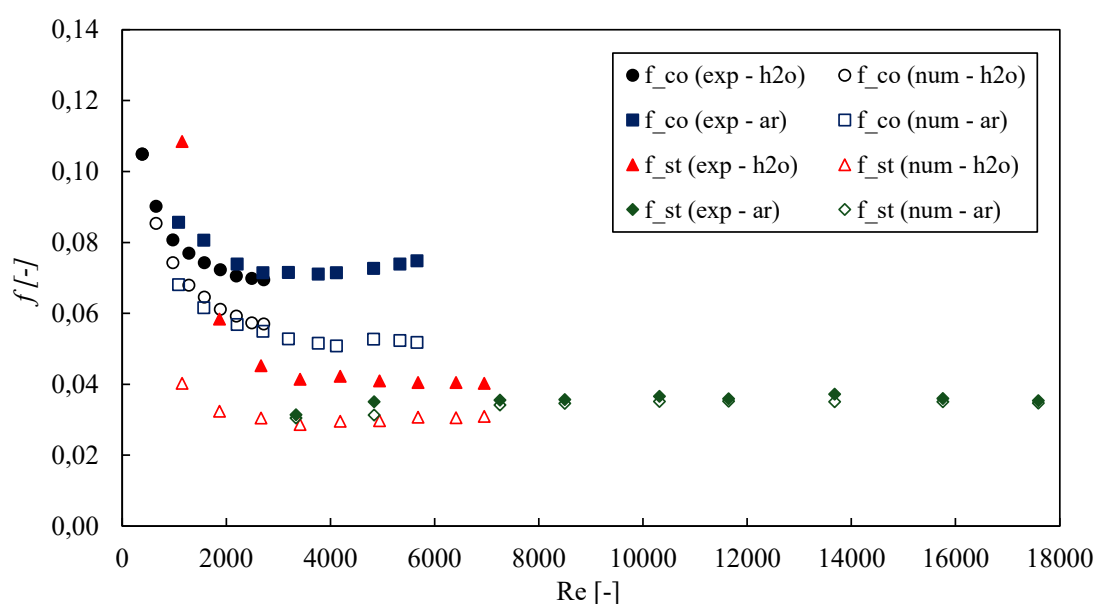
Fig. 92 – Comparação entre a queda de pressão experimental corrigida e numérica considerando a geometria **f**: (a) água; (b) ar



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 93 apresenta um compilado do fator de atrito de *Fanning* em função do número de Re para os experimentos avaliados no canal reto e também no complexo. Para obtenção do fato de atrito foi utilizada a expressão mostrada na Eq. (41), com os valores de  $\Delta P$ , tanto numérico quanto experimental, é possível obter  $f$ . O menor fator de atrito foi observado no canal reto baseando-se na perda de carga numérica e o maior para o canal complexo baseando-se na perda de carga experimental.

Fig. 93 – Comparação do fator de atrito de *Fanning* experimental e numérico para a o canal reto – “st” e complexo – “co”



Fonte: Autor (2025).

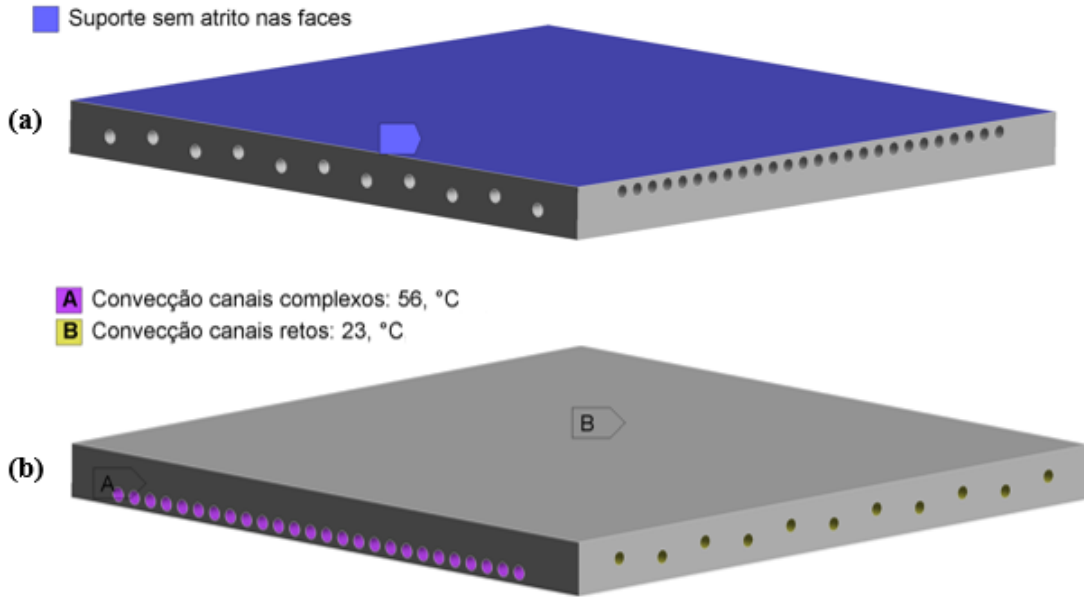
#### 4.4.6 Estrutural

Buscando acoplar todos os estudos realizados até este momento, a lâmina do núcleo complexo foi investigada estruturalmente. Foram realizadas três análises de tensão: 1) considerando convecção forçada e baixa pressão (térmica); 2) considerando alta pressão e temperatura uniforme (mecânica); 3) considerando alta pressão e convecção forçada (tensão termomecânica).

O modelo numérico da lâmina do trocador, discretizado na seção 3.2.3, foi utilizado para a análise estrutural. Neste caso, foram utilizados os dados do experimento térmico com configuração água – água *aqc12-afr4*, com o objetivo de estimar o campo de tensão. Nesta investigação foi simulada uma camada, ver Fig. 94, e empregada a condição de suporte sem

atrito nas faces superior e inferior (Fig. 94a). Essa condição assume que não há deformação normal às faces suportadas. Para a simulação do campo de temperatura foi empregada a condição de convecção nos canais ( $h$  prescrito), ver Fig. 94b.

Fig. 94 – Condições de contorno e carregamento para simulação estrutural da lâmina do trocador complexo



Fonte: Autor (2025).

O coeficiente convectivo dos canais complexos (Eq. (52)) foi definido através do Nu obtido no modelo numérico levantado para o experimento *aqc12-afr4*, igual a 86,8. Como não foram levantados números de Nu para o ramal reto com água, o coeficiente convectivo foi calculado de acordo com a expressão de *Gnielinski* (Eq. (59)). As temperaturas usadas foram as mesmas do teste *aqc12-afr4* ( $\Delta T = 33^\circ\text{C}$ ). Os valores são apresentados na Tabela 39.

Tabela 39 – Coeficientes convectivos para canais complexos e retos

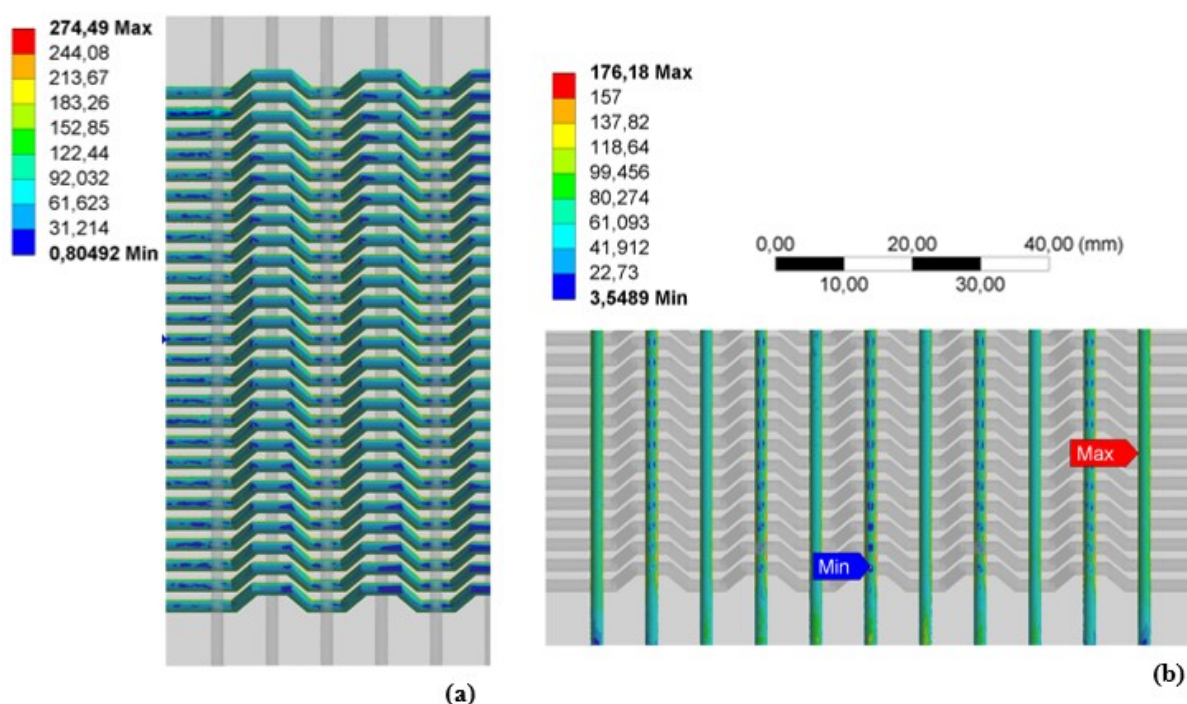
| $h$ complexo [W/mm <sup>2</sup> °C] | $T$ complexo [°C] | $h$ reto [W/mm <sup>2</sup> °C] | $T$ reto [°C] |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------|---------------|
| 0,0298                              | 56,3              | 0,0045                          | 23            |

Fonte: Autor (2025).

A simulação transiente considera um tempo total de 10 segundos. Na Fig. 95 é apresentado o campo de tensão na lâmina do trocador complexo. Pode ser visto que o campo de tensão é uniforme nos canais. A tensão máxima observada é de 274,5 MPa nos canais complexos e 176,2 MPa nos retos. Diferentemente dos resultados observados nas seções de

tensão térmica transiente no cilindro (seção 4.1.1) e no protótipo *SLMHE* (seção 4.2.1), a maior tensão da lâmina se dá no tempo de 10 segundos, no regime permanente. Como os ramais possuem coeficientes convectivos semelhantes, existe um gradiente de temperatura relevante durante todo o tempo, não ocorrendo a homogeneização da temperatura.

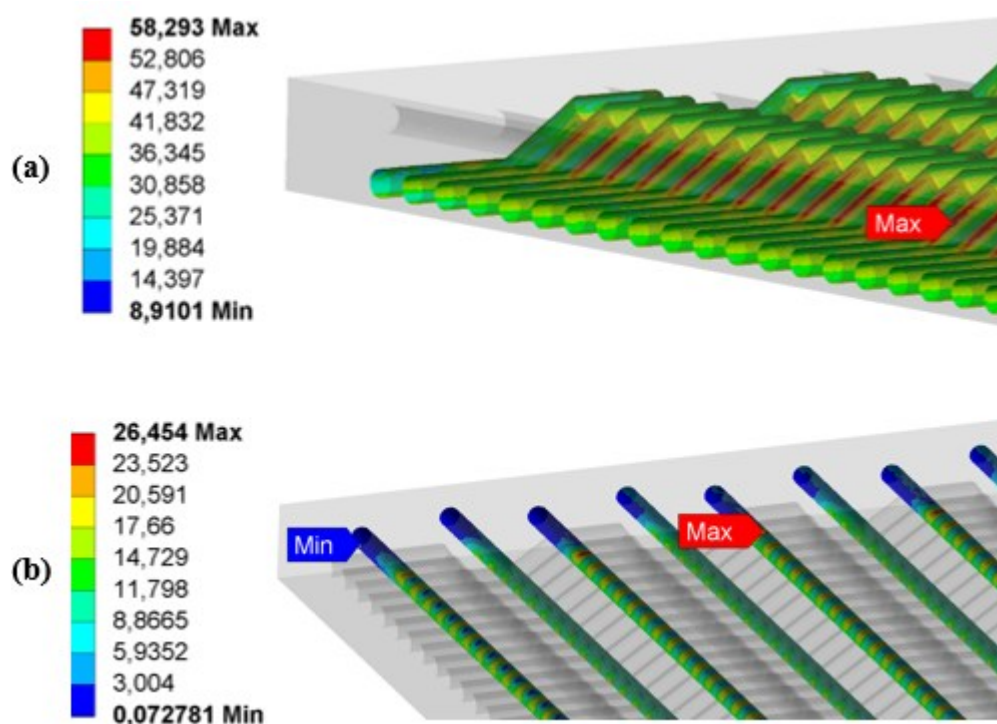
Fig. 95 – Campo de tensão térmica na lâmina do trocador complexo com faces suportadas sem atrito: (a) canais complexos e (b) canais retos



Fonte: Autor (2025).

Na segunda análise, que considera apenas as tensões mecânicas, foi levado em consideração um caso real de operação de um trocador de calor compacto. Trocadores compactos de circuito impresso (PCHE) operam com altas pressões, de até 400 bar (Hesselgreaves, 2017). Em razão disso, o ramal complexo da lâmina pressurizada a 200 bar, enquanto o ramal reto foi mantido na pressão atmosférica. A temperatura foi considerada uniforme (sem tensão térmica envolvida). As tensões resultantes da pressurização (Fig. 96), apresentaram tensões menores que do caso anterior, que era puramente térmico. A tensão máxima nos canais complexos foi 58,2 MPa e nos retos, 26,5 MPa.

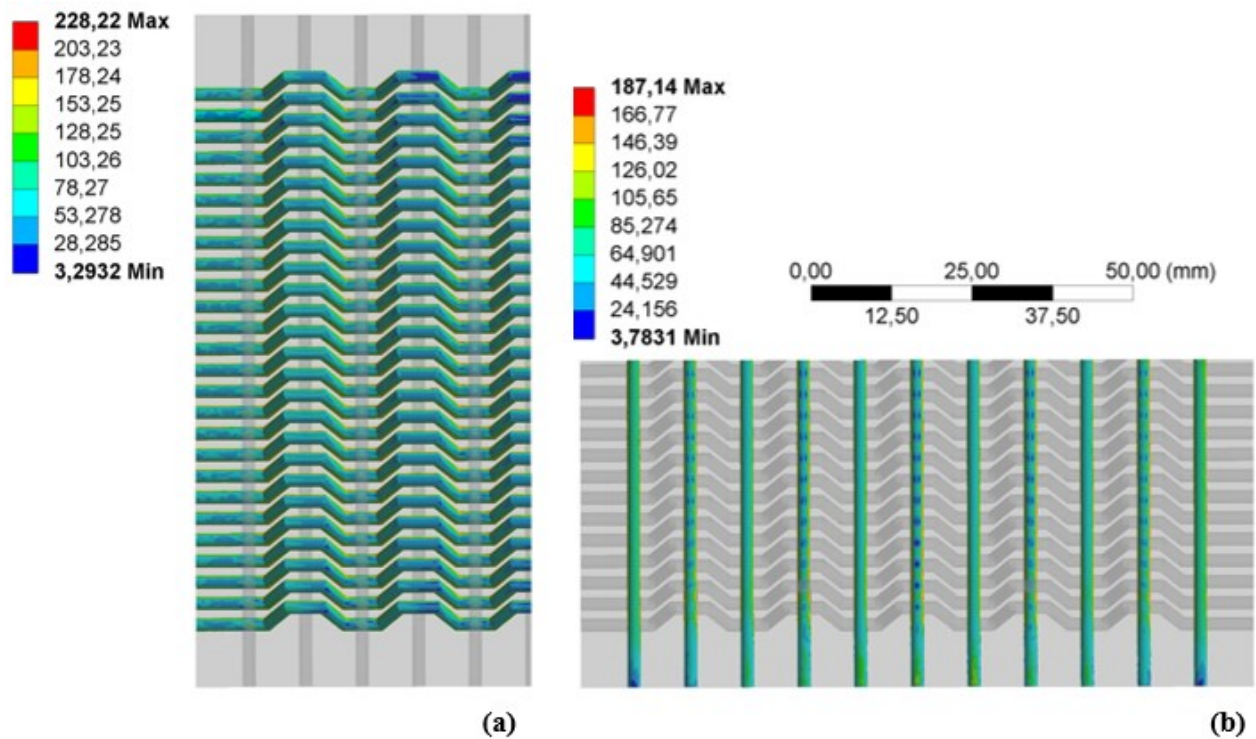
Fig. 96 – Campo de tensão mecânica na lâmina do trocador complexo: (a) canais complexos e (b) canais retos



Fonte: Autor (2025).

A Fig. 97 apresenta o último caso analisado, mostrando o campo de tensões ao considerar os esforços combinados: pressão e temperatura. A tensão máxima diminuiu 17% (228,2 MPa) nos canais complexos e aumentou 6% (187,1 MPa) nos canais retos em comparação com as tensões puramente térmicas. Podemos observar que a pressurização gera uma tensão trativa na superfície interna dos canais complexos, enquanto a tensão térmica gera esforços compressivos, fazendo com que a tensão seja aliviada na parede dos canais complexos.

Fig. 97 – Campo de tensão termomecânica na lâmina do trocador complexo:(a) canais complexos e (b) canais retos



Fonte: Autor (2025).

A Tabela 40 compila as tensões máximas e médias para cada conjunto de ramal.

Tabela 40 – Tensão máxima e média para cada conjunto de canais e condição de contorno

| Carregamento         | S máxima - complexos | S máxima - retos | S média - complexos | S média - retos |
|----------------------|----------------------|------------------|---------------------|-----------------|
| <i>Térmico</i>       | 274,5                | 176,2            | 107,7               | 72,5            |
| <i>Mecânico</i>      | 58,3                 | 26,5             | 38,3                | 13,3            |
| <i>Termomecânico</i> | 228,2                | 187,1            | 98,9                | 79,7            |

Fonte: Autor (2025).

Como ficou claro durante o trabalho inteiro, seja no cilindro, no protótipo *SLMHE* ou na lâmina com canais complexos, fica claro que o campo de temperatura deve sempre ser considerado em análises de tensão de um trocador de calor. A maioria dos trabalhos não leva isso em consideração (ver trabalhos de Mylavarapu et al. (2012), Safari et al. (2023), Xu et al. (2022), entre outros).

Analisando o trocador real, conjunto de 13 lâminas, entende-se que uma lâmina se apoia sobre a outra, restringindo a deformação normal ao plano neste caso. A forma mais correta de definir qual a condição representa adequadamente o modelo seria através de uma análise

experimental e posteriormente confrontar os resultados com o modelo, análise que não cabe neste trabalho e é deixada como sugestão para trabalhos futuros.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o comportamento estrutural e desempenho termo hidráulico de um trocador compacto fabricado por impressão 3D com canais complexos.

Os experimentos realizados permitiram uma avaliação abrangente do comportamento termomecânico do tubo espesso e do protótipo de trocador de calor compacto sob diferentes condições de temperatura e pressão. Observou-se que as tensões térmicas transientes geram picos de tensão, fortemente influenciados pela diferença de temperatura e pelas características do escoamento interno. O aumento da temperatura na superfície de fixação dos extensômetros requer a necessidade de extensômetros autocompensados para avaliação de tensões de origem térmica.

No cilindro espesso, a comparação entre resultados experimentais, numéricos e analíticos indicou boa concordância nos picos de tensão térmica, com diferenças médias inferiores a 10%, igualmente para tensão mecânica. No entanto, na tensão térmica em regime permanente obteve-se maiores discrepâncias, associadas à baixa capacidade térmica e à heterogeneidade do escoamento externo de ar. A avaliação dos esforços combinados revelou uma predominância da tensão térmica sobre a tensão mecânica, mesmo para baixas diferenças de temperatura (20°C) e elevadas pressões (150 bar). Os efeitos de pressão e temperatura atuam de maneira oposta na face interna do cilindro – resultando em alívio parcial das tensões – sendo que na superfície externa ocorre sobreposição dos esforços.

Os experimentos realizados no protótipo estrutural *SLMHE* evidenciaram que a combinação de diferenciais de temperatura e pressão interna exerce influência significativa sobre os níveis de tensões termomecânicas. Mesmo para pressões de 100 e 200 bar, similares às de operação de um trocador de calor compacto, o diferencial de temperatura têm a maior influência no pico de tensão termomecânica (tensão térmica transiente frequentemente superando a mecânica, com exceção do caso com  $P = 200$  bar e  $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ ).

O modelo numérico apresentou excelente concordância com os dados experimentais, com diferenças médias inferiores a 3%. Observou-se que a origem das tensões críticas depende da região de análise, ora sendo  $\Delta T$  e ora sendo  $P$ . Na região de entrada dos minis canais há um predomínio das tensões térmicas, enquanto na metade para final do canal a tensão é de origem mecânica. As simulações em condições de operação ( $P = 200$  bar e  $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ ), foram registradas tensões elevadas (526 MPa), acima da tensão de escoamento do material em regiões dominadas pela tensão térmica. A avaliação das tensões termomecânicas transientes em um

trocador de calor compacto é extremamente delicada, onde não só a magnitude deve ser observada, mas também a distribuição espacial e temporal destas tensões equivalentes.

Os experimentos com configuração água – ar realizados no núcleo do trocador de calor com canais complexos demonstraram que o desempenho térmico é elevado ao utilizar-se do ramal com maior área de transferência para o escoamento com menor capacidade térmica. Comparações com estudos anteriores mostraram que o núcleo projetado apresentou uma melhora expressiva na taxa volumétrica de transferência de calor, confirmando a eficácia da geometria de canal proposta. Os modelos numéricos demonstraram boa concordância com os dados experimentais, com desvios médios próximos de 5%, com as maiores diferenças para escoamentos mais turbulentos.

A rugosidade e a geometria não uniformes de mini canais fabricados por MA influenciam o escoamento e a taxa de transferência de calor, tornando necessária a correção dos da altura de rugosidade como dado de entrada no modelo numérico. Mesmo com menor rugosidade, o canal complexo apresentou coeficientes globais de transferência de calor e números de Nusselt superiores ao canal reto em diferentes regimes de escoamento. Essa melhora foi atribuída à dificuldade de desenvolvimento da camada limite e à maior intensidade de turbulência para configuração complexa.

Nos experimentos com água – água, o núcleo foi capaz de atingir elevadas taxas de transferência térmica (13,5 kW), respeitando a primeira lei da termodinâmica entre ramal frio e quente. Observou-se que, na configuração com fluido quente no ramal complexo, o aumento da vazão não resultava em um aumento na taxa de transferência de calor. Neste caso a resistência convectiva do ramal frio era tão elevada que dominava a troca de calor, comportamento que não se repetiu na configuração oposta.

A correlação obtida para o número de Nusselt ( $Nu = 0,0581Re^{0,7585}Pr^{0,4}$ ) no canal complexo baseou-se em um amplo conjunto de simulações. Através de uma intensiva comparação com outros canais dispostos na literatura, observou-se a alta eficiência térmica do canal proposto, apresentando números de Nusselt superiores às demais configurações.

Os resultados experimentais de perda de carga remetem diretamente as características do processo de fabricação de mini canais por MA. Para o canal complexo, impresso verticalmente à plataforma e com melhor circularidade, as magnitudes de queda de pressão apresentaram boa concordância com o modelo numérico, com baixas diferenças médias tanto para água quanto para ar. Em contraste, os experimentos hidrodinâmicos nos canais retos apresentaram elevadas perdas de carga, muito superiores às previstas pelos modelos,

evidenciando que canais impressos horizontalmente à plataforma têm sua seção transversal deformada.

Essa característica de fabricação levou a uma verificação da real seção transversal dos canais retos. Neste caso, a alta rugosidade superficial é combinada com a deformação da seção, levando a altas perdas de carga. A replicação da seção transversal real do canal reduziu consideravelmente a diferença do modelo numérico, sobretudo nos testes com ar. Estes resultados corroboram que a orientação de impressão deve ser cuidadosamente avaliada para mini canais, pois exercem impacto direto na performance hidráulica.

As sugestões para trabalhos futuros que complementam o presente trabalho e investigam com mais profundidade alguns tópicos são:

- Avaliar o modelo analítico de tensão termomecânica no cilindro espesso sob diferentes condições convectivas, por exemplo considerar o escoamento quente externo e frio interno. Ainda, realizar uma variação sistemática do diâmetro e espessura de parede do cilindro e verificar o efeito no campo de tensões;
- Testar um protótipo de trocador de calor em condições mais severas de operação, principalmente com maiores diferenciais de temperatura;
- Experimentos de fadiga no protótipo estrutural com canais retos;
- Realizar experimentos com maiores temperaturas em um núcleo de trocador compacto de canais complexos;
- Avaliar a tensão termomecânica experimental no núcleo com canais complexo;
- Investigar a influência da rugosidade e não uniformidade na transferência de calor e perda de carga para diferentes condições de operação;
- Investigar a perda de carga em canais considerando alteração da seção transversal ao longo do canal;
- Fabricar um trocador de calor em escala real com canais complexos e testá-lo em diferentes condições de trabalho.

## REFERÊNCIAS

- A01 COMMITTEE. Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications. ASTM International, , [S.d.]. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?A240A240M-22A>>. Acesso em: 27 maio. 2024
- ALBERTAZZI, Armando; DE SOUZA, André R. Fundamentos Da Metrologia Científica E Industrial. [S.l.]: Editora Manole, 2021.
- ALSALLA, Hamza Hassn; SMITH, Christopher; HAO, Liang. Effect of build orientation on the surface quality, microstructure and mechanical properties of selective laser melting 316L stainless steel. *Rapid Prototyping Journal*, v. 24, n. 1, p. 9–17, 2 jan. 2018.
- ALTENEIJI, Moza *et al.* Heat transfer effectiveness characteristics maps for additively manufactured TPMS compact heat exchangers. *Energy Storage and Saving*, v. 1, n. 3, p. 153–161, set. 2022.
- ASTM-STP91A-EB. A Guide for Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data. West Conshohocken: American Society for Testing & Materials, 1963.
- AWAIS, Muhammad; BHUIYAN, Arafat A. Heat and mass transfer for compact heat exchanger (CHXs) design: A state-of-the-art review. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 127, p. 359–380, dez. 2018.
- BAIK, Seungjoon *et al.* Study on CO<sub>2</sub> – water printed circuit heat exchanger performance operating under various CO<sub>2</sub> phases for S-CO<sub>2</sub> power cycle application. *Applied Thermal Engineering*, v. 113, p. 1536–1546, fev. 2017.
- BEJAN, Adrian; KRAUS, Allan D. Heat transfer handbook. New York: J. Wiley, 2003.
- BOTROS, K. K. Experimental Investigation Into the Relationship Between the Roughness Height in Use With Nikuradse or Colebrook Roughness Functions and the Internal Wall Roughness Profile for Commercial Steel Pipes. *Journal of Fluids Engineering*, v. 138, n. 8, p. 081202, 1 ago. 2016.
- CALLISTER, William D. Materials science and engineering: an introduction. 7th ed ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- CASTELAIN, Cathy *et al.* Experimental study of the thermal performance of chaotic geometries for their use in PEM fuel cells. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 101, p. 181–192, mar. 2016.
- ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Heat and mass transfer: fundamentals & applications. 4th ed ed. New York: McGraw-Hill, 2011.
- CHEN, Yefeng *et al.* Deformation mechanisms of selective laser melted 316L austenitic stainless steel in high temperature low cycle fatigue. *Materials Science and Engineering: A*, v. 843, p. 143123, maio 2022.

CROCE, Giulio; D'AGARO, Paola; NONINO, Carlo. Three-dimensional roughness effect on microchannel heat transfer and pressure drop. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 50, n. 25–26, p. 5249–5259, dez. 2007.

DA SILVA, R. P. P. *et al.* Thermal and hydrodynamic analysis of a compact heat exchanger produced by additive manufacturing. *Applied Thermal Engineering*, v. 193, p. 116973, jul. 2021.

DIXIT, Tisha *et al.* High performance, microarchitected, compact heat exchanger enabled by 3D printing. *Applied Thermal Engineering*, v. 210, p. 118339, jun. 2022.

EDISON DA ROSA. *Análise de Resistência Mecânica - Mecânica da Fratura e Fadiga*. Outubro 2022 ed. [S.l.: S.n.].

EL ACHKAR, Georges *et al.* Experimental thermohydraulic characterisation of flow boiling and condensation in additive manufactured plate-fin heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 199, p. 123465, dez. 2022.

ELECTRO OPTICAL SYSTEMS. EOS StainlessSteel 316L. #9011-0032, , 20 abr. 2020. Disponível em: <[https://www.epmi-impression-3d.com/pdf/EOS\\_StainlessSteel316L.pdf](https://www.epmi-impression-3d.com/pdf/EOS_StainlessSteel316L.pdf)>. Acesso em: 20 abr. 2020

GE, Lei *et al.* Creep-fatigue strength design of plate-fin heat exchanger by a homogeneous method. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 146–147, p. 221–233, out. 2018.

GIBSON, Ian; ROSEN, David W.; STUCKER, Brent. *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping and direct digital manufacturing*. 2nd edition ed. New York London: Springer, 2015.

GNIELINSKI, Volker. G1 Heat Transfer in Pipe Flow. *In*: VDI E. V. (Org.). *VDI Heat Atlas*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 691–700.

HAN, Zengxiao; GUO, Jiangfeng; HUAI, Xiulan. Theoretical analysis of a novel PCHE with enhanced rib structures for high-power supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle system based on solar energy. *Energy*, v. 270, p. 126928, maio 2023.

HAO, Liang *et al.* Effect of scanning speed and laser power on formability, microstructure, and quality of 316L stainless steel prepared by selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*, v. 25, p. 3189–3199, jul. 2023.

HEIN, L. L.; MORTEAN, M. V. V. Theoretical and experimental thermal performance analysis of an additively manufactured polymer compact heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v. 124, p. 105237, maio 2021.

HESSELGREAVES, John E. *Compact heat exchangers: selection, design, and operation*. Second edition ed. Amsterdam: Elsevier/BH, 2017.

HETNARSKI, Richard B.; ESLAMI, M. Reza. *Thermal stresses: advanced theory and applications*. Dordrecht? Springer, 2009.

HOSSEINI, S. B. *et al.* Comparison of machining performance of stainless steel 316L produced by selective laser melting and electron beam melting. *Procedia CIRP*, v. 115, p. 72–77, 2022.

INCROPERA, Frank P.; INCROPERA, Frank P. (ORGS.). Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2007.

JOHNS, D. J.; NEAL, B. G. Thermal Stress Analyses. [*S.l.*]: Elsevier Science, 1965.

KADIVAR, Mohammadreza; TORMEY, David; MCGRANAGHAN, Gerard. A review on turbulent flow over rough surfaces: Fundamentals and theories. International Journal of Thermofluids, v. 10, p. 100077, maio 2021.

KATZ, Alon *et al.* Experimental investigation of pressure drop and heat transfer in high temperature supercritical CO<sub>2</sub> and helium in a printed-circuit heat exchanger. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 171, p. 121089, jun. 2021.

KAYS, W. M.; LONDON, A. L. Compact heat exchangers. Repr. ed. 1998 with corrections ed. Malabar, Fla: Krieger Pub. Co, 1998.

KEMPEN, Karolien *et al.* Selective Laser Melting of Crack-Free High Density M2 High Speed Steel Parts by Baseplate Preheating. Journal of Manufacturing Science and Engineering, v. 136, n. 6, p. 061026, 1 dez. 2014.

KIM, In Hun; NO, Hee Cheon. Physical model development and optimal design of PCHE for intermediate heat exchangers in HTGRs. Nuclear Engineering and Design, v. 243, p. 243–250, fev. 2012.

KIM, Seong Gu *et al.* CFD aided approach to design printed circuit heat exchangers for supercritical CO<sub>2</sub> Brayton cycle application. Annals of Nuclear Energy, v. 92, p. 175–185, jun. 2016.

LASBET, Yahia *et al.* Thermal and Hydrodynamic Performances of Chaotic Mini-Channel: Application to the Fuel Cell Cooling. Heat Transfer Engineering, v. 28, n. 8–9, p. 795–803, ago. 2007.

LAURENT, M. *et al.* Thermomechanical fatigue life prediction of 316L compact heat exchanger. Engineering Failure Analysis, v. 68, p. 138–149, out. 2016.

LEARY, Martin. Design for additive manufacturing. Amsterdam Kidlington, Oxford Cambridge, MA: Elsevier, 2020.

LI, Sheng *et al.* Microstructure and mechanical properties comparison of ferritic/martensitic steel fabricated by wrought and selective laser melting. Materials Letters, v. 335, p. 133844, mar. 2023.

LI, X. L. *et al.* Thermal-hydraulic-structural evaluation of S–CO<sub>2</sub> cooling wall tubes: A thermal stress evaluating criterion and optimization. International Journal of Thermal Sciences, v. 170, p. 107161, dez. 2021.

MANJIAH, M. *et al.* (ORGS.). Additive manufacturing: a tool for industrial revolution 4.0. Duxford: WP, Woodhead Publishing, 2021.

MARUGÁN-CRUZ, C. *et al.* Heat transfer and thermal stresses in a circular tube with a non-uniform heat flux. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 96, p. 256–266, maio 2016.

MATHEW, B.; HEGAB, H. Application of effectiveness-NTU relationship to parallel flow microchannel heat exchangers subjected to external heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 49, n. 1, p. 76–85, jan. 2010.

MESHRAM, Ajinkya *et al.* Modeling and analysis of a printed circuit heat exchanger for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 109, p. 861–870, out. 2016.

MIZOKAMI, Yorikata *et al.* Development of structural design procedure of plate-fin heat exchanger for HTGR. *Nuclear Engineering and Design*, v. 255, p. 248–262, fev. 2013.

MORTEAN, M. V. V.; MANTELLI, M. B. H. Nusselt number correlation for compact heat exchangers in transition regimes. *Applied Thermal Engineering*, v. 151, p. 514–522, mar. 2019.

MORTEAN, M. V. V.; PAIVA, K. V.; MANTELLI, M. B. H. Diffusion bonded cross-flow compact heat exchangers: Theoretical predictions and experiments. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 110, p. 285–298, dez. 2016.

MOWER, Todd M.; LONG, Michael J. Mechanical behavior of additive manufactured, powder-bed laser-fused materials. *Materials Science and Engineering: A*, v. 651, p. 198–213, jan. 2016.

MÜLLER; SCHNABEL; OETTEL. Design for additive manufacturing. Guidelines and case studies for metal applications. *In: CANADIAN MANUFACTURING TECHNOLOGY SHOW (CMTS)*. Anais... 28 set. 2017.

MYLAVARAPU, Sai K. *et al.* Fabrication and design aspects of high-temperature compact diffusion bonded heat exchangers. *Nuclear Engineering and Design*, v. 249, p. 49–56, ago. 2012.

NANDHAKUMAR, R.; VENKATESAN, K. A process parameters review on selective laser melting-based additive manufacturing of single and multi-material: Microstructure, physical properties, tribological, and surface roughness. *Materials Today Communications*, v. 35, p. 105538, jun. 2023.

NGO, Tri Lam *et al.* Heat transfer and pressure drop correlations of microchannel heat exchangers with S-shaped and zigzag fins for carbon dioxide cycles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 32, n. 2, p. 560–570, nov. 2007.

NING, Jiuxin *et al.* Experimental and numerical investigation of additively manufactured novel compact plate-fin heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 190, p. 122818, jul. 2022.

NODA, Naotake; HETNARSKI, Richard B.; TANIGAWA, Yoshinobu. *Thermal Stresses*. Second edition ed. New York: Routledge, 2018.

OTHMAN, H.; PURBOLAKSONO, J.; AHMAD, B. Failure investigation on deformed superheater tubes. *Engineering Failure Analysis*, v. 16, n. 1, p. 329–339, jan. 2009.

PATIL, Rakesh; ANAND, Soham. Thermo-structural fatigue analysis of shell and tube type heat exchanger. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 155, p. 35–42, ago. 2017.

PELLICCIONE, A. S. *et al.* Failure analysis of a titanium plate heat exchanger – Mechanical fatigue. *Engineering Failure Analysis*, v. 105, p. 1172–1188, nov. 2019.

PERNICA, Marek *et al.* Transient Thermal Stress Calculation of a Shell and Tube Condenser with Fixed Tubesheet. *Chemie Ingenieur Technik*, v. 93, n. 10, p. 1590–1597, out. 2021.

PIERRES, Renaud Le; D. SOUTHALL; S. OSBORNE. Impact of Mechanical Design Issues on Printed Circuit Heat Exchangers. *Proceedings Of Sco2 Power Cycle Symposium*. maio 2011.

POOK, L. P. *Metal fatigue: what it is, why it matters*. Dordrecht: Springer, 2007.

PRA, Franck *et al.* Promising designs of compact heat exchangers for modular HTRs using the Brayton cycle. *Nuclear Engineering and Design*, v. 238, n. 11, p. 3160–3173, nov. 2008.

SABAU, Adrian S. *et al.* Design, additive manufacturing, and performance of heat exchanger with a novel flow-path architecture. *Applied Thermal Engineering*, v. 180, p. 115775, nov. 2020.

SAEED, Muhammad *et al.* Numerical investigation of thermal and hydraulic characteristics of sCO<sub>2</sub>-water printed circuit heat exchangers with zigzag channels. *Energy Conversion and Management*, v. 224, p. 113375, nov. 2020.

SAEED, Muhammed; ALI AWAIS, Ahmad; BERROUK, Abdallah S. CFD aided design and analysis of a precooler with zigzag channels for supercritical CO<sub>2</sub> power cycle. *Energy Conversion and Management*, v. 236, p. 114029, maio 2021.

SAFARI, Yaghub *et al.* Numerical study of heat transfer of wavy channel supercritical CO<sub>2</sub> PCHE with various channel geometries. *International Journal of Thermofluids*, v. 18, p. 100330, maio 2023.

SARKAR, Sagar; KUMAR, Cheruvu Siva; NATH, Ashish Kumar. Effects of different surface modifications on the fatigue life of selective laser melted 15–5 PH stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 762, p. 138109, ago. 2019.

SARMIENTO, A. P. C. *et al.* Thermal performance of diffusion-bonded compact heat exchangers. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 153, p. 106384, jul. 2020.

SCHIJVE, J. *Fatigue of structures and materials*. 2nd ed. 2009 ed. Place of publication not identified: Springer, 2014.

SHAH, R. K.; SEKULIĆ, Dušan P. *Fundamentals of heat exchanger design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2003.

STEPHENS, R. I.; FUCHS, H. O. (ORGS.). *Metal fatigue in engineering*. 2nd ed ed. New York: Wiley, 2001.

STROBEL, M.; MORTEAN, M. V. V. Pressure drop and fluid maldistribution analysis of a compact heat exchanger manufactured by 3D printing. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 172, p. 107331, fev. 2022.

SURYAWANSHI, Jyoti; PRASHANTH, K. G.; RAMAMURTY, U. Mechanical behavior of selective laser melted 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering: A*, v. 696, p. 113–121, jun. 2017.

TEIXEIRA JÚNIOR, M. *et al.* Experimental and numerical analysis of transient thermal stresses on thick-walled cylinder. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 202, p. 104884, abr. 2023.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. Section VIII Rules for construction of pressure vessels, Division 2 Alternative Rules. ASME Boiler and Pressure Vessel Committee on Pressure Vessels, 13 jan. 2020. . Acesso em: 13 jan. 2020

TIMOSHENKO, Stephan Prokof'evitch; GOODIER, James Norman. *Theory of elasticity*. 3rd ed ed. New York St. Louis Paris [etc.]: McGraw-Hill publ, 1987.

WANG, Jinghan *et al.* Investigations on thermal–hydraulic performance and entropy generation characteristics of sinusoidal channeled printed circuit LNG vaporizer. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 24, n. 1, p. 95–108, jan. 2022.

WANG, Xin *et al.* Novel Correlations for flow and heat transfer processes in S-CO<sub>2</sub> Brayton cycle with different roughness by experimental and simulation methods. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 236, p. 126252, jan. 2025.

WAQAR, Saad; GUO, Kai; SUN, Jie. Evolution of residual stress behavior in selective laser melting (SLM) of 316L stainless steel through preheating and in-situ re-scanning techniques. *Optics & Laser Technology*, v. 149, p. 107806, maio 2022.

WILCOX, David C. *Turbulence modeling for CFD*. 3rd ed ed. La C nada, Calif: DCW Industries, 2006.

WU, Haomin *et al.* Oxidation resistance of the 316L manufactured by cold-rolled and selective laser melting in CO<sub>2</sub> and air. *Materials Today Communications*, v. 33, p. 104889, dez. 2022.

XU, Zirui *et al.* Study on mechanical stress of semicircular and rectangular channels in printed circuit heat exchangers. *Energy*, v. 238, p. 121655, jan. 2022.

YANG, Yu *et al.* Experimental study of the flow and heat transfer performance of a PCHE with rhombic fin channels. *Energy Conversion and Management*, v. 254, p. 115137, fev. 2022.

YANG, Zhancheng *et al.* Limit load for cylinders with axial internal surface cracks under combined internal pressure and global bending moment. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 194, p. 104520, dez. 2021.

YAP, C. Y. *et al.* Review of selective laser melting: Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, v. 2, n. 4, p. 041101, dez. 2015.

YIN, Dandan *et al.* Numerical analysis of wavy PCHEs in supercritical CO<sub>2</sub>/propane mixture Brayton cycle. *Applied Thermal Engineering*, v. 235, p. 121346, nov. 2023.

YIN, Shuo *et al.* Hybrid additive manufacture of 316L stainless steel with cold spray and selective laser melting: Microstructure and mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 273, p. 116248, nov. 2019.

YOON, Su-Jong *et al.* Development and validation of Nusselt number and friction factor correlations for laminar flow in semi-circular zigzag channel of printed circuit heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, v. 123, p. 1327–1344, ago. 2017.

ZENG, Fanyu; YANG, Yongtai; QIAN, Guian. Fatigue properties and S-N curve estimating of 316L stainless steel prepared by SLM. *International Journal of Fatigue*, v. 162, p. 106946, set. 2022.

ZHANG, Hongfei *et al.* Analysis of printed circuit heat exchanger (PCHE) potential in exhaust waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, v. 204, p. 117863, mar. 2022.

ZHANG, Wei *et al.* A novel plastic limit load solution for the orthotropic cylindrical shell with nozzle under internal pressure. *Thin-Walled Structures*, v. 157, p. 107073, dez. 2020.

ZHANG, Zhengyan *et al.* Comprehensive effects of placement orientation and scanning angle on mechanical properties and behavior of 316L stainless steel based on the selective laser melting process. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 791, p. 166–175, jun. 2019.

ZHAO, Shuang *et al.* Surface roughness and microhardness improvement of laser cladding stainless-steel 316 by laser polishing based on multiple remelting. *Optics & Laser Technology*, v. 176, p. 110903, set. 2024.

ZHAO, Yongliang *et al.* Fatigue Lifetime Estimation of a Heater in Coal-Fired Power Plants Under a Flexible Operational Framework-Regulating Extraction Steam of High-Pressure Heaters. *Energy Procedia*, v. 158, p. 5225–5230, fev. 2019.

ZHOU, J. *et al.* Comparative study of the effects of surface mechanical attrition treatment and conventional shot peening on low cycle fatigue of a 316L stainless steel. *Surface and Coatings Technology*, v. 349, p. 556–566, set. 2018.

ZHU, Qingzi *et al.* Design of a 2 MW ZrC/W-based molten-salt-to-sCO<sub>2</sub> PCHE for concentrated solar power. *Applied Energy*, v. 300, p. 117313, out. 2021.

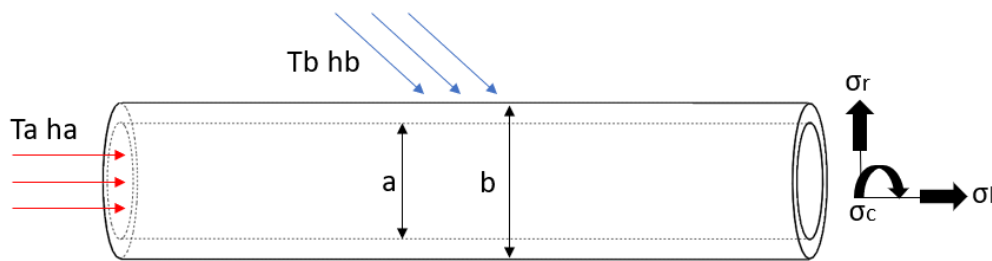
ZILIO, G. *et al.* Structural analysis of compact heat exchanger samples fabricated by additive manufacturing. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, v. 199, p. 104714, out. 2022.

ZONG, Qi; WU, Xiaoxu. A review of computational fluid dynamics (CFD) methodology and analysis on airflow and sand transport over aeolian landforms. *CATENA*, v. 241, p. 108010, jun. 2024.

## APÊNDICE A – Tensões térmicas em cilindros espessos no regime transiente e permanente

A Fig. A1 apresenta um cilindro espesso sob condição de convecção interna e externa.  $T_a$  é a temperatura do fluido na superfície interna,  $T_b$  é a temperatura do fluido na superfície externa,  $h_a$  é o coeficiente convectivo do fluido na superfície interna,  $h_b$  é o coeficiente convectivo na superfície externa,  $r$  é a posição de interesse na seção transversal,  $b$  é o diâmetro externo,  $a$  o diâmetro interno.

Fig. A1 – Modelo representativo do cilindro vazado sujeito a convecção interna e externa com temperaturas diferentes



Fonte: Autor (2025).

O campo de temperatura ao longo da espessura do cilindro é dado pela Eq. (A1).

$$\begin{aligned}
 T(r, t) &= T_a + (T_b - T_a) \left[ \frac{\ln(r/a) + \lambda/h_a a}{\ln(b/a) + \lambda/h_b b + \lambda/h_a a} \right] \\
 &- \pi \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{(T_a h_a - T_b G_N h_b) f(s_n, r) e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \right] \\
 &- \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{s_n^2 f(s_n, r) e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \right] T_i \int_a^b f(s_n, r) r dr
 \end{aligned} \tag{A1}$$

onde  $\lambda$  é a condutividade térmica do material do cilindro,  $t$  é o tempo que se deseja saber a tensão térmica transiente,  $\kappa$  é a difusividade térmica e  $s_n$  são as raízes positivas da Eq. (A5).

O equacionamento apresentado diz respeito a distribuição de temperatura ao longo da espessura de um cilindro vazado e longo. A partir dessa distribuição de temperatura é possível encontrar o campo de tensão térmica no cilindro, tanto no regime transiente quanto no

permanente. Noda et al. (2018) utilizou a técnica de deslocamento para solucionar o problema 1D de corpos cilíndricos:

$$\sigma_r = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[ \frac{-1}{r^2} \int_a^r T(r,t) r dr + \frac{r^2 - a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \int_a^b T(r,t) r dr \right] \quad (A2)$$

$$\sigma_\theta = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[ \frac{1}{r^2} \int_a^r T(r,t) r dr + \frac{r^2 + a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \int_a^b T(r,t) r dr - T(r,t) \right] \quad (A3)$$

$$\sigma_z = \frac{\alpha E}{1-\nu} \left[ \frac{2}{b^2 - a^2} \int_a^b T(r,t) r dr - T(r,t) \right] \quad (A4)$$

Nota-se que o equacionamento pode ser dividido em duas partes: a primeira envolve a parcela permanente e a segunda a parcela transiente. A função  $f(s_n, r)$  é representada pela Eq. (A6). Por fim, o termo  $G_N$  é apresentado na Eq. (A7).

$$[h_a J_0(sa) + \lambda s J_1(sa)][h_b Y_0(sb) - \lambda s Y_1(sb)] - [h_b J_0(sb) - \lambda s J_1(sb)][h_a Y_0(sa) + \lambda s Y_1(sa)] = 0 \quad (A5)$$

$$f(s_n, r) = [h_a Y_0(s_n a) + \lambda s_n Y_1(s_n a)] J_0(s_n r) - [h_a J_0(s_n a) + \lambda s_n J_1(s_n a)] Y_0(s_n r) \quad (A6)$$

$$G_N = \frac{h_a J_0(s_n a) + \lambda s_n J_1(s_n a)}{h_b J_0(s_n b) - \lambda s_n J_1(s_n b)} = \frac{h_a Y_0(s_n a) + \lambda s_n Y_1(s_n a)}{h_b Y_0(s_n b) - \lambda s_n Y_1(s_n b)} \quad (A7)$$

sendo  $J_0, J_1, Y_0$  e  $Y_1$  funções de Bessel de primeira e segunda espécie e primeira e segunda ordem, respectivamente. A única dependência do raio ocorre na função  $f(s_n, r)$ . Portanto, inicialmente será apresentado a resolução das integrais de  $f(s_n, r)$ , para em seguida serem desenvolvidas as integrais do campo de temperatura. As integrais de  $f(s_n, r)$  possuem os limites entre  $a$  e  $b$ , e de  $a$  até  $r$ , apresentadas respectivamente nas Eqs. (A8) e (A9).

$$\begin{aligned}
\int_a^b f(s_n, r) r dr &= \frac{b}{s_n} \{ [h_a Y_0(s_n a) + \lambda s_n Y_1(s_n a)] J_1(s_n b) \\
&\quad - [h_a J_0(s_n a) + \lambda s_n J_1(s_n a)] Y_1(s_n b) \} \\
&\quad - \frac{a}{s_n} \{ [h_a Y_0(s_n a)] J_1(s_n a) \\
&\quad - [h_a J_0(s_n a)] Y_1(s_n a) \}
\end{aligned} \tag{A8}$$

$$\begin{aligned}
\int_a^r f(s_n, r) r dr &= \frac{r}{s_n} \{ [h_a Y_0(s_n a) + \lambda s_n Y_1(s_n a)] J_1(s_n r) \\
&\quad - [h_a J_0(s_n a) + \lambda s_n J_1(s_n a)] Y_1(s_n r) \} \\
&\quad - \frac{a}{s_n} \{ [h_a Y_0(s_n a)] J_1(s_n a) \\
&\quad - [h_a J_0(s_n a)] Y_1(s_n a) \}
\end{aligned} \tag{A9}$$

Para auxílio na descrição matemática, é definido a  $f_1(s_n, r)$ , que é o resultado da integral da  $f(s_n, r)$ . A função pode ser aplicada também aos limites do cilindro,  $a$  e  $b$ .

$$\begin{aligned}
f_1(s_n, r) &= [h_a Y_0(s_n a) + \lambda s_n Y_1(s_n a)] J_1(s_n r) \\
&\quad - [h_a J_0(s_n a) + \lambda s_n J_1(s_n a)] Y_1(s_n r)
\end{aligned} \tag{A10}$$

Para simplificação do equacionamento, duas constantes serão definidas baseado nas constantes da parte transiente do campo de temperaturas.

$$C_1 = \frac{(T_a h_a - T_b G_N h_b) e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \tag{A11}$$

$$C_2 = \frac{T_i s_n^2 e^{-\kappa s_n^2 t}}{h_a^2 + \lambda^2 s_n^2 - G_N^2 (h_b^2 + \lambda^2 s_n^2)} \tag{A12}$$

O primeiro passo para obter o equacionamento detalhado de cada parcela de tensões para este perfil de temperatura é resolver os termos em comum em todas as parcelas de tensão, que são as integrais  $\int_a^b T(r, t) r dr$  e  $\int_a^r T(r, t) r dr$ . Estes são apresentados nas Eqs. (A13) e (A14).

$$\begin{aligned}
\int_a^r T(r, t) r dr &= \frac{(T_a - T_i)(r^2 - a^2)}{2} \\
&+ \frac{(T_b - T_a) \left[ \frac{r^2}{4} \left( 2 \log \left( \frac{r}{a} \right) - 1 \right) + \frac{a^2}{4} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \\
&+ \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) \left[ \frac{r^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \\
&- \pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 * \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \\
&- \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 * \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \\
&* \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right]
\end{aligned} \tag{A13}$$

$$\begin{aligned}
\int_a^b T(r, t) r dr &= \frac{(T_a - T_i)(b^2 - a^2)}{2} \\
&+ \frac{(T_b - T_a) \left[ \frac{b^2}{4} \left( 2 \log \left( \frac{b}{a} \right) - 1 \right) + \frac{a^2}{4} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \\
&+ \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) \left[ \frac{b^2}{2} - \frac{a^2}{2} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \\
&- \pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 * \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, r) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \\
&- \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 * \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right]^2
\end{aligned} \tag{A14}$$

Até então foram apresentados os desenvolvimentos dos termos matemáticos necessários para substituição nas equações de tensão (Eqs. (A2), (A3) e (A4)). Para melhor compreensão, estas estão separadas na parcela em regime permanente e transiente ( $\sigma^{R.P}$  e  $\sigma^{tr}$ ). A tensão circunferencial é dada pela soma das Eqs. (A15) e (A16), que são a tensão no regime permanente e transiente, respectivamente. A tensão radial é a soma das Eqs. (A17) e (A18), e a tensão longitudinal é a soma das Eqs. (A19) e (A20).

$$\begin{aligned}
\sigma_{\theta}^{R,P} = \frac{\alpha E}{1-v} & \left\{ \frac{1}{r^2} \left[ \frac{(T_a - T_i)(r^2 - a^2)}{2} \right. \right. \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left[ r^2 \left( 2 \log \left( \frac{r}{a} \right) - 1 \right) + a^2 \right]}{4 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \\
& + \left. \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) [r^2 - a^2]}{2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \right] \\
& + \frac{r^2 + a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \left[ \frac{(T_a - T_i)(b^2 - a^2)}{2} \right. \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left[ b^2 \left( 2 \log \left( \frac{b}{a} \right) - 1 \right) + a^2 \right]}{4 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \\
& + \left. \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) [b^2 - a^2]}{2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \right] - (T_a - T_i) \\
& - \left. \frac{(T_b - T_a) \left[ \log \left( \frac{r}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_a a} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \right\}
\end{aligned} \tag{A15}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_{\theta}^{tr} = & \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{r^2} \left[ -\pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right. \right. \\
& - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) \right. \\
& \left. \left. - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right] \\
& + \frac{r^2 + a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \left[ -\pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right. \\
& \left. - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right]^2 \right] \\
& + \pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 f(s_n, r) \\
& \left. + \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 f(s_n, r) \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right\} \quad (A16)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{R,P} = & \frac{\alpha E}{1-\nu} \left\{ \frac{-1}{r^2} \left[ \frac{(T_a - T_i)(r^2 - a^2)}{2} \right. \right. \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left[ r^2 \left( 2 \log \left( \frac{r}{a} \right) - 1 \right) + a^2 \right]}{4 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) [r^2 - a^2]}{2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \left. \right] \\
& + \frac{r^2 - a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \left[ \frac{(T_a - T_i)(b^2 - a^2)}{2} \right. \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left[ b^2 \left( 2 \log \left( \frac{b}{a} \right) - 1 \right) + a^2 \right]}{4 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \\
& \left. \left. + \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) [b^2 - a^2]}{2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \right] \right\} \quad (A17)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_r^{tr} = \frac{\alpha E}{1-\nu} & \left\{ \frac{-1}{r^2} \left[ -\pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right. \right. \\
& - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \left[ \frac{r}{s_n} f_1(s_n, r) \right. \\
& \left. \left. - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right] \\
& + \frac{r^2 - a^2}{r^2(b^2 - a^2)} \left[ -\pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right. \\
& \left. \left. - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right]^2 \right] \right\}
\end{aligned} \tag{A18}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_z^{R,P} = \frac{\alpha E}{1-\nu} & \left\{ \frac{2}{(b^2 - a^2)} \left[ \frac{(T_a - T_i)(b^2 - a^2)}{2} \right. \right. \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left[ b^2 \left( 2 \log \left( \frac{b}{a} \right) - 1 \right) + a^2 \right]}{4 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \\
& + \frac{(T_b - T_a) \left( \frac{\lambda}{h_a a} \right) [b^2 - a^2]}{2 \left[ \ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a} \right]} \left. \right] - (T_a - T_i) \\
& - \frac{(T_b - T_a) \left[ \log \left( \frac{r}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_a a} \right]}{\ln \left( \frac{b}{a} \right) + \frac{\lambda}{h_b b} + \frac{\lambda}{h_a a}} \left. \right\}
\end{aligned} \tag{A19}$$

$$\begin{aligned}
\sigma_z^{tr} = \frac{\alpha E}{1-\nu} & \left\{ \frac{2}{(b^2 - a^2)} \left[ -\pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \right. \right. \\
& - \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right]^2 \left. \right] \\
& + \pi \sum_{n=1}^{\infty} C_1 f(s_n, r) \\
& + \frac{\pi^2}{2} \sum_{n=1}^{\infty} C_2 f(s_n, r) \left[ \frac{b}{s_n} f_1(s_n, b) - \frac{a}{s_n} f_1(s_n, a) \right] \left. \right\}
\end{aligned} \tag{A20}$$

A formulação apresentada permite o cálculo de tensões térmicas em cilindros espessos sujeitos a condição de convecção interna e externa. Um cilindro é considerado espesso se a espessura de parede for maior do que o diâmetro interno dividido por 20. O coeficiente convectivo de transferência de calor pode ser expresso por:

$$h = Nu \, k / D \quad (A21)$$

onde  $Nu$  é o número de Nusselt,  $k$  é a condutividade do fluido e  $D$  é o diâmetro do tubo.

O coeficiente convectivo do escoamento interno ( $h_a$ ) pode ser estimado utilizando a correlação do número de Nusselt proposta por Gnielinski (1976), Eq. (A22), empregada para escoamentos turbulentos internos. A correlação é válida para números de Reynolds maiores do que 3000.

$$Nu_i = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re_d - 1000) Pr}{1 + 12,7 \left(\frac{f}{8}\right)^{1/2} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (A22)$$

onde  $Re$  é o número de Reynolds e  $Pr$  é o número de Prandtl. O fator de atrito ( $f$ ) é dado por:

$$f = (0,79 * \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (A23)$$

Para o coeficiente de convecção externa ( $h_b$ ) pode ser utilizada a correlação do número de Nusselt para escoamento cruzado em cilindro apresentada por Incropera (2007), Eq. (A24).

$$Nu_e = 0,193 * Re^{0,618} * Pr^{1/3} \quad (A24)$$

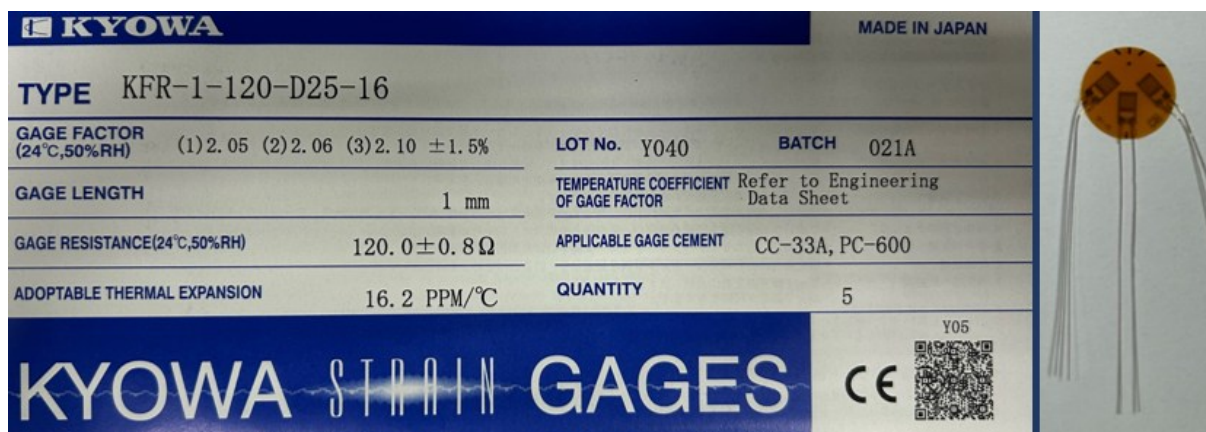
## APÊNDICE B – Extensômetros e aquisição de dados

Para aferir as deformações ocorridas durante o experimento, e consequentemente as tensões, serão utilizados extensômetros. Estes sensores são capazes de medir a deformação do material através da variação de resistência elétrica em um filamento de baixa rigidez. Existem inúmeros tipos de extensômetros, uniaxiais, biaxiais, triaxiais, compensados, isolados, entre outros.

No estudo de objetos com geometria complexa, onde não são conhecidas as direções principais da deformação, é interessante a utilização de extensômetros triaxiais. Esta tipologia permite a medição da tensão equivalente no plano de aplicação. Entretanto, para os estudos no cilindro, onde as componentes de tensão na superfície externa são conhecidas, assim como suas direções, é possível a utilização de extensômetros uniaxiais. Com a utilização de extensômetros uniaxiais seria possível a validação das componentes de tensão em um cilindro, como tensão circunferencial e radial. Ambos os dispositivos, por mais de suas diferenças topológicas, podem ser utilizados para o cálculo da tensão equivalente na superfície.

Como o objetivo não é validação das componentes de tensão em um cilindro, e sim encontrar as magnitudes de tensão que um cilindro de parede espessa e também um protótipo de trocador de calor compacto estão sujeitos, é desejado trabalhar com extensômetros triaxiais e com a tensão equivalente de *von Mises*. Nestes dispositivos, a partir da deformação em cada grade e do ângulo entre elas, é possível definir a magnitude e a direção das deformações principais.

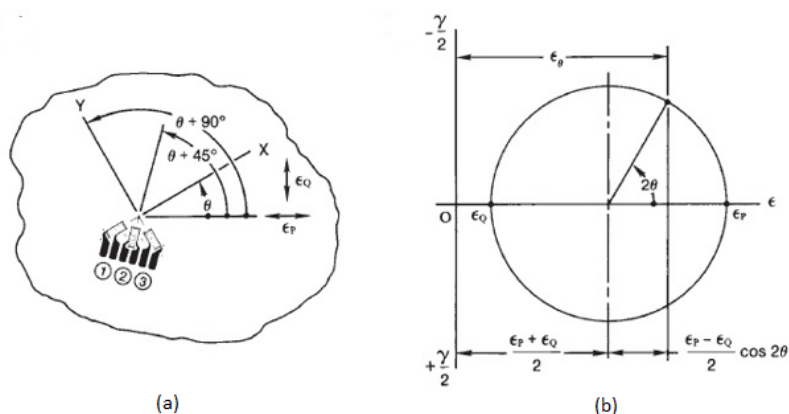
Para o presente trabalho, foram utilizados extensômetro da *Kywoa*, modelo *KFR-I-120-D25-16*, que é um extensômetro do tipo roseta  $45^\circ$ , onde as grades estão à um ângulo de  $45^\circ$  entre si. A definição da geometria do extensômetro, assim como as demais informações técnicas são apresentadas na Fig. B1.

Fig. B1 – Extensômetro *Kywoa KFR-1-120-D25-16*

Fonte: Autor (2025).

A aplicação de extensômetros requer uma superfície com baixa rugosidade, pois superfícies rugosas podem gerar interferência nos resultados e dificultar a adesão do extensômetro à superfície. Dessa forma, antes da colagem dos sensores, é preciso lixar e limpar adequadamente a superfície para reduzir a rugosidade e livrar a superfície de impurezas. Extensômetro triaxiais roseta-45° podem ser aplicados em uma superfície sem respeitar nenhuma orientação definida (Fig. B2).

Fig. B2 – Determinação das deformações principais em um extensômetro do tipo roseta-45°



Fonte: TN-515 – Strain Gages and Instruments.

A partir das deformações conhecidas  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  podem ser calculadas as deformações principais ( $\varepsilon_p$  e  $\varepsilon_q$ ) atuantes na superfície (Eq. (B1)), e o ângulo ( $\theta$ ) entre a deformação principal e a grade 1 (Eq. (B2)). Para o equacionamento mostrado é necessário que as grades dos extensômetros sejam numeradas corretamente, portanto a grade 1 sempre deve ser perpendicular a grade 3 e fazer 45° com a grade 2.

$$\varepsilon_{p,q} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \pm \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \quad (B1)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{\varepsilon_1 - 2\varepsilon_2 + \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right) \quad (B2)$$

As tensões são obtidas pela multiplicação da matriz de deformação pela matriz constitutiva do material. Quando é assumido que o material tem comportamento isotrópico, as tensões principais na superfície do corpo podem ser calculadas utilizando-se a Eq. (B3).

$$\sigma_{p,q} = \frac{E}{2} \left[ \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{1 - \nu} \pm \frac{\sqrt{2}}{1 + \nu} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2} \right] \quad (B3)$$

Nesse caso, é necessário conhecer apenas duas propriedades do material: o módulo de elasticidade isotrópico ( $E$ ) e o coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). Por fim, a partir das tensões principais, pode-se calcular a tensão equivalente de *von Mises* no ponto de medição utilizando-se da Eq. (B4).

$$\sigma_{eq,vm} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_p - \sigma_q)^2 + \sigma_p^2 + \sigma_q^2} \quad (B4)$$

As incertezas de medições são propagadas com a utilização de operadores matemáticos em grandezas de entrada. Para grandezas estatisticamente independentes, a incerteza-padrão combinada ( $i_c(y)$ ) da grandeza de saída  $y$  é dada pela lei da propagação de incertezas, mostrado na Eq. (B5). Salienta-se que  $i(x)$  é uma incerteza padrão que pode ter sido estimada por uma avaliação do tipo A ou B.

$$i_c(y) = \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_q} \right)^2 i_{xq}^2} \quad (B5)$$

Aplicando o conceito da superposição de incertezas nas tensões principais (Eqs. (B6) e (B7)):

$$i_{\sigma 1} = \left\{ \left[ \left( \frac{E}{2(1-\nu)} + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 1}^2 \right] \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(-\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\sqrt{\varepsilon_1^2 - 2\varepsilon_1\varepsilon_2 + 2\varepsilon_2^2 - 2\varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 2}^2 \right] \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{E}{2(1-\nu)} + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 3}^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (B6)$$

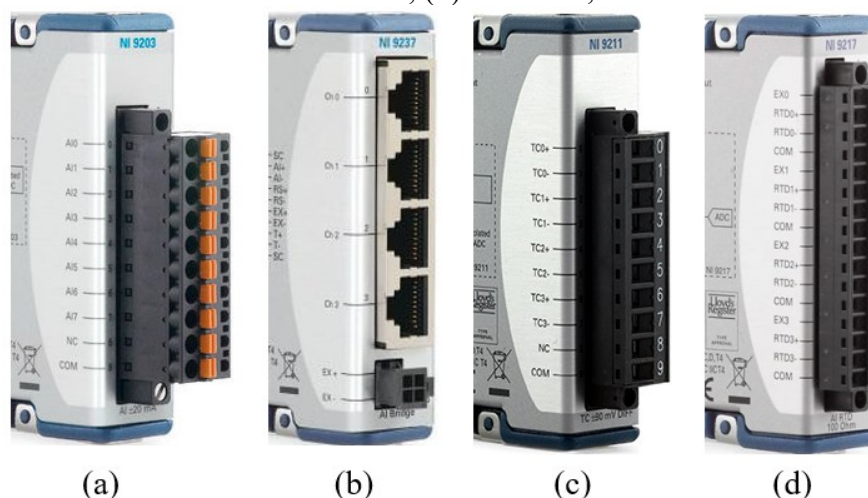
$$i_{\sigma 2} = \left\{ \left[ \left( \frac{E}{2(1-\nu)} - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 1}^2 \right] \right. \\ \left. + \left[ \left( -\frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(-\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 - \varepsilon_3)}{\sqrt{\varepsilon_1^2 - 2\varepsilon_1\varepsilon_2 + 2\varepsilon_2^2 - 2\varepsilon_2\varepsilon_3 + \varepsilon_3^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 2}^2 \right] \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{E}{2(1-\nu)} - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} * \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_2)}{\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_2)^2}} \right)^2 * i_{\varepsilon 3}^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (B7)$$

Agora, a incerteza combinada da tensão equivalente de *von Mises* possui as tensões principais como variáveis independentes e é apresentada na Eq. (B8).

$$i_{\sigma eq,vm} = \left\{ \left[ \left( \frac{(2\sigma_1 - \sigma_2)}{2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}} \right)^2 * i_{\sigma 1}^2 \right] \right. \\ \left. + \left[ \left( \frac{(2\sigma_2 - \sigma_1)}{2\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2}} \right)^2 * i_{\sigma 2}^2 \right] \right\}^{1/2} \quad (B8)$$

Todo o sistema de aquisição de dados utilizado é composto por módulos fabricados pela *National Instruments*, conectados simultaneamente por um chassi *NI cDAQ-9178*. Módulos *NI-9237* são utilizados para leitura de deformação dos extensômetros. As leituras de transdutores de pressão, medidores de vazão e de velocidade são realizadas por um módulo de corrente *NI-9203*. Para os experimentos de tensão térmica foram utilizados dois sensores de temperatura, termopar e RTD. Ambos possuem módulos específicos assim como o módulo de leitura dos extensômetros, os RTDs são conectados ao módulo *NI-9217* enquanto os termopares no módulo *NI-9211*. Todos estes podem ser visualizados na Fig. B3.

Fig. B3 – Módulos utilizados no sistema de aquisição de dados: (a) NI-9203; (b) NI-9237; (c) NI-9211; (d) NI-9217;



Fonte: Autor (2025).

O processamento de todos estes sinais é feito através de um código no *LabView*, o qual desenvolvido e testado pelos técnicos do laboratório. Para alguns casos, como o do transdutor de pressão, é preciso realizar a calibração através de uma curva que relaciona a variável independente, corrente, com a magnitude de pressão, em bar. Em contraponto, o sinal obtido do RTD já é em graus e não precisa de pós processamento. O programa permite monitorar em tempo real todas os dados, além de permitir a gravação em um arquivo de texto.

É importante salientar que os extensômetros possuem certa deformação residual quando a pressurização, ou carga térmica, é zerada. Assim, a cada teste finalizado, faz-se necessário realizar uma nova calibração da deformação dos extensômetros. Essa calibração é feita no próprio sistema fornecido pela *National Instruments* e consiste em informar ao módulo NI-9237 qual a condição de deformação nula de cada um dos sensores.

**APÊNDICE C – Convergência de malha e compilado de experimentos para o cilindro espesso**

A análise de convergência de malha foi realizada utilizando o experimento de pico térmico para um  $\Delta T = 50^{\circ}\text{C}$ , caso de maior tensão. A mesma malha foi utilizada em todas as análises. Os parâmetros alimentados no modelo numérico para o estudo de malha são apresentados na Tabela C1. No compilado,  $T_w$  é a temperatura da água,  $h_w$  o coeficiente convectivo da água,  $T_a$  é a temperatura do ar,  $h_a$  o coeficiente convectivo do ar e  $T_i$  a temperatura inicial.

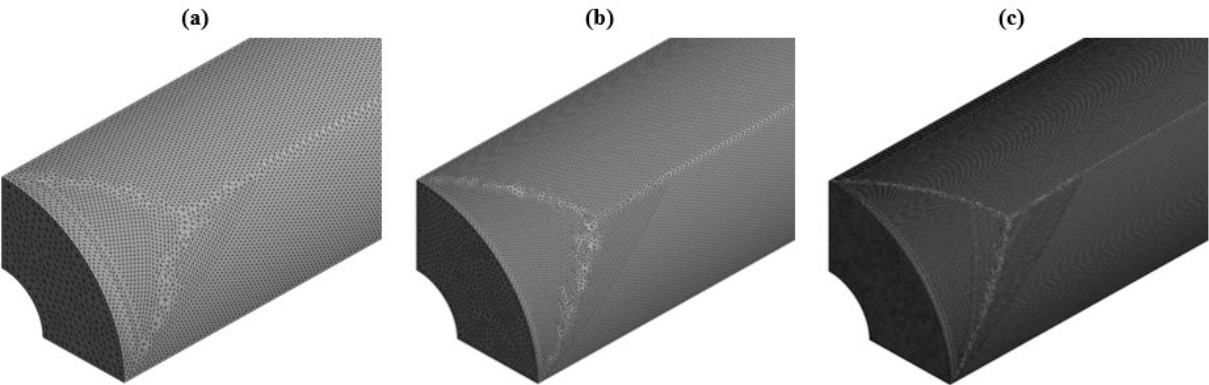
Tabela C1 – Condições de contorno para teste de convergência de malha

| $T_w$ [°C] | $h_w$ [W/mm²K] | $T_a$ [°C] | $h_a$ [W/mm²K] | $T_i$ [°C] |
|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| 65,6       | 1,81E-02       | 22,4       | 5,70E-05       | 22,5       |

Fonte: Autor (2025).

A Fig. C1 apresenta as três malhas geradas para simular a tensão no cilindro. Para o experimento selecionado, foi comparado as tensões térmicas de pico no modelo e sua variação de uma malha para a outra. Quando se trata de tensão térmica transiente, a superfície exterior apresenta apenas tensão longitudinal e circunferencial, sendo a parcela radial nula.

Fig. C1 – Malhas geradas para o cilindro espesso: (a) tamanho médio de 0,3 mm; (b) tamanho médio de 0,2 mm; (c) tamanho médio de 0,1 mm;



Fonte: Autor (2025).

Na Tabela C2 são apresentados os valores de tensão térmica de pico em cada malha gerada. Pode ser visto que a variação é menor do que 0,1% nos três casos. Como um maior

refino não ocasionou em uma acurácia maior do resultado, a malha 1 foi utilizada para a simulação dos experimentos realizados e descritos nas seções 3.1.2.1.1, 3.1.2.2.1 e 3.1.2.3.1.

Tabela C2 – Pico de tensão transiente térmica nas malhas geradas

|                 | malha 1 | malha 2 | malha 3 |
|-----------------|---------|---------|---------|
| Nº de elementos | 96917   | 225423  | 931882  |
| Tensão [MPa]    | 30,183  | 30,181  | 30,178  |

Fonte: Autor (2025).

Tabela C3 – Parâmetros de entrada para o modelo numérico de tensão térmica no regime transiente e permanente

| Código do exp. | Ti [°C] | Tw [°C] | mw [kg/s] | hw [W/mm²K] | Código do exp.    | va [m/s] | Ta [°C] | ha [W/mm²K] | mw [kg/s] | hw [W/mm²K] | Tw [°C] | Ti [°C] |
|----------------|---------|---------|-----------|-------------|-------------------|----------|---------|-------------|-----------|-------------|---------|---------|
| <i>c_T10_1</i> | 22,5    | 30,9    | 0,121     | 0,0135      | <i>c_T30_1_rp</i> | 7,0      | 23,7    | 6,00E-05    | 0,134     | 0,0177      | 54,6    | 23,5    |
| <i>c_T10_2</i> | 22,8    | 30,9    | 0,116     | 0,0130      |                   | 12,4     | 23,6    | 8,52E-05    | 0,135     | 0,0178      | 53,9    |         |
| <i>c_T10_3</i> | 22,8    | 31,1    | 0,116     | 0,0130      |                   | 18,0     | 23,7    | 1,07E-04    | 0,133     | 0,0176      | 53,9    |         |
| <i>c_T10_4</i> | 22,7    | 31,2    | 0,117     | 0,0131      | <i>c_T30_2_rp</i> | 6,4      | 24,3    | 5,69E-05    | 0,135     | 0,0178      | 55,0    | 24,0    |
| <i>c_T10_5</i> | 22,7    | 31,0    | 0,116     | 0,0130      |                   | 12,3     | 24,0    | 8,48E-05    | 0,136     | 0,0179      | 54,1    |         |
| <i>c_T10_6</i> | 23,0    | 31,1    | 0,120     | 0,0134      |                   | 18,0     | 23,8    | 1,08E-04    | 0,135     | 0,0179      | 53,9    |         |
| <i>c_T20_1</i> | 22,4    | 39,7    | 0,114     | 0,0142      | <i>c_T30_3_rp</i> | 6,3      | 24,4    | 5,64E-05    | 0,135     | 0,0179      | 55,2    | 24,0    |
| <i>c_T20_2</i> | 22,6    | 39,7    | 0,116     | 0,0144      |                   | 12,4     | 24,3    | 8,55E-05    | 0,135     | 0,0179      | 54,2    |         |
| <i>c_T20_3</i> | 22,8    | 39,9    | 0,116     | 0,0144      |                   | 18,2     | 24,1    | 1,08E-04    | 0,136     | 0,0179      | 53,8    |         |
| <i>c_T20_4</i> | 22,5    | 39,6    | 0,117     | 0,0145      | <i>c_T40_1_rp</i> | 5,6      | 24,3    |             | 0,135     | 0,0192      | 64,8    | 24,5    |
| <i>c_T20_5</i> | 22,4    | 39,6    | 0,118     | 0,0146      |                   | 12,3     | 24,5    | 8,49E-05    | 0,135     | 0,0192      | 64,5    |         |
| <i>c_T20_6</i> | 22,6    | 39,8    | 0,117     | 0,0145      |                   | 18,1     | 24,6    | 1,08E-04    | 0,136     | 0,0193      | 63,8    |         |
| <i>c_T30_1</i> | 22,8    | 48,3    | 0,115     | 0,0156      | <i>c_T40_2_rp</i> | 5,9      | 24,6    | 5,38E-05    | 0,136     | 0,0192      | 64,6    | 24,7    |
| <i>c_T30_2</i> | 23,2    | 48,6    | 0,117     | 0,0158      |                   | 12,4     | 24,6    | 8,53E-05    | 0,136     | 0,0192      | 64,5    |         |
| <i>c_T30_3</i> | 22,8    | 48,6    | 0,118     | 0,0159      |                   | 17,8     | 24,3    | 1,07E-04    | 0,136     | 0,0193      | 63,9    |         |
| <i>c_T30_4</i> | 22,8    | 48,5    | 0,118     | 0,0159      | <i>c_T40_3_rp</i> | 5,9      | 24,7    | 5,37E-05    | 0,136     | 0,0192      | 64,6    | 24,8    |
| <i>c_T30_5</i> | 22,6    | 48,3    | 0,118     | 0,0160      |                   | 11,7     | 24,7    | 8,22E-05    | 0,136     | 0,0193      | 64,4    |         |
| <i>c_T30_6</i> | 22,6    | 48,3    | 0,115     | 0,0156      |                   | 18,8     | 24,6    | 1,10E-04    | 0,136     | 0,0193      | 64,0    |         |
| <i>c_T40_1</i> | 22,8    | 59,0    | 0,102     | 0,0151      | <i>c_T50_1_rp</i> | 6,2      | 24,6    | 5,57E-05    | 0,137     | 0,0205      | 74,4    | 24,8    |
| <i>c_T40_2</i> | 22,6    | 57,1    | 0,115     | 0,0167      |                   | 12,2     | 24,4    | 8,43E-05    | 0,137     | 0,0206      | 74,0    |         |
| <i>c_T40_3</i> | 23,0    | 57,3    | 0,117     | 0,0170      |                   | 18,3     | 24,1    | 1,09E-04    | 0,139     | 0,0207      | 73,8    |         |
| <i>c_T40_4</i> | 22,6    | 57,2    | 0,119     | 0,0172      | <i>c_T50_2_rp</i> | 6,0      | 25,5    | 5,44E-05    | 0,136     | 0,0205      | 74,5    | 25,1    |
| <i>c_T40_5</i> | 22,6    | 56,8    | 0,118     | 0,0171      |                   | 12,3     | 25,3    | 8,48E-05    | 0,136     | 0,0205      | 74,3    |         |
| <i>c_T40_6</i> | 22,6    | 57,3    | 0,119     | 0,0172      |                   | 18,0     | 25,1    | 1,08E-04    | 0,136     | 0,0205      | 73,8    |         |
| <i>c_T50_1</i> | 22,7    | 69,0    | 0,098     | 0,0155      | <i>c_T50_3_rp</i> | 5,9      | 24,3    | 5,38E-05    | 0,137     | 0,0205      | 73,7    | 25,2    |
| <i>c_T50_2</i> | 22,7    | 65,6    | 0,118     | 0,0181      |                   | 12,5     | 24,3    | 8,56E-05    | 0,138     | 0,0206      | 74,3    |         |
| <i>c_T50_3</i> | 22,6    | 68,7    | 0,108     | 0,0168      |                   | 17,8     | 24,4    | 1,07E-04    | 0,138     | 0,0207      | 74,0    |         |
| <i>c_T50_4</i> | 22,8    | 65,6    | 0,123     | 0,0188      |                   |          |         |             |           |             |         |         |
| <i>c_T50_5</i> | 22,5    | 69,0    | 0,104     | 0,0163      |                   |          |         |             |           |             |         |         |
| <i>c_T50_6</i> | 22,5    | 65,6    | 0,118     | 0,0181      |                   |          |         |             |           |             |         |         |

Fonte: Autor (2025).

Tabela C4 – Parâmetros de entrada para o modelo numérico de tensão mecânica

|                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| <b>Código do exp.</b> | <i>c_P50_1</i>  | <i>c_P50_2</i>  | <i>c_P50_3</i>  | <i>c_P50_4</i>  | <i>c_P50_5</i>  | <i>c_P50_6</i>  | <i>c_P50_7</i>  |
| <b>P [bar]</b>        | 50,0            | 50,0            | 50,0            | 49,9            | 50,0            | 50,0            | 50,0            |
| <b>Código do exp.</b> | <i>c_P100_1</i> | <i>c_P100_2</i> | <i>c_P100_3</i> | <i>c_P100_4</i> | <i>c_P100_5</i> | <i>c_P100_6</i> | <i>c_P100_7</i> |
| <b>P [bar]</b>        | 100,1           | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100,0           | 100,1           | 100,1           |
| <b>Código do exp.</b> | <i>c_P150_1</i> | <i>c_P150_2</i> | <i>c_P150_3</i> | <i>c_P150_4</i> | <i>c_P150_5</i> | <i>c_P150_6</i> | <i>c_P150_7</i> |
| <b>P [bar]</b>        | 150,0           | 150,0           | 150,0           | 150,1           | 150,0           | 150,0           | 149,9           |
| <b>Código do exp.</b> | <i>c_P200_1</i> | <i>c_P200_2</i> | <i>c_P200_3</i> | <i>c_P200_4</i> | <i>c_P200_5</i> | <i>c_P200_6</i> | <i>c_P200_7</i> |
| <b>P [bar]</b>        | 200,0           | 200,0           | 200,0           | 200,0           | 200,0           | 200,0           | 200,0           |

Fonte: Autor (2025).

Tabela C5 – Parâmetros de entrada para o modelo numérico de tensão termomecânica com P = 100 bar

| <b>Código do exp.</b> | <b>Ti [°C]</b> | <b>Tw [°C]</b> | <b>hw [W/mm²K]</b> | <b>Ta [°C]</b> | <b>ha [W/mm²K]</b> | <b>P [bar]</b> |
|-----------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| <i>c2_T20_1</i>       | 24,2           | 40,9           | 0,00156            | 23,3           | 8,37E-05           | 100,0          |
| <i>c2_T20_2</i>       | 24,7           | 41,3           |                    | 22,6           | 8,36E-05           |                |
| <i>c2_T20_3</i>       | 24,8           | 41,2           |                    | 23,1           | 8,51E-05           |                |
| <i>c_P100T_1</i>      | 23,8           | 40,9           | 0,00156            | 23,2           | 9,01E-05           | 106,6          |
| <i>c_P100T_2</i>      | 23,8           | 42,6           |                    | 22,9           | 8,62E-05           | 110,9          |
| <i>c_P100T_3</i>      | 23,6           | 41,0           |                    | 23,1           | 8,82E-05           | 114,0          |
| <i>c_P100T_4</i>      | 24,9           | 42,1           |                    | 23,0           | 8,84E-05           | 108,9          |
| <i>c_P100T_5</i>      | 25,0           | 42,3           |                    | 22,4           | 8,84E-05           | 110,8          |
| <i>c_P100T_6</i>      | 23,9           | 41,9           |                    | 22,8           | 9,11E-05           | 98,7           |
| <i>c_P100T_7</i>      | 25,4           | 42,5           |                    | 23,1           | 8,82E-05           | 118,6          |
| <i>c_P100T_8</i>      | 24,5           | 41,3           |                    | 22,5           | 8,69E-05           | 107,1          |
| <i>c_P100T_9</i>      | 23,6           | 40,6           |                    | 22,3           | 7,57E-05           | 108,5          |
| <i>c_P100T_10</i>     | 23,3           | 41,7           |                    | 22,0           | 8,59E-05           | 114,1          |
| <i>c_P100T_11</i>     | 24,4           | 41,4           |                    | 22,0           | 8,69E-05           | 111,8          |
| <i>c_P100T_12</i>     | 24,7           | 41,2           |                    | 22,6           | 8,58E-05           | 102,5          |
| <i>c_P100T_13</i>     | 24,7           | 41,2           |                    | 23,0           | 8,59E-05           | 114,5          |
| <i>c_P100T_14</i>     | 24,4           | 42,6           |                    | 22,4           | 8,50E-05           | 108,6          |
| <i>c_P100T_15</i>     | 24,7           | 41,5           |                    | 22,3           | 8,52E-05           | 106,6          |
| <i>c_P100T_16</i>     | 24,3           | 41,4           |                    | 22,8           | 8,54E-05           | 104,7          |
| <i>c_P100T_17</i>     | 23,9           | 41,2           |                    | 22,3           | 8,51E-05           | 108,1          |
| <i>c_P100T_18</i>     | 24,7           | 41,5           |                    | 22,8           | 8,52E-05           | 110,2          |
| <i>c_P100T_19</i>     | 25,0           | 42,0           |                    | 23,1           | 8,67E-05           | 108,3          |
| <i>c_P100T_20</i>     | 22,3           | 40,8           |                    | 22,0           | 8,32E-05           | 114,6          |
| <i>c_P100T_21</i>     | 24,3           | 40,7           |                    | 23,1           | 8,81E-05           | 117,2          |
| <i>c_P100T_22</i>     | 23,4           | 39,9           |                    | 22,7           | 8,52E-05           | 110,2          |
| <i>c_P100T_23</i>     | 24,0           | 40,9           |                    | 23,0           | 8,31E-05           | 110,8          |
| <i>c_P100T_24</i>     | 24,4           | 41,2           |                    | 22,3           | 8,31E-05           | 97,6           |
| <i>c_P100T_25</i>     | 24,8           | 41,6           |                    | 23,0           | 8,45E-05           | 111,5          |

Fonte: Autor (2025).

Tabela C6 – Parâmetros de entrada para o modelo numérico de tensão termomecânica no cilindro com P = 150 bar

| <b>Código do exp.</b> | <b>Ti [°C]</b> | <b>Tw [°C]</b> | <b>hw [W/mm²K]</b> | <b>Ta [°C]</b> | <b>ha [W/mm²K]</b> | <b>P [bar]</b> |
|-----------------------|----------------|----------------|--------------------|----------------|--------------------|----------------|
| <i>c3_T20_1</i>       | 24,6           | 42,2           |                    | 21,7           | 8,70E-05           |                |
| <i>c3_T20_2</i>       | 24,8           | 41,0           | 0,00192            | 21,6           | 8,61E-05           |                |
| <i>c3_T20_3</i>       | 25,0           | 41,1           |                    | 22,6           | 9,02E-05           |                |
| <i>c_P150T_1</i>      | 24,6           | 40,9           |                    | 23,6           | 7,37E-05           | 158,6          |
| <i>c_P150T_2</i>      | 25,0           | 42,5           |                    | 23,4           | 8,26E-05           | 165,3          |
| <i>c_P150T_3</i>      | 24,7           | 42,8           |                    | 23,1           | 8,37E-05           | 156,6          |
| <i>c_P150T_4</i>      | 25,2           | 42,6           |                    | 23,0           | 8,33E-05           | 164,7          |
| <i>c_P150T_5</i>      | 25,3           | 41,5           |                    | 23,2           | 8,37E-05           | 149,0          |
| <i>c_P150T_6</i>      | 24,4           | 41,4           |                    | 23,1           | 7,94E-05           | 171,5          |
| <i>c_P150T_7</i>      | 22,7           | 40,6           |                    | 22,3           | 8,66E-05           | 167,8          |
| <i>c_P150T_8</i>      | 23,7           | 41,5           |                    | 22,4           | 8,60E-05           | 155,8          |
| <i>c_P150T_9</i>      | 24,5           | 42,8           |                    | 22,9           | 8,76E-05           | 167,0          |
| <i>c_P150T_10</i>     | 24,7           | 41,8           | 0,00192            | 22,8           | 8,47E-05           | 160,0          |
| <i>c_P150T_11</i>     | 24,5           | 41,0           |                    | 22,7           | 8,57E-05           | 147,5          |
| <i>c_P150T_12</i>     | 24,7           | 41,8           |                    | 23,1           | 8,72E-05           | 164,0          |
| <i>c_P150T_13</i>     | 24,1           | 41,5           |                    | 22,7           | 8,60E-05           | 164,8          |
| <i>c_P150T_14</i>     | 24,1           | 41,0           |                    | 23,5           | 8,65E-05           | 164,0          |
| <i>c_P150T_15</i>     | 24,6           | 42,3           |                    | 22,7           | 8,50E-05           | 157,8          |
| <i>c_P150T_16</i>     | 24,4           | 41,1           |                    | 23,2           | 7,69E-05           | 159,4          |
| <i>c_P150T_17</i>     | 24,4           | 41,3           |                    | 22,7           | 7,78E-05           | 155,2          |
| <i>c_P150T_18</i>     | 24,9           | 41,3           |                    | 23,3           | 8,65E-05           | 157,5          |
| <i>c_P150T_19</i>     | 24,8           | 41,5           |                    | 23,0           | 8,48E-05           | 160,7          |
| <i>c_P150T_20</i>     | 24,9           | 41,7           |                    | 23,1           | 8,78E-05           | 156,2          |
| <i>c_P150T_21</i>     | 24,9           | 40,8           |                    | 23,3           | 7,37E-05           | 156,4          |
| <i>c_P150T_22</i>     | 23,6           | 41,6           |                    | 22,4           | 8,02E-05           | 156,3          |
| <i>c_P150T_23</i>     | 24,4           | 41,6           | 0,00192            | 22,2           | 8,35E-05           | 162,9          |
| <i>c_P150T_24</i>     | 25,2           | 40,9           |                    | 22,1           | 7,10E-05           | 165,9          |
| <i>c_P150T_25</i>     | 24,6           | 42,7           |                    | 21,8           | 8,40E-05           | 156,9          |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE D – Convergência de malha e compilado de experimentos para o protótipo  
SLMHE**

Três malhas foram discretizadas e simuladas. O método de geração de malha é diferente da usada no cilindro, e foi utilizado função de tamanho nas proximidades e curvaturas. Para a análise de malha foram utilizados os parâmetros de um experimento termomecânico, definidos na Tabela D1, sendo  $T_w$  é a temperatura da água,  $h_c$  o coeficiente convectivo da água,  $T_i$  a temperatura inicial e  $P$  a pressão interna. O valor do pico de tensão termomecânica foi considerado para análise de convergência.

Tabela D1 – Condições de contorno utilizadas para análise de convergência (*p\_T10P100\_1*)

| <b><math>T_w</math> [°C]</b> | <b><math>h_c</math> [W/mm²K]</b> | <b><math>T_i</math> [°C]</b> | <b><math>P</math> [bar]</b> |
|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| 31,8                         | 0,00466                          | 21,7                         | 98,7                        |

Fonte: Autor (2024).

As informações das malhas podem ser observadas na Tabela D2. O pico de tensão não apresenta variação significativa nas 3 malhas geradas (máximo de 0,15%), fazendo assim com que a malha 1 seja a mais adequada para a simulação dos experimentos de tensão termomecânica, em termos de eficiência computacional.

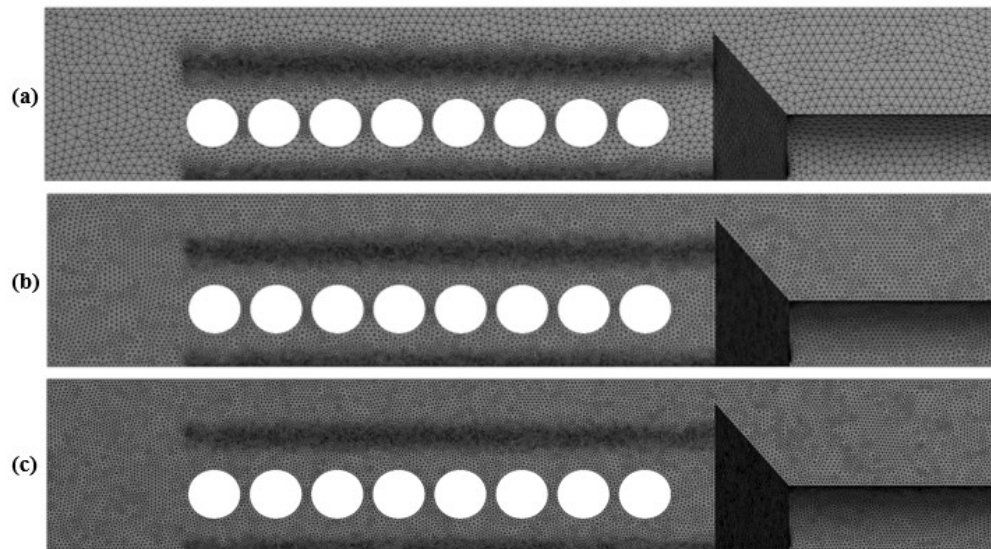
Tabela D2 – Definições da malha utilizada no protótipo SLMHE com função de proximidade e curvatura

|                                              | <b>malha 1</b> | <b>malha 2</b> | <b>malha 3</b> |
|----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| <b>Tamanho máximo da face [mm]</b>           | 0,5            | 0,25           | 0,2            |
| <b>Tamanho mínimo [mm]</b>                   | 5e-3           | 2,5e-3         | 2e-3           |
| <b>Tamanho máximo do elemento tetra [mm]</b> | 1              | 0,5            | 0,4            |
| <b>Razão de crescimento</b>                  | 1,85           | 1,85           | 1,85           |
| <b>Número de células nos vãos</b>            | 3              | 3              | 3              |
| <b>Número total de elementos</b>             | 1419814        | 2596706        | 3978288        |
| <b>Pico de tensão termomecânica [MPa]</b>    | <b>18,899</b>  | <b>18,871</b>  | <b>18,868</b>  |

Fonte: Autor (2025).

As 3 malhas podem ser observadas na Fig. D1.

Fig. D1 – Malhas de elementos finitos para o protótipo estrutural SLMHE



Fonte: Autor (2025).

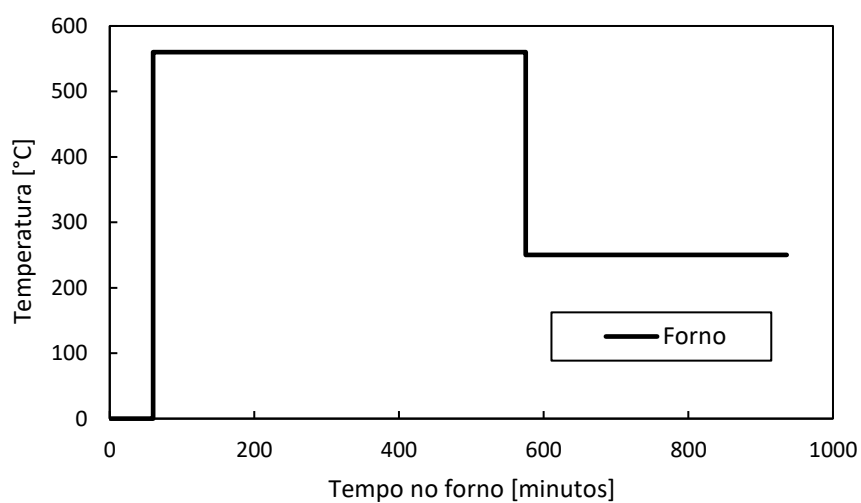
Tabela D3 – Parâmetros de entrada para o modelo numérico de tensão termomecânica

| Código do exp.      | Ti [°C] | Tw [°C] | hc [W/mm²K] | P [bar] | Código do exp.      | Ti [°C] | Tw [°C] | hc [W/mm²K] | P [bar] |
|---------------------|---------|---------|-------------|---------|---------------------|---------|---------|-------------|---------|
| <i>p_T10P100_1</i>  | 21.7    | 31.8    | 0.00466     | 98.7    | <i>p_T10P200_1</i>  | 22.0    | 31.3    | 0.00575     | 205.0   |
| <i>p_T10P100_2</i>  | 21.8    | 31.6    | 0.00567     | 114.5   | <i>p_T10P200_2</i>  | 21.8    | 31.4    | 0.00382     | 197.5   |
| <i>p_T10P100_3</i>  | 21.9    | 31.4    | 0.00635     | 114.9   | <i>p_T10P200_3</i>  | 22.1    | 31.5    | 0.00436     | 201.1   |
| <i>p_T10P100_4</i>  | 21.9    | 31.3    | 0.00436     | 103.5   | <i>p_T10P200_4</i>  | 22.1    | 31.5    | 0.00520     | 200.1   |
| <i>p_T10P100_5</i>  | 21.7    | 30.8    | 0.00533     | 99.8    | <i>p_T10P200_5</i>  | 22.2    | 31.5    | 0.00569     | 202.5   |
| <i>p_T10P100_6</i>  | 21.7    | 31.4    | 0.00425     | 103.6   | <i>p_T10P200_6</i>  | 22.2    | 31.4    | 0.00500     | 202.7   |
| <i>p_T10P100_7</i>  | 22.0    | 31.3    | 0.00335     | 109.1   | <i>p_T10P200_7</i>  | 22.3    | 31.4    | 0.00628     | 200.1   |
| <i>p_T10P100_8</i>  | 22.0    | 31.5    | 0.00574     | 107.5   | <i>p_T10P200_8</i>  | 22.1    | 31.4    | 0.00466     | 201.9   |
| <i>p_T10P100_9</i>  | 22.1    | 30.6    | 0.00489     | 106.9   | <i>p_T10P200_9</i>  | 22.2    | 31.5    | 0.00430     | 202.3   |
| <i>p_T10P100_10</i> | 22.5    | 30.8    | 0.00481     | 112.1   | <i>p_T10P200_10</i> | 22.0    | 31.4    | 0.00608     | 198.9   |
| <i>p_T20P100_1</i>  | 22.1    | 40.5    | 0.00659     | 121.5   | <i>p_T20P200_1</i>  | 22.4    | 40.7    | 0.00594     | 200.0   |
| <i>p_T20P100_2</i>  | 22.1    | 40.6    | 0.00665     | 121.4   | <i>p_T20P200_2</i>  | 22.4    | 40.7    | 0.00474     | 208.7   |
| <i>p_T20P100_3</i>  | 22.3    | 40.8    | 0.00728     | 106.2   | <i>p_T20P200_3</i>  | 22.6    | 39.5    | 0.00733     | 209.4   |
| <i>p_T20P100_4</i>  | 22.3    | 40.8    | 0.00364     | 104.1   | <i>p_T20P200_4</i>  | 22.7    | 40.8    | 0.00696     | 213.2   |
| <i>p_T20P100_5</i>  | 21.9    | 40.5    | 0.00597     | 109.4   | <i>p_T20P200_5</i>  | 22.6    | 40.8    | 0.00658     | 203.4   |
| <i>p_T20P100_6</i>  | 22.1    | 40.7    | 0.00706     | 108.8   | <i>p_T20P200_6</i>  | 22.6    | 40.8    | 0.00550     | 204.2   |
| <i>p_T20P100_7</i>  | 22.6    | 40.7    | 0.00569     | 105.4   | <i>p_T20P200_7</i>  | 22.6    | 40.8    | 0.00658     | 202.3   |
| <i>p_T20P100_8</i>  | 22.8    | 40.7    | 0.00647     | 120.7   | <i>p_T20P200_8</i>  | 22.2    | 40.2    | 0.00652     | 200.8   |
| <i>p_T20P100_9</i>  | 22.0    | 40.6    | 0.00515     | 109.1   | <i>p_T20P200_9</i>  | 22.7    | 40.6    | 0.00592     | 203.0   |
| <i>p_T20P100_10</i> | 22.2    | 40.5    | 0.00589     | 109.7   | <i>p_T20P200_10</i> | 22.5    | 40.5    | 0.00638     | 198.3   |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE E – Tratamento térmico realizado no núcleo de trocador de calor**

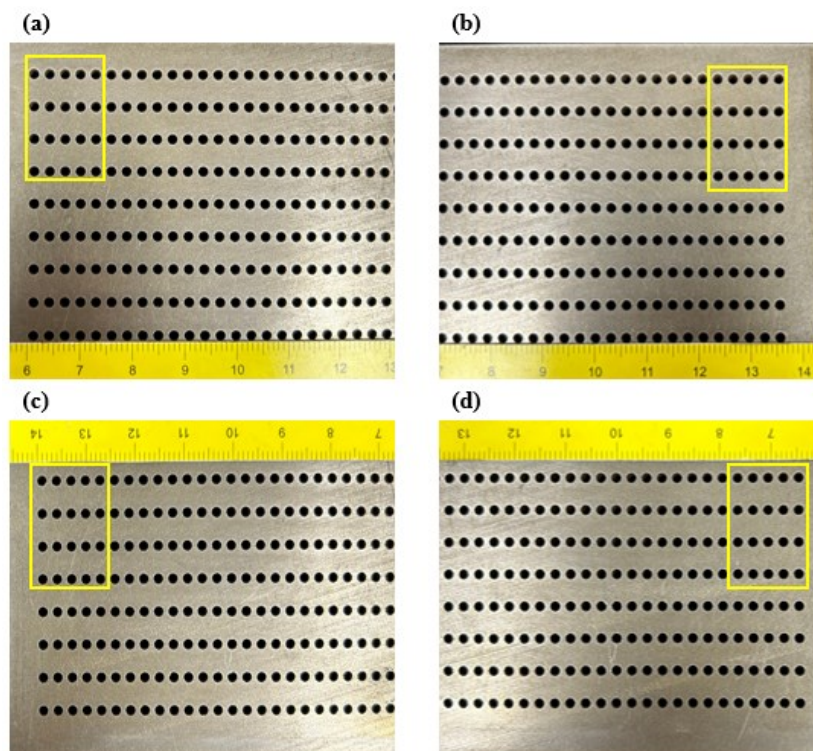
Fig. E1 – Rampa de aquecimento do núcleo durante o tratamento térmico



Fonte: Autor (2025).

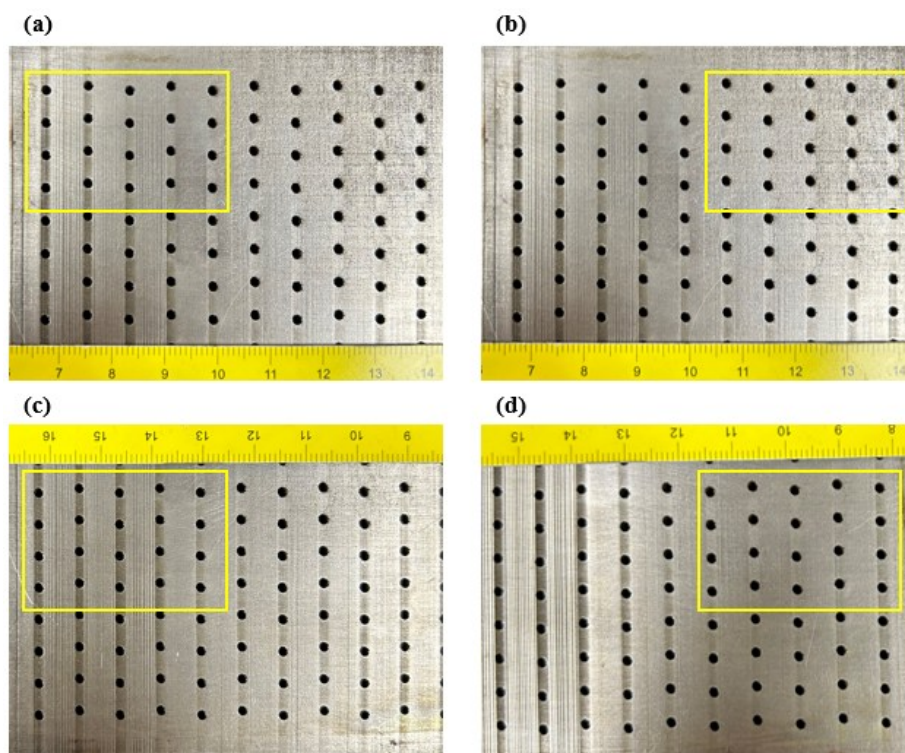
**APÊNDICE F – Fotografias utilizadas para averiguação do diâmetro dos canais**

Fig. F1 – Núcleo com canais tridimensionais pós tratamento térmico



Fonte: Autor (2025).

Fig. F2 – Núcleo com canais tridimensionais pós tratamento térmico



Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE G – Incerteza experimental combinada para taxa de transferência de calor e coeficiente global de transferência de calor

As incertezas de medições se propagam quando são utilizados operadores matemáticos em grandezas de entrada. Para grandezas de entrada estatisticamente independentes a incerteza-padrão combinada ( $i_c(y)$ ) da grandeza de saída  $y$  é dada pela lei da propagação de incertezas, mostrado na Eq. (G1). Salienta-se que  $i(x)$  é uma incerteza padrão que pode ter sido estimada por uma avaliação do tipo A ou B.

$$i_c(y) = \sqrt{\sum_{q=1}^n \left( \frac{\partial f}{\partial x_q} \right)^2 i_{x_q}^2} \quad (G1)$$

Onde  $i_c(y)$  representa a incerteza combinada da grandeza medida por uma medição indireta,  $\partial f / \partial x_q$  é a derivada parcial da função  $f$  em relação a  $x_q$ ,  $f$  é a função matemática e  $i_{x_q}$  é a incerteza padrão da  $i$ -ésima grandeza de entrada.

Durante os testes experimentais foram realizadas as aferições das temperaturas dos fluidos antes e depois dos núcleos em ambos os ramais. Essas medições foram feitas utilizando RTD's da OMEGA. Para determinação da incerteza sistemática dos RTD's foi utilizada a Eq. (G2), essa descrita pelo próprio fabricante do equipamento.

$$u_{sist}(T) = \pm(0,15 + 0,002T) \quad (G2)$$

Devido a alta quantidade de dados mensurados (2.000 medições/s), o erro aleatório dos RTD's se torna praticamente nulo, dessa forma sendo desconsiderado.

Os pontos onde serão mensuradas as pressões estão listados em um tópico mais a diante, mas as suas incertezas sistemáticas serão calculadas a partir das recomendações dos fabricantes.

Assim como para os transdutores de temperatura, a incerteza aleatória dos transdutores de pressão apresentou valores irrisórios em comparação a incerteza sistemática, dessa foram sendo desconsiderado no montante final.

Albertazzi e De Souza (2021) demonstraram que é possível determinar a incerteza de medições não correlacionadas por uma função matemática através de uma expressão geral (Eq. (G3)).

$$u^2(G) = \left( \frac{\partial f}{\partial x_1} u(x_1) \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial x_2} u(x_2) \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial f}{\partial x_n} u(x_n) \right)^2 \quad (G3)$$

Para determinar a taxa de transferência de calor experimental e o coeficiente global de transferência de calor, são utilizadas as Eq. (G4) e (G5).

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (G4)$$

$$UA = q / \Delta T_{lmt d} \quad (G5)$$

O fator de correção F usado para determinar a variação da temperatura logarítmica (LMTD) deve ser levado em consideração nas funções, porem por possuir valores próximos à unidade, eles foram desprezados. Já a incerteza para o  $c_p$  foi considerado nulo, devido aos seus valores serem tabelados e conhecidos.

Sendo assim, aplicando os conceitos apresentados, é possível obter a incerteza combinada para  $q$  e  $UA$ :

$$u(q) = q \sqrt{\left( \frac{u(\dot{m})}{\dot{m}} \right)^2 + \left( \frac{u(\Delta T)}{\Delta T} \right)^2} \quad (G6)$$

$$u(UA) = \sqrt{\left( \frac{u(q)}{\Delta T_{lmt d}} \right)^2 + \left( \frac{-q u(\Delta T_{lmt d})}{\Delta T_{lmt d}^2} \right)^2} \quad (G7)$$

onde,

$$u(\Delta T_{lmt d}) = \sqrt{\left(\frac{\partial \Delta T_{lmt d}}{\partial \Delta T_A} u(\Delta T_A)\right)^2 + \left(\frac{\partial \Delta T_{lmt d}}{\partial \Delta T_B} u(\Delta T_B)\right)^2} \quad (G8)$$

Tendo como resultado de cada uma das derivadas:

$$\frac{\partial \Delta T_{lmt d}}{\partial \Delta T_A} = \frac{\Delta T_A \ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right) - \Delta T_A + \Delta T_B}{\Delta T_A \ln^2\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (G9)$$

$$\frac{\partial \Delta T_{lmt d}}{\partial \Delta T_B} = \frac{-\Delta T_B \ln\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right) + \Delta T_A - \Delta T_B}{\Delta T_B \ln^2\left(\frac{\Delta T_A}{\Delta T_B}\right)} \quad (G10)$$

Através da equação de WelchSatterthwaite é possível determinar o número efetivo de graus de liberdade ( $v_{ef}$ ):

$$\frac{u^4}{v_{ef}} = \frac{u_1^4}{v_1} + \frac{u_2^4}{v_2} + \dots + \frac{u_n^4}{v_n} \quad (G11)$$

onde  $u_n$  é a incerteza combinada da  $i$ -ésima fonte de incerteza e  $v_n$  é o número de graus de liberdade para a  $i$ -ésima fonte de incerteza. Para o  $\Delta T$  o número de graus de liberdade é considerado infinito, o valor de  $v_{\dot{m}}$  é 129 devido a taxa de aquisição de dados, sendo que ao entrar em regime permanente são realizadas 50 medições.

Sendo assim, os valores corrigidos para taxa de transferência de calor e o coeficiente global de transferência de calor são dados pelas Equações:

$$q = \bar{q} \pm t \cdot u(q) \quad (G12)$$

$$UA = \overline{UA} \pm t \cdot u(UA) \quad (G13)$$

onde os índices com a barra enfática são os valores medidos, e o índice  $t$  é o coeficiente de Student. O coeficiente de Student é um valor tabelado obtido a partir do número de graus de

liberdade encontrados e o intervalo de confiança das medições (95% para a presente pesquisa), sendo assim para esses experimentos o valor do coeficiente foi estipulado em 1,95.

## APÊNDICE H – Convergência de malha e compilado de experimentos para a lâmina do trocador complexo

Para geração da malha foi utilizado o *Mesh* do *Ansys Workbench 18*. O domínio foi dividido em 3, fluido do canal reto, fluido do canal complexo e sólido. Por questões de similaridade, o mesmo tamanho de malha foi empregado nos dois fluidos. Para todo o domínio foi considerado uma função de tamanho na proximidade e curvatura entre faces e arestas, como fica destacado na Tabela H1. Essa função permite um refino localizado no interstício entre as malhas do fluido complexo e do sólido, e nas curvaturas do canal complexo. Para a verificação da convergência foram utilizadas as 4 malhas apresentadas na Tabela H1. O objetivo foi de diminuir o tamanho do elemento na região do interstício. Pode ser visto que o número de elementos aumenta consideravelmente entre uma malha e outra.

Tabela H1 – Malhas geradas para lâmina do trocador complexo

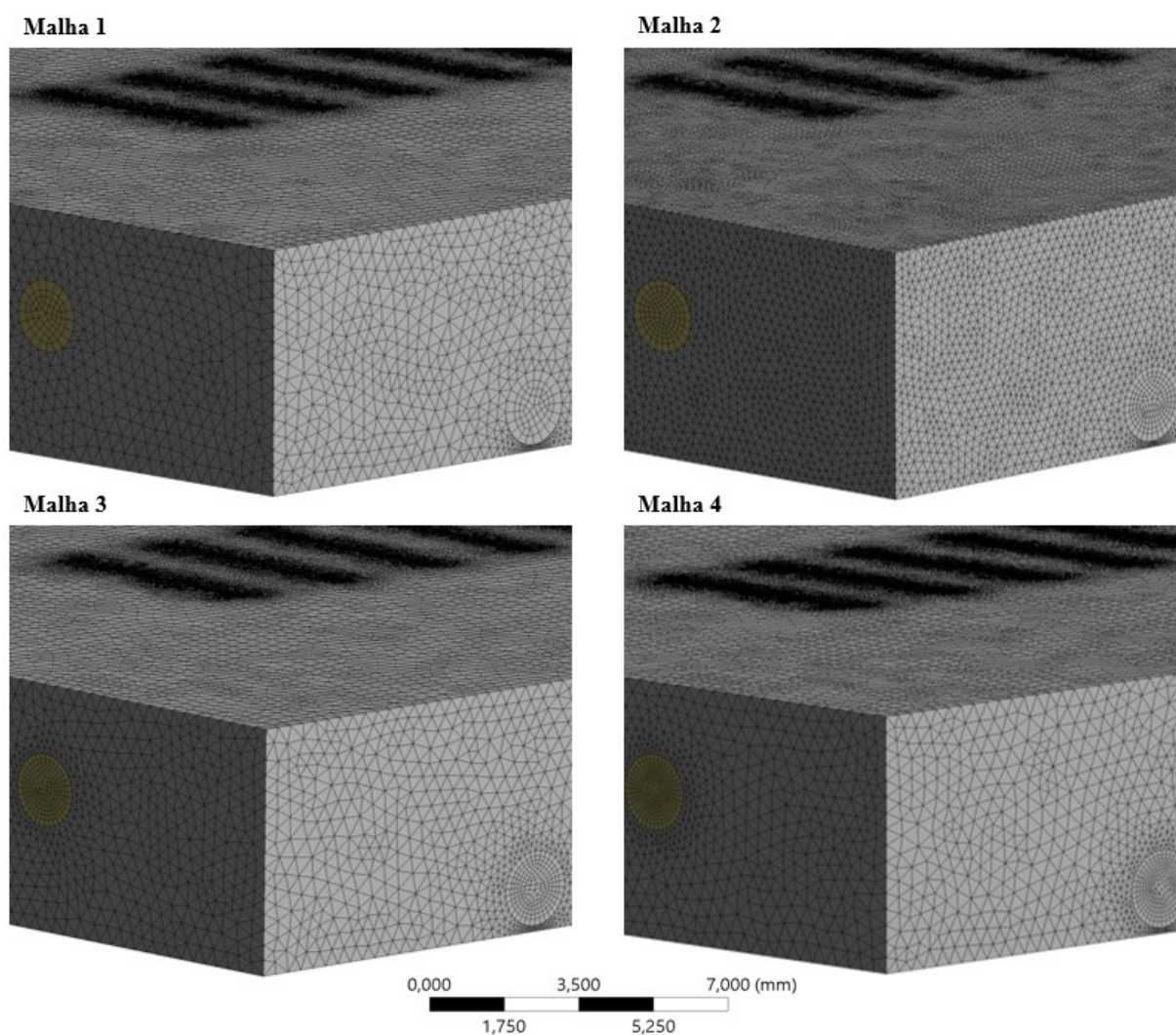
|                                              | malha 1                                    | malha 2       | malha 3       | malha 4      |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------|---------------|--------------|
| Função de tamanho                            | proximidade e curvatura em faces e arestas |               |               |              |
| Tamanho máximo da face                       | 0,4                                        | 0,25          | 0,4           | 0,4          |
| Razão de crescimento do elemento             | 1,2                                        | 1,2           | 1,2           | 1,2          |
| Tamanho mínimo                               | 0,0025                                     | 0,0025        | 0,0025        | 0,0025       |
| Tamanho máximo do elemento tetra             | 0,5                                        | 0,5           | 0,5           | 0,5          |
| Tamanho mínimo na proximidade                | 0,0025                                     | 0,0025        | 0,0025        | 0,0025       |
| Nº de células no vão                         | 3                                          | 3             | 3             | 3            |
| <b>Tamanho de elemento na face do sólido</b> | -                                          | <b>0,2</b>    | <b>0,18</b>   | <b>0,15</b>  |
| <b>Tamanho de elemento na face do fluido</b> | -                                          | <b>0,2</b>    | <b>0,18</b>   | <b>0,15</b>  |
| Nº de elementos no fluido reto               | 247108                                     | 512754        | 1149456       | 1983786      |
| Nº de elementos no fluido 3d                 | 737480                                     | 2844072       | 3707215       | 5802150      |
| Nº de elementos no sólido                    | 26225391                                   | 34304057      | 37464839      | 45796580     |
| Nº de total de elementos                     | 27209979                                   | 37660883      | 42321510      | 53582516     |
| <b>Aumento no Nº de elementos reto</b>       | -                                          | <b>107,5%</b> | <b>124,2%</b> | <b>72,6%</b> |
| <b>Aumento no Nº de elementos 3d</b>         | -                                          | <b>285,6%</b> | <b>30,3%</b>  | <b>56,5%</b> |
| <b>Aumento no Nº de elementos sólido</b>     | -                                          | <b>30,8%</b>  | <b>9,2%</b>   | <b>22,2%</b> |

Fonte: Autor (2025).

Pode ser visto na Fig. H1 a diferença no refino de malhas. Entre a malha 1 e 2 foi realizado um refino também no tamanho máximo do elemento, isso acarreta um maior refino no sólido. Por outro lado, esse refino pode não ser necessário, pois existem regiões no sólido

que estão distantes dos canais e podem ter elementos maiores. Por este motivo, para as malhas 3 e 4 foi utilizado um tamanho máximo da face igual ao da malha 1. O tamanho de elemento na região de contato entre fluido e sólido foi sempre diminuído. Isso fica claro ao observar a diferença do tamanho do elemento dos canais entre malhas, com a malha 4 apresentando o maior número de elementos.

Fig. H1 – Malhas geradas para verificar a convergência de resultados



Fonte: Autor (2025).

Foram selecionados dois experimentos do conjunto água – ar para análise de convergência. O primeiro experimento (convergência 1) considerou água no ramal reto e ar no complexo, para verificar a convergência do ramal complexo com ar, visto que nesses casos a água se comporta como uma fonte de calor com alta capacidade térmica. O segundo experimento utilizado (convergência 2) considerou água no ramal complexo e ar no ramal reto. Os parâmetros obtidos nos dois experimentos são sintetizados na Tabela H2.

Tabela H2 – Experimentos utilizados para análise de convergência de malha

|                                               | <b>Convergência 1</b> | <b>Convergência 2</b> |
|-----------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| <b>Temperatura de entrada (°C) - complexo</b> | 18,77                 | 51,14                 |
| <b>Temperatura de entrada (°C) - reto</b>     | 50,02                 | 20,01                 |
| <b>Vazão mássica (kg/s) - complexo</b>        | 0,0042                | 0,0948                |
| <b>Vazão mássica (kg/s) - reto</b>            | 0,0547                | 0,0042                |
| <b>Pressão de saída (bar) - complexo</b>      | 4,1364                | 0,3123                |
| <b>Pressão de saída (bar) - reto</b>          | 0,1338                | 4,1838                |
| <b>Densidade água (kg/m³)</b>                 | 988                   |                       |
| <b>Viscosidade água (mPa.s)</b>               | 0,538                 |                       |
| <b>Condutividade térmica (W/mK) - água</b>    | 0,6                   |                       |
| <b>Viscosidade (mPa.s) - ar</b>               | 18,8                  |                       |
| <b>Condutividade térmica (W/mK) - ar</b>      | 0,027                 |                       |

Fonte: Autor (2025).

As 4 malhas foram simuladas nas condições listadas acima. Para avaliar a média da temperatura de saída, foi utilizada uma integral de superfície na saída dos ramais, ver Fig. 42 região (E) e (F). Os resultados são apresentados na Tabela H3, tanto para a análise de convergência 1 quanto a 2, a temperatura da água sofreu leve alteração, uma vez que sua capacidade calorífica é muito superior à do ar. Deste modo, não foi considerado a diferença entre temperatura de entrada e saída da água para a escolha da malha.

O critério de convergência utilizado foi a variação da diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) no ramal do ar entre entrada e saída, apresentado em negrito na Tabela H3. Em ambas as análises de convergência, a diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) ficou abaixo de 1% entre as malhas 3 e 4. Em razão disso, a malha 3 foi empregada no estudo numérico.

Tabela H3 – Resultados da análise de convergência para as duas condições

| <b>Convergência 1 (complexo ar – reto água)</b> | <b>malha 1</b> | <b>malha 2</b> | <b>malha 3</b> | <b>malha 4</b> |
|-------------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Temperatura de saída (°C) - complexo            | 43,94          | 44,63          | 44,77          | 44,98          |
| Temperatura de saída (°C) - reto                | 49,57          | 49,56          | 49,56          | 49,55          |
| Diferença de temperatura (°C) - complexo        | 25,18          | 25,87          | 26,01          | 26,22          |
| Diferença de temperatura (°C) - reto            | 0,45           | 0,46           | 0,46           | 0,47           |
| Variação no dT (%) - complexo                   | -              | <b>2,67%</b>   | <b>0,54%</b>   | <b>0,80%</b>   |
| Variação no dT (%) - reto                       | -              | 2,16%          | 0,00%          | 2,11%          |
| Densidade entrada (kg/s) - complexo             | 6,176          | 6,175          | 6,176          | 6,176          |
| Densidade saída (kg/s) - complexo               | 5,658          | 5,646          | 5,643          | 5,639          |
| Y+ - complexo                                   | 35             | 26             | 24             | 22             |
| Y+ - reto                                       | 46             | 40             | 32             | 28             |
| <b>Convergência 2 (complexo água – reto ar)</b> | <b>malha 1</b> | <b>malha 2</b> | <b>malha 3</b> | <b>malha 4</b> |
| Temperatura de saída (°C) - complexo            | 50,89          | 50,89          | 50,9           | 50,9           |
| Temperatura de saída (°C) - reto                | 42,73          | 42,63          | 42,36          | 42,21          |
| Diferença de temperatura (°C) - complexo        | 0,25           | 0,25           | 0,24           | 0,24           |
| Diferença de temperatura (°C) - reto            | 22,72          | 22,62          | 22,35          | 22,20          |
| Variação no dT (%) - complexo                   | -              | 0,00%          | -4,17%         | 0,00%          |
| Variação no dT (%) - reto                       | -              | <b>-0,44%</b>  | <b>-1,21%</b>  | <b>-0,68%</b>  |
| Densidade entrada (kg/s) - reto                 | 6,253          | 6,252          | 6,25           | 6,249          |
| Densidade saída (kg/s) - reto                   | 5,732          | 5,734          | 5,739          | 5,741          |
| Y+ - complexo                                   | 30             | 22             | 20             | 18             |
| Y+ - reto                                       | 108            | 92             | 73             | 64             |

Fonte: Autor (2025).

Tabela H4 – Parâmetros de entrada para as simulações com ar no ramal reto e água no ramal complexo

| <b>Experimento</b> | <b>Thi [°C]</b> | <b>Tci [°C]</b> | <b>mh [kg/s]</b> | <b>mc [kg/s]</b> | <b>Pho [bar]</b> | <b>Pco [bar]</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>T40-as1</i>     | 42.04           | 24.22           | 0.097            | 0.0007           | 0.326            | 0.242            |
| <i>T40-as2</i>     | 42.01           | 24.32           | 0.097            | 0.0012           | 0.325            | 0.682            |
| <i>T40-as3</i>     | 41.98           | 24.37           | 0.097            | 0.0015           | 0.326            | 0.949            |
| <i>T40-as4</i>     | 41.95           | 24.42           | 0.097            | 0.0020           | 0.326            | 1.454            |
| <i>T40-as5</i>     | 41.91           | 24.41           | 0.097            | 0.0023           | 0.325            | 1.857            |
| <i>T40-as6</i>     | 41.88           | 24.30           | 0.097            | 0.0027           | 0.325            | 2.308            |
| <i>T40-as7</i>     | 41.84           | 23.96           | 0.097            | 0.0031           | 0.324            | 2.826            |
| <i>T40-as8</i>     | 41.81           | 23.31           | 0.098            | 0.0038           | 0.324            | 3.637            |
| <i>T40-as9</i>     | 41.79           | 22.79           | 0.098            | 0.0041           | 0.324            | 3.986            |
| <i>T50-as1</i>     | 51.10           | 23.42           | 0.095            | 0.0007           | 0.308            | 0.248            |
| <i>T50-as2</i>     | 51.09           | 23.72           | 0.095            | 0.0011           | 0.311            | 0.599            |
| <i>T50-as3</i>     | 51.07           | 23.85           | 0.095            | 0.0016           | 0.310            | 1.089            |
| <i>T50-as4</i>     | 51.07           | 23.87           | 0.095            | 0.0020           | 0.310            | 1.478            |
| <i>T50-as5</i>     | 51.06           | 23.94           | 0.095            | 0.0023           | 0.311            | 1.930            |
| <i>T50-as6</i>     | 51.07           | 23.58           | 0.095            | 0.0027           | 0.311            | 2.313            |
| <i>T50-as7</i>     | 51.08           | 23.08           | 0.095            | 0.0030           | 0.313            | 2.743            |
| <i>T50-as8</i>     | 51.10           | 22.44           | 0.095            | 0.0035           | 0.313            | 3.340            |
| <i>T50-as9</i>     | 51.13           | 21.62           | 0.095            | 0.0040           | 0.314            | 3.952            |

Fonte: Autor (2025).

Tabela H5 – Parâmetros de entrada para as simulações com ar no ramal complexo e água no ramal reto

| Experimento     | Thi [°C] | Tei [°C] | mh [kg/s] | mc [kg/s] | Pho [°C] | Pco [°C] |
|-----------------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| <i>T40-ac1</i>  | 40.55    | 23.02    | 0.0550    | 0.0007    | 0.136    | 0.222    |
| <i>T40-ac2</i>  | 40.58    | 23.40    | 0.0551    | 0.0011    | 0.137    | 0.563    |
| <i>T40-ac3</i>  | 40.60    | 23.71    | 0.0551    | 0.0015    | 0.137    | 0.969    |
| <i>T40-ac4</i>  | 40.62    | 23.77    | 0.0551    | 0.0018    | 0.137    | 1.304    |
| <i>T40-ac5</i>  | 40.65    | 23.94    | 0.0552    | 0.0022    | 0.137    | 1.767    |
| <i>T40-ac6</i>  | 40.69    | 23.91    | 0.0553    | 0.0026    | 0.138    | 2.255    |
| <i>T40-ac7</i>  | 40.77    | 23.00    | 0.0553    | 0.0030    | 0.137    | 2.679    |
| <i>T40-ac8</i>  | 40.80    | 22.31    | 0.0555    | 0.0034    | 0.137    | 3.128    |
| <i>T40-ac9</i>  | 40.85    | 21.43    | 0.0553    | 0.0039    | 0.135    | 3.802    |
| <i>T40-ac10</i> | 40.85    | 20.84    | 0.0556    | 0.0041    | 0.136    | 4.028    |
| <i>T45-ac1</i>  | 45.75    | 23.57    | 0.0547    | 0.0008    | 0.134    | 0.299    |
| <i>T45-ac2</i>  | 45.76    | 24.05    | 0.0546    | 0.0012    | 0.134    | 0.629    |
| <i>T45-ac3</i>  | 45.81    | 24.57    | 0.0547    | 0.0015    | 0.133    | 0.964    |
| <i>T45-ac4</i>  | 45.85    | 24.92    | 0.0547    | 0.0020    | 0.133    | 1.494    |
| <i>T45-ac5</i>  | 45.87    | 25.04    | 0.0548    | 0.0024    | 0.133    | 2.017    |
| <i>T45-ac6</i>  | 45.94    | 25.15    | 0.0548    | 0.0027    | 0.134    | 2.354    |
| <i>T45-ac7</i>  | 45.96    | 24.87    | 0.0549    | 0.0031    | 0.134    | 2.828    |
| <i>T45-ac8</i>  | 46.00    | 24.26    | 0.0548    | 0.0037    | 0.134    | 3.594    |
| <i>T45-ac9</i>  | 46.03    | 23.05    | 0.0549    | 0.0039    | 0.135    | 3.776    |
| <i>T45-ac10</i> | 46.04    | 21.96    | 0.0549    | 0.0041    | 0.134    | 4.014    |
| <i>T50-ac1</i>  | 50.06    | 21.03    | 0.0545    | 0.0007    | 0.135    | 0.281    |
| <i>T50-ac2</i>  | 50.03    | 21.46    | 0.0544    | 0.0011    | 0.135    | 0.598    |
| <i>T50-ac3</i>  | 49.86    | 21.89    | 0.0544    | 0.0016    | 0.133    | 1.072    |
| <i>T50-ac4</i>  | 49.80    | 22.05    | 0.0545    | 0.0020    | 0.133    | 1.511    |
| <i>T50-ac5</i>  | 49.84    | 22.05    | 0.0547    | 0.0023    | 0.135    | 1.968    |
| <i>T50-ac6</i>  | 49.91    | 21.79    | 0.0547    | 0.0027    | 0.133    | 2.361    |
| <i>T50-ac7</i>  | 50.01    | 21.40    | 0.0547    | 0.0030    | 0.134    | 2.765    |
| <i>T50-ac8</i>  | 50.08    | 20.83    | 0.0547    | 0.0034    | 0.133    | 3.297    |
| <i>T50-ac9</i>  | 50.14    | 19.98    | 0.0546    | 0.0040    | 0.130    | 4.002    |
| <i>T50-ac10</i> | 50.02    | 18.76    | 0.0547    | 0.0042    | 0.134    | 4.136    |
| <i>T55-ac1</i>  | 54.85    | 22.25    | 0.0542    | 0.0007    | 0.133    | 0.300    |
| <i>T55-ac2</i>  | 54.93    | 22.57    | 0.0543    | 0.0011    | 0.134    | 0.634    |
| <i>T55-ac3</i>  | 54.99    | 22.84    | 0.0542    | 0.0016    | 0.133    | 1.168    |
| <i>T55-ac4</i>  | 55.09    | 23.07    | 0.0543    | 0.0020    | 0.134    | 1.575    |
| <i>T55-ac5</i>  | 55.07    | 23.08    | 0.0544    | 0.0023    | 0.134    | 1.945    |
| <i>T55-ac6</i>  | 54.87    | 22.96    | 0.0543    | 0.0026    | 0.133    | 2.279    |
| <i>T55-ac7</i>  | 54.72    | 22.54    | 0.0543    | 0.0031    | 0.133    | 2.983    |
| <i>T55-ac8</i>  | 54.72    | 21.95    | 0.0544    | 0.0034    | 0.132    | 3.383    |
| <i>T55-ac9</i>  | 54.88    | 20.42    | 0.0544    | 0.0040    | 0.130    | 4.034    |
| <i>T55-ac10</i> | 54.90    | 19.38    | 0.0543    | 0.0042    | 0.129    | 4.272    |
| <i>T60-ac1</i>  | 59.85    | 23.90    | 0.0539    | 0.0008    | 0.132    | 0.347    |
| <i>T60-ac2</i>  | 59.91    | 24.16    | 0.0539    | 0.0012    | 0.133    | 0.741    |

|                 |       |       |        |        |       |       |
|-----------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|
| <i>T60-ac3</i>  | 59.98 | 24.47 | 0.0538 | 0.0015 | 0.131 | 1.050 |
| <i>T60-ac4</i>  | 60.05 | 24.68 | 0.0539 | 0.0019 | 0.131 | 1.522 |
| <i>T60-ac5</i>  | 60.11 | 24.82 | 0.0541 | 0.0022 | 0.130 | 1.919 |
| <i>T60-ac6</i>  | 60.20 | 24.74 | 0.0541 | 0.0027 | 0.130 | 2.524 |
| <i>T60-ac7</i>  | 60.31 | 24.28 | 0.0538 | 0.0031 | 0.127 | 2.978 |
| <i>T60-ac8</i>  | 60.38 | 23.73 | 0.0540 | 0.0035 | 0.128 | 3.521 |
| <i>T60-ac9</i>  | 60.48 | 22.37 | 0.0539 | 0.0039 | 0.128 | 3.924 |
| <i>T60-ac10</i> | 60.50 | 21.33 | 0.0539 | 0.0041 | 0.130 | 4.192 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela H6 – Parâmetros de entrada para as simulações com água quente no ramal complexo e água fria no ramal reto

| Experimento      | Thi [°C] | Tci [°C] | mh [kg/s] | mc [kg/s] |
|------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| <i>aqc1-af4</i>  | 57.37    | 18.41    | 0.035     | 0.034     |
| <i>aqc2-af4</i>  | 57.52    | 18.46    | 0.038     | 0.034     |
| <i>aqc3-af4</i>  | 57.54    | 18.59    | 0.041     | 0.034     |
| <i>aqc4-af4</i>  | 57.1     | 18.45    | 0.048     | 0.034     |
| <i>aqc5-af4</i>  | 57       | 18.38    | 0.062     | 0.034     |
| <i>aqc6-af4</i>  | 57.17    | 18.35    | 0.072     | 0.034     |
| <i>aqc7-af4</i>  | 57.09    | 18.49    | 0.082     | 0.034     |
| <i>aqc8-af4</i>  | 56.98    | 18.68    | 0.092     | 0.034     |
| <i>aqc9-af4</i>  | 57       | 18.84    | 0.102     | 0.034     |
| <i>aqc10-af4</i> | 57.03    | 19.01    | 0.112     | 0.034     |
| <i>aqc11-af4</i> | 57.16    | 19.18    | 0.122     | 0.034     |
| <i>aqc12-af4</i> | 57.19    | 19.28    | 0.132     | 0.034     |

Fonte: Autor (2025).

Tabela H7 – Parâmetros de entrada para as simulações com água fria no ramal complexo e água quente no ramal reto

| Experimento       | Thi [°C] | Tci [°C] | mh [kg/s] | mc [kg/s] |
|-------------------|----------|----------|-----------|-----------|
| <i>afc1-aqr4</i>  | 46.1     | 20.14    | 0.103     | 0.018     |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 45.89    | 20.21    | 0.103     | 0.028     |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 45.66    | 20.33    | 0.103     | 0.038     |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 45.37    | 20.65    | 0.103     | 0.048     |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 45.18    | 20.87    | 0.103     | 0.058     |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 45       | 21.05    | 0.105     | 0.068     |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 45.06    | 21.18    | 0.104     | 0.078     |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 45.11    | 21.28    | 0.104     | 0.087     |
| <i>afc9-aqr4</i>  | 45.18    | 21.27    | 0.105     | 0.097     |
| <i>afc10-aqr4</i> | 45.19    | 21.36    | 0.105     | 0.107     |

Fonte: Autor (2025).

## APÊNDICE I – Convergência de malha e compilado de experimentos para os canais

Para cada canal existem duas malhas, do fluido e do sólido. Primeiramente foi definida uma malha para ambos com uma função de proximidade e curvatura. A malha padrão é a mesma para todos os casos utilizados para a convergência. A variação entre as malhas para convergência está no tamanho dos refinamentos, um na face do sólido e outro na face do fluido, de tamanhos diferentes pois a malha do sólido não necessita ser tão refinada quanto a do fluido. Na superfície do fluido próximo a parede do canal, além do refino, é utilizado também um *inflation*, que são camadas na malha fluidica na região de contato entre fluido e sólido, e seu refino está diretamente ligado ao valor do  $Y^+$  calculado.

As condições para análise de convergência, para o canal completo, são apresentadas na Tabela I1. As propriedades da água são definidas na temperatura ambiente, a mesma utilizada nos experimentos hidrodinâmicos.

Tabela I1 – Condições de contorno utilizadas para análise de convergência no canal complexo.

| $\dot{m}$ [kg/s] | $P_{out}$ [bar] | $\rho_w$ [kg/s] | $\mu$ [kgm/s] |
|------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| 0,00371          | 0,283634        | 998             | 0,001003      |

Fonte: Autor (2025).

A abordagem para geração de malha nos canais consiste em definir a espessura da primeira camada do *inflation*. Pode ser visto na Tabela I2 que entre as malhas 1 e 2, a pressão de entrada varia 0,5% e o  $Y^+$  0,34. Entre as malhas 2 e 3 a variação na pressão é de 0,03% e no  $Y^+$  é 0,19. É extremamente importante para a simulação que a espessura da camada de *inflation* compreenda toda a camada limite. Portanto para a escolha da malha deve ser considerado também a espessura total das camadas. Na malha 2 a espessura total da camada é maior do que na 1 e na 3, e atende este critério. Dessa forma, a malha 2 foi selecionada para repetibilidade de resultados.

Tabela I2 – Malhas geradas para o canal complexo – baseado na espessura da primeira camada

|                                                             | malha 1                                    | malha 2      | malha 3       |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|---------------|
| Função de tamanho                                           | proximidade e curvatura em faces e arestas |              |               |
| Tamanho máximo da face [mm]                                 | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Razão de crescimento do elemento                            | 1,2                                        | 1,2          | 1,2           |
| Tamanho mínimo [mm]                                         | 2,5e-3                                     | 2,5e-3       | 2,5e-3        |
| Tamanho máximo do elemento tetra [mm]                       | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Tamanho mínimo na proximidade [mm]                          | 2,5e-3                                     | 2,5e-3       | 2,5e-3        |
| Nº de células no vão                                        | 3                                          | 3            | 3             |
| Tamanho de elemento na face do sólido [mm]                  | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Tamanho de elemento na face do fluído [mm]                  | 0,05                                       | 0,04         | 0,03          |
| <b><i>Inflation</i> – Nº de camadas</b>                     | <b>6</b>                                   | <b>10</b>    | <b>10</b>     |
| <i>Inflation</i> – Razão de crescimento do elemento         | 1,2                                        | 1,2          | 1,2           |
| <b><i>Inflation</i> – Espessura da primeira camada [mm]</b> | <b>9,3e-3</b>                              | <b>5e-3</b>  | <b>2,5e-3</b> |
| <b><i>Inflation</i> – Espessura total</b>                   | <b>0,09</b>                                | <b>0,13</b>  | <b>0,06</b>   |
| Nº de elementos sólido                                      | 2075370                                    | 2075370      | 2075370       |
| Nº de elementos no fluído                                   | 8770150                                    | 16223190     | 30708771      |
| <b>Y+</b>                                                   | <b>3,49</b>                                | <b>3,15</b>  | <b>2,96</b>   |
| <b>Pressão de entrada [Pa]</b>                              | <b>40455</b>                               | <b>40644</b> | <b>40632</b>  |

Fonte: Autor (2025).

A Tabela I3 apresenta as condições de entrada e saída utilizadas para avaliar a convergência da malha do canal reto.

Tabela I3 – Condições de contorno utilizadas para análise de convergência no canal reto

| $\dot{m}$ [kg/s] | P <sub>out</sub> [bar] | $\rho w$ [kg/s] | $\mu$ [kgm/s] |
|------------------|------------------------|-----------------|---------------|
| 0,006938         | 0,23955                | 997             | 0,00089       |

Fonte: Autor (2025).

A mesma abordagem utilizada no canal complexo foi aplicada para o canal reto, utilizando as mesmas definições de malha e as mesmas camadas de *inflation*. Os resultados considerando o parâmetro  $Y+$  e o tamanho da malha são apresentados na Tabela I4. Devido à alta rugosidade do canal reto, os valores de  $Y+$  foram elevados em comparação ao canal complexo. Em razão disso, o critério para seleção da malha foi a pressão de entrada. A pressão de entrada variou 0,4 % entre a malha 1 e 2 e 1,4 % entre a malha 2 e 3, e por este motivo fora

selecionado a malha 1, que apresenta uma boa relação entre custo computacional e acurácia de resultado.

Tabela I4 – Malhas geradas para o canal reto – baseado na espessura da primeira camada

|                                                             | malha 1                                    | malha 2      | malha 3       |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|---------------|
| Função de tamanho                                           | proximidade e curvatura em faces e arestas |              |               |
| Tamanho máximo da face [mm]                                 | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Razão de crescimento do elemento                            | 1,2                                        | 1,2          | 1,2           |
| Tamanho mínimo [mm]                                         | 2,5e-3                                     | 2,5e-3       | 2,5e-3        |
| Tamanho máximo do elemento tetra [mm]                       | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Tamanho mínimo na proximidade [mm]                          | 2,5e-3                                     | 2,5e-3       | 2,5e-3        |
| Nº de células no vão                                        | 3                                          | 3            | 3             |
| Tamanho de elemento na face do sólido [mm]                  | 0,1                                        | 0,1          | 0,1           |
| Tamanho de elemento na face do fluido [mm]                  | 0,05                                       | 0,04         | 0,03          |
| <b>Inflation – Nº de camadas</b>                            | <b>6</b>                                   | <b>10</b>    | <b>10</b>     |
| <i>Inflation</i> – Razão de crescimento do elemento         | 1,2                                        | 1,2          | 1,2           |
| <b><i>Inflation</i> – Espessura da primeira camada [mm]</b> | <b>9,3e-3</b>                              | <b>5e-3</b>  | <b>2,5e-3</b> |
| <b><i>Inflation</i> – Espessura total</b>                   | <b>0,09</b>                                | <b>0,13</b>  | <b>0,06</b>   |
| Nº de elementos sólido                                      | 525350                                     | 525350       | 525350        |
| Nº de elementos no fluido                                   | 6529515                                    | 11923340     | 22968288      |
| <b>Y+</b>                                                   | <b>13,01</b>                               | <b>12,57</b> | <b>11,93</b>  |
| <b>Pressão de entrada [Pa]</b>                              | <b>34166</b>                               | <b>34306</b> | <b>33841</b>  |

Fonte: Autor (2025).

Tabela I5 – Parâmetros de entrada para as simulações hidrodinâmicas nos canais individuais

| <i>Água – complexo</i> |               | <i>Ar – reto</i> |               | <i>Ar – complexo</i> |               | <i>Água – reto</i> |               |
|------------------------|---------------|------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------------|---------------|
| mwc [kg/s]             | Poutlet [bar] | mas [kg/s]       | Poutlet [bar] | mac [kg/s]           | Poutlet [bar] | mws [kg/s]         | Poutlet [bar] |
| 0.000529               | 0.010         | 0.000068         | 0.240         | 0.000030             | 0.284         | 0.001148           | 0.039         |
| 0.000894               | 0.023         | 0.000098         | 0.511         | 0.000044             | 0.573         | 0.001868           | 0.050         |
| 0.001333               | 0.045         | 0.000148         | 1.011         | 0.000061             | 0.999         | 0.002661           | 0.068         |
| 0.001752               | 0.072         | 0.000173         | 1.300         | 0.000075             | 1.364         | 0.003409           | 0.089         |
| 0.002158               | 0.104         | 0.000210         | 1.769         | 0.000089             | 1.772         | 0.004180           | 0.113         |
| 0.002579               | 0.143         | 0.000237         | 2.091         | 0.000105             | 2.247         | 0.004931           | 0.141         |
| 0.002998               | 0.188         | 0.000278         | 2.685         | 0.000114             | 2.550         | 0.005669           | 0.172         |
| 0.003402               | 0.240         | 0.000321         | 3.202         | 0.000134             | 3.180         | 0.006395           | 0.210         |
| 0.003714               | 0.284         | 0.000358         | 3.673         | 0.000148             | 3.639         | 0.006938           | 0.240         |
|                        |               |                  |               | 0.000157             | 3.947         |                    |               |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE J – Compilado dos experimentos com ar no ramal reto e água no ramal complexo**

Tabela J1 – Compilado dos experimentos no núcleo considerando ar no ramal reto

| <b>Experimento</b> | <b>Thi [°C]</b> | <b>Tci [°C]</b> | <b>Tco [°C]</b> | <b>Tho [°C]</b> | <b>mc [kg/s]</b> | <b>mh [kg/s]</b> | <b>Pc [bar]</b> | <b>Ph [bar]</b> | <b>Rec</b> | <b>Reh</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|
| <i>T40-as1</i>     | 42,04           | 24,22           | 38,89           | 41,45           | 0,009            | 1,261            | 0,259           | 0,263           | 2452       | 3878       |
| <i>T40-as2</i>     | 42,01           | 24,32           | 39,04           | 41,41           | 0,016            | 1,259            | 0,714           | 0,274           | 4119       | 3871       |
| <i>T40-as3</i>     | 41,98           | 24,37           | 39,03           | 41,37           | 0,019            | 1,260            | 1,003           | 0,276           | 5026       | 3874       |
| <i>T40-as4</i>     | 41,95           | 24,42           | 38,93           | 41,31           | 0,025            | 1,263            | 1,519           | 0,276           | 6574       | 3885       |
| <i>T40-as5</i>     | 41,91           | 24,41           | 38,79           | 41,26           | 0,030            | 1,262            | 1,938           | 0,274           | 7746       | 3880       |
| <i>T40-as6</i>     | 41,88           | 24,30           | 38,65           | 41,22           | 0,035            | 1,265            | 2,400           | 0,275           | 9007       | 3891       |
| <i>T40-as7</i>     | 41,84           | 23,96           | 38,42           | 41,16           | 0,040            | 1,265            | 2,936           | 0,273           | 10396      | 3890       |
| <i>T40-as8</i>     | 41,81           | 23,31           | 38,03           | 41,10           | 0,049            | 1,268            | 3,762           | 0,272           | 12626      | 3900       |
| <i>T40-as9</i>     | 41,79           | 22,79           | 37,74           | 41,06           | 0,053            | 1,268            | 4,125           | 0,271           | 13690      | 3899       |
| <i>T50-as1</i>     | 51,10           | 23,42           | 46,32           | 50,45           | 0,010            | 1,229            | 0,265           | 0,256           | 2461       | 4507       |
| <i>T50-as2</i>     | 51,09           | 23,72           | 46,63           | 50,42           | 0,015            | 1,235            | 0,631           | 0,257           | 3802       | 4530       |
| <i>T50-as3</i>     | 51,07           | 23,85           | 46,64           | 50,37           | 0,021            | 1,230            | 1,143           | 0,256           | 5468       | 4512       |
| <i>T50-as4</i>     | 51,07           | 23,87           | 46,54           | 50,35           | 0,026            | 1,232            | 1,543           | 0,256           | 6604       | 4516       |
| <i>T50-as5</i>     | 51,06           | 23,94           | 46,39           | 50,32           | 0,030            | 1,232            | 2,011           | 0,255           | 7874       | 4515       |
| <i>T50-as6</i>     | 51,07           | 23,58           | 46,19           | 50,31           | 0,035            | 1,232            | 2,404           | 0,255           | 8929       | 4517       |
| <i>T50-as7</i>     | 51,08           | 23,08           | 45,94           | 50,30           | 0,039            | 1,234            | 2,853           | 0,256           | 10152      | 4523       |
| <i>T50-as8</i>     | 51,10           | 22,44           | 45,56           | 50,28           | 0,045            | 1,233            | 3,465           | 0,255           | 11748      | 4519       |
| <i>T50-as9</i>     | 51,13           | 21,62           | 45,16           | 50,28           | 0,052            | 1,237            | 4,091           | 0,256           | 13422      | 4537       |

Fonte: Autor (2025).

Tabela J2 – Parâmetros de saída dos experimentos no núcleo considerando ar no ramal reto –  
experimental e numérico

| Experimento    | q <sub>c</sub><br>[kW] | u(q <sub>c</sub> )<br>[kW] | q <sub>cnum</sub><br>[kW] | dif <sub>num</sub><br>[%] | q <sub>c</sub> analt<br>[kW] | dif <sub>analt</sub><br>[%] | UA<br>[kW/°C] | u(UA)<br>[kW/°C] | UAnum<br>[kW/°C] | q <sub>max</sub><br>[kW] | ε     | ε <sub>num</sub> | ε <sub>analt</sub> |
|----------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------|------------------|------------------|--------------------------|-------|------------------|--------------------|
| <i>T40-as1</i> | 0,140                  | 0,0056                     | 0,138                     | <b>1,1</b>                | 0,116                        | <b>17,2</b>                 | 0,0169        | 0,0015           | 0,0161           | 0,170                    | 0,823 | 0,814            | 0,681              |
| <i>T40-as2</i> | 0,236                  | 0,0095                     | 0,224                     | <b>4,8</b>                | 0,206                        | <b>12,5</b>                 | 0,0292        | 0,0026           | 0,0252           | 0,283                    | 0,832 | 0,792            | 0,728              |
| <i>T40-as3</i> | 0,286                  | 0,0116                     | 0,270                     | <b>5,6</b>                | 0,253                        | <b>11,7</b>                 | 0,0357        | 0,0032           | 0,0302           | 0,344                    | 0,832 | 0,786            | 0,735              |
| <i>T40-as4</i> | 0,371                  | 0,0151                     | 0,349                     | <b>6,0</b>                | 0,331                        | <b>10,7</b>                 | 0,0460        | 0,0041           | 0,0386           | 0,448                    | 0,828 | 0,778            | 0,739              |
| <i>T40-as5</i> | 0,433                  | 0,0178                     | 0,407                     | <b>5,9</b>                | 0,390                        | <b>9,9</b>                  | 0,0532        | 0,0047           | 0,0448           | 0,527                    | 0,822 | 0,773            | 0,741              |
| <i>T40-as6</i> | 0,503                  | 0,0207                     | 0,473                     | <b>5,9</b>                | 0,456                        | <b>9,2</b>                  | 0,0608        | 0,0053           | 0,0513           | 0,616                    | 0,816 | 0,768            | 0,741              |
| <i>T40-as7</i> | 0,584                  | 0,0239                     | 0,551                     | <b>5,7</b>                | 0,536                        | <b>8,3</b>                  | 0,0684        | 0,0057           | 0,0583           | 0,723                    | 0,808 | 0,762            | 0,741              |
| <i>T40-as8</i> | 0,723                  | 0,0288                     | 0,683                     | <b>5,4</b>                | 0,673                        | <b>6,9</b>                  | 0,0799        | 0,0062           | 0,0688           | 0,908                    | 0,796 | 0,753            | 0,741              |
| <i>T40-as9</i> | 0,796                  | 0,0311                     | 0,756                     | <b>5,0</b>                | 0,749                        | <b>5,8</b>                  | 0,0843        | 0,0062           | 0,0736           | 1,011                    | 0,787 | 0,748            | 0,741              |
| <i>T50-as1</i> | 0,219                  | 0,0059                     | 0,217                     | <b>1,1</b>                | 0,181                        | <b>17,2</b>                 | 0,0170        | 0,0010           | 0,0163           | 0,265                    | 0,827 | 0,818            | 0,685              |
| <i>T50-as2</i> | 0,339                  | 0,0091                     | 0,321                     | <b>5,1</b>                | 0,294                        | <b>13,1</b>                 | 0,0272        | 0,0017           | 0,0234           | 0,404                    | 0,837 | 0,794            | 0,727              |
| <i>T50-as3</i> | 0,485                  | 0,0131                     | 0,453                     | <b>6,4</b>                | 0,428                        | <b>11,6</b>                 | 0,0393        | 0,0025           | 0,0326           | 0,579                    | 0,837 | 0,784            | 0,740              |
| <i>T50-as4</i> | 0,582                  | 0,0158                     | 0,544                     | <b>6,6</b>                | 0,519                        | <b>10,9</b>                 | 0,0468        | 0,0029           | 0,0388           | 0,698                    | 0,834 | 0,778            | 0,743              |
| <i>T50-as5</i> | 0,687                  | 0,0188                     | 0,642                     | <b>6,6</b>                | 0,618                        | <b>10,1</b>                 | 0,0548        | 0,0034           | 0,0456           | 0,830                    | 0,828 | 0,773            | 0,744              |
| <i>T50-as6</i> | 0,785                  | 0,0213                     | 0,734                     | <b>6,5</b>                | 0,711                        | <b>9,4</b>                  | 0,0611        | 0,0037           | 0,0510           | 0,954                    | 0,823 | 0,769            | 0,745              |
| <i>T50-as7</i> | 0,902                  | 0,0241                     | 0,844                     | <b>6,4</b>                | 0,823                        | <b>8,8</b>                  | 0,0681        | 0,0039           | 0,0572           | 1,105                    | 0,817 | 0,764            | 0,745              |
| <i>T50-as8</i> | 1,056                  | 0,0278                     | 0,991                     | <b>6,1</b>                | 0,975                        | <b>7,7</b>                  | 0,0765        | 0,0042           | 0,0649           | 1,309                    | 0,807 | 0,757            | 0,745              |
| <i>T50-as9</i> | 1,228                  | 0,0315                     | 1,155                     | <b>6,0</b>                | 1,146                        | <b>6,7</b>                  | 0,0849        | 0,0044           | 0,0727           | 1,540                    | 0,798 | 0,750            | 0,744              |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE K – Compilado dos experimentos com ar no ramal complexo e água no ramal reto**

Tabela K1 – Compilado dos experimentos no núcleo considerando ar no ramal complexo

| <b>Experimento</b> | <b>Thi [°C]</b> | <b>Tci [°C]</b> | <b>Tco [°C]</b> | <b>Tho [°C]</b> | <b>mc [kg/s]</b> | <b>mh [kg/s]</b> | <b>Pc [bar]</b> | <b>Ph [bar]</b> | <b>Rec</b> | <b>Reh</b> |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|------------|------------|
| <i>T40-ac1</i>     | 40,55           | 23,02           | 39,73           | 40,51           | 0,009            | 0,715            | 0,230           | 0,301           | 951        | 5337       |
| <i>T40-ac2</i>     | 40,58           | 23,40           | 39,76           | 40,51           | 0,014            | 0,717            | 0,576           | 0,302           | 1530       | 5348       |
| <i>T40-ac3</i>     | 40,60           | 23,71           | 39,76           | 40,52           | 0,020            | 0,717            | 0,988           | 0,302           | 2099       | 5351       |
| <i>T40-ac4</i>     | 40,62           | 23,77           | 39,67           | 40,51           | 0,024            | 0,717            | 1,328           | 0,302           | 2536       | 5351       |
| <i>T40-ac5</i>     | 40,65           | 23,94           | 39,67           | 40,52           | 0,029            | 0,717            | 1,796           | 0,302           | 3090       | 5354       |
| <i>T40-ac6</i>     | 40,69           | 23,91           | 39,63           | 40,53           | 0,034            | 0,719            | 2,289           | 0,303           | 3660       | 5365       |
| <i>T40-ac7</i>     | 40,77           | 23,00           | 39,54           | 40,58           | 0,039            | 0,718            | 2,716           | 0,302           | 4128       | 5362       |
| <i>T40-ac8</i>     | 40,80           | 22,31           | 39,41           | 40,59           | 0,044            | 0,721            | 3,173           | 0,302           | 4650       | 5384       |
| <i>T40-ac9</i>     | 40,85           | 21,43           | 39,21           | 40,58           | 0,051            | 0,719            | 3,852           | 0,300           | 5461       | 5370       |
| <i>T40-ac10</i>    | 40,85           | 20,84           | 38,87           | 40,57           | 0,054            | 0,722            | 4,080           | 0,301           | 5735       | 5391       |
| <i>T45-ac1</i>     | 45,75           | 23,57           | 44,58           | 45,69           | 0,010            | 0,711            | 0,307           | 0,299           | 1076       | 5709       |
| <i>T45-ac2</i>     | 45,76           | 24,05           | 44,59           | 45,68           | 0,015            | 0,710            | 0,642           | 0,299           | 1603       | 5708       |
| <i>T45-ac3</i>     | 45,81           | 24,57           | 44,68           | 45,70           | 0,019            | 0,711            | 0,983           | 0,298           | 2060       | 5715       |
| <i>T45-ac4</i>     | 45,85           | 24,92           | 44,66           | 45,71           | 0,026            | 0,711            | 1,518           | 0,298           | 2719       | 5712       |
| <i>T45-ac5</i>     | 45,87           | 25,04           | 44,53           | 45,70           | 0,031            | 0,712            | 2,046           | 0,299           | 3324       | 5720       |
| <i>T45-ac6</i>     | 45,94           | 25,15           | 44,59           | 45,75           | 0,035            | 0,713            | 2,388           | 0,299           | 3745       | 5727       |
| <i>T45-ac7</i>     | 45,96           | 24,87           | 44,46           | 45,73           | 0,040            | 0,713            | 2,865           | 0,299           | 4274       | 5732       |
| <i>T45-ac8</i>     | 46,00           | 24,26           | 44,26           | 45,72           | 0,048            | 0,713            | 3,638           | 0,299           | 5163       | 5726       |
| <i>T45-ac9</i>     | 46,03           | 23,05           | 44,06           | 45,71           | 0,050            | 0,714            | 3,826           | 0,300           | 5362       | 5739       |
| <i>T45-ac10</i>    | 46,04           | 21,96           | 43,65           | 45,70           | 0,053            | 0,714            | 4,067           | 0,299           | 5657       | 5734       |
| <i>T50-ac1</i>     | 50,06           | 21,03           | 48,92           | 50,00           | 0,010            | 0,708            | 0,290           | 0,300           | 1029       | 6304       |
| <i>T50-ac2</i>     | 50,03           | 21,46           | 48,88           | 49,92           | 0,014            | 0,708            | 0,611           | 0,300           | 1531       | 6299       |
| <i>T50-ac3</i>     | 49,86           | 21,89           | 48,63           | 49,71           | 0,021            | 0,708            | 1,092           | 0,298           | 2187       | 6299       |
| <i>T50-ac4</i>     | 49,80           | 22,05           | 48,42           | 49,61           | 0,026            | 0,709            | 1,535           | 0,298           | 2724       | 6305       |
| <i>T50-ac5</i>     | 49,84           | 22,05           | 48,32           | 49,61           | 0,030            | 0,710            | 1,997           | 0,300           | 3246       | 6323       |
| <i>T50-ac6</i>     | 49,91           | 21,79           | 48,24           | 49,64           | 0,035            | 0,711            | 2,395           | 0,298           | 3684       | 6324       |
| <i>T50-ac7</i>     | 50,01           | 21,40           | 48,18           | 49,71           | 0,039            | 0,712            | 2,802           | 0,299           | 4169       | 6334       |
| <i>T50-ac8</i>     | 50,08           | 20,83           | 47,99           | 49,73           | 0,045            | 0,711            | 3,341           | 0,298           | 4763       | 6328       |
| <i>T50-ac9</i>     | 50,14           | 19,98           | 47,67           | 49,71           | 0,052            | 0,710            | 4,052           | 0,295           | 5567       | 6319       |
| <i>T50-ac10</i>    | 50,02           | 18,76           | 46,96           | 49,59           | 0,054            | 0,711            | 4,186           | 0,299           | 5759       | 6332       |
| <i>T55-ac1</i>     | 54,85           | 22,25           | 53,56           | 54,76           | 0,010            | 0,704            | 0,308           | 0,298           | 1030       | 6694       |
| <i>T55-ac2</i>     | 54,93           | 22,57           | 53,62           | 54,80           | 0,014            | 0,706            | 0,647           | 0,299           | 1544       | 6710       |
| <i>T55-ac3</i>     | 54,99           | 22,84           | 53,49           | 54,80           | 0,021            | 0,705            | 1,187           | 0,298           | 2277       | 6702       |
| <i>T55-ac4</i>     | 55,09           | 23,07           | 53,44           | 54,85           | 0,026            | 0,705            | 1,599           | 0,299           | 2772       | 6706       |
| <i>T55-ac5</i>     | 55,07           | 23,08           | 53,27           | 54,80           | 0,030            | 0,708            | 1,973           | 0,299           | 3177       | 6727       |
| <i>T55-ac6</i>     | 54,87           | 22,96           | 52,98           | 54,58           | 0,033            | 0,706            | 2,313           | 0,298           | 3570       | 6715       |
| <i>T55-ac7</i>     | 54,72           | 22,54           | 52,58           | 54,35           | 0,041            | 0,706            | 3,020           | 0,298           | 4341       | 6713       |
| <i>T55-ac8</i>     | 54,72           | 21,95           | 52,45           | 54,32           | 0,045            | 0,707            | 3,427           | 0,297           | 4777       | 6724       |

|                 |       |       |       |       |       |       |       |       |      |      |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| <i>T55-ac9</i>  | 54,88 | 20,42 | 52,13 | 54,38 | 0,052 | 0,707 | 4,083 | 0,295 | 5504 | 6720 |
| <i>T55-ac10</i> | 54,90 | 19,38 | 51,73 | 54,37 | 0,055 | 0,706 | 4,325 | 0,294 | 5829 | 6709 |
| <i>T60-ac1</i>  | 59,85 | 23,90 | 58,39 | 59,75 | 0,010 | 0,701 | 0,355 | 0,297 | 1105 | 7198 |
| <i>T60-ac2</i>  | 59,91 | 24,16 | 58,36 | 59,74 | 0,016 | 0,700 | 0,755 | 0,298 | 1683 | 7194 |
| <i>T60-ac3</i>  | 59,98 | 24,47 | 58,40 | 59,78 | 0,020 | 0,700 | 1,069 | 0,296 | 2089 | 7189 |
| <i>T60-ac4</i>  | 60,05 | 24,68 | 58,24 | 59,80 | 0,025 | 0,701 | 1,546 | 0,296 | 2662 | 7201 |
| <i>T60-ac5</i>  | 60,11 | 24,82 | 58,13 | 59,81 | 0,029 | 0,703 | 1,948 | 0,295 | 3111 | 7218 |
| <i>T60-ac6</i>  | 60,20 | 24,74 | 58,01 | 59,84 | 0,036 | 0,703 | 2,558 | 0,295 | 3790 | 7218 |
| <i>T60-ac7</i>  | 60,31 | 24,28 | 57,90 | 59,89 | 0,040 | 0,700 | 3,015 | 0,292 | 4287 | 7191 |
| <i>T60-ac8</i>  | 60,38 | 23,73 | 57,67 | 59,91 | 0,046 | 0,702 | 3,565 | 0,293 | 4872 | 7211 |
| <i>T60-ac9</i>  | 60,48 | 22,37 | 57,37 | 59,94 | 0,051 | 0,701 | 3,974 | 0,293 | 5392 | 7199 |
| <i>T60-ac10</i> | 60,50 | 21,33 | 56,71 | 59,91 | 0,054 | 0,700 | 4,244 | 0,295 | 5746 | 7194 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela K2 – Parâmetros de saída dos experimentos no núcleo considerando ar no ramal complexo – experimental e numérico

| Experimento     | q <sub>c</sub><br>[kW] | u(q <sub>c</sub> )<br>[kW] | q <sub>cnum</sub><br>[kW] | difnum<br>[%] | UA<br>[kW/°C] | u(UA)<br>[kW/°C] | UAnum<br>[kW/°C] | q <sub>max</sub><br>[kW] | ε     | ε <sub>num</sub> |
|-----------------|------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------|---------------|------------------|------------------|--------------------------|-------|------------------|
| <i>T40-ac1</i>  | 0,150                  | 0,0053                     | 0,156                     | <b>4,2</b>    | 0,0275        | 0,0061           | 0,0453           | 0,157                    | 0,953 | 0,993            |
| <i>T40-ac2</i>  | 0,236                  | 0,0086                     | 0,241                     | <b>2,0</b>    | 0,0442        | 0,0099           | 0,0519           | 0,248                    | 0,953 | 0,972            |
| <i>T40-ac3</i>  | 0,318                  | 0,0118                     | 0,315                     | <b>0,9</b>    | 0,0596        | 0,0130           | 0,0566           | 0,335                    | 0,950 | 0,942            |
| <i>T40-ac4</i>  | 0,380                  | 0,0142                     | 0,371                     | <b>2,6</b>    | 0,0691        | 0,0137           | 0,0605           | 0,403                    | 0,944 | 0,919            |
| <i>T40-ac5</i>  | 0,459                  | 0,0173                     | 0,437                     | <b>4,9</b>    | 0,0832        | 0,0162           | 0,0663           | 0,488                    | 0,941 | 0,896            |
| <i>T40-ac6</i>  | 0,543                  | 0,0205                     | 0,508                     | <b>6,4</b>    | 0,0958        | 0,0175           | 0,0727           | 0,579                    | 0,936 | 0,876            |
| <i>T40-ac7</i>  | 0,644                  | 0,0230                     | 0,598                     | <b>7,2</b>    | 0,1048        | 0,0170           | 0,0782           | 0,692                    | 0,931 | 0,864            |
| <i>T40-ac8</i>  | 0,750                  | 0,0258                     | 0,689                     | <b>8,2</b>    | 0,1143        | 0,0167           | 0,0835           | 0,812                    | 0,924 | 0,848            |
| <i>T40-ac9</i>  | 0,916                  | 0,0302                     | 0,837                     | <b>8,7</b>    | 0,1287        | 0,0165           | 0,0941           | 1,001                    | 0,916 | 0,836            |
| <i>T40-ac10</i> | 0,976                  | 0,0316                     | 0,900                     | <b>7,7</b>    | 0,1264        | 0,0140           | 0,0973           | 1,083                    | 0,901 | 0,831            |
| <i>T45-ac1</i>  | 0,213                  | 0,0062                     | 0,223                     | <b>4,5</b>    | 0,0299        | 0,0050           | 0,0470           | 0,225                    | 0,947 | 0,990            |
| <i>T45-ac2</i>  | 0,311                  | 0,0092                     | 0,318                     | <b>2,4</b>    | 0,0443        | 0,0074           | 0,0527           | 0,329                    | 0,946 | 0,969            |
| <i>T45-ac3</i>  | 0,391                  | 0,0119                     | 0,390                     | <b>0,3</b>    | 0,0573        | 0,0099           | 0,0564           | 0,413                    | 0,947 | 0,944            |
| <i>T45-ac4</i>  | 0,507                  | 0,0157                     | 0,489                     | <b>3,4</b>    | 0,0739        | 0,0122           | 0,0624           | 0,537                    | 0,943 | 0,911            |
| <i>T45-ac5</i>  | 0,611                  | 0,0192                     | 0,580                     | <b>5,2</b>    | 0,0865        | 0,0131           | 0,0689           | 0,653                    | 0,935 | 0,887            |
| <i>T45-ac6</i>  | 0,687                  | 0,0216                     | 0,642                     | <b>6,5</b>    | 0,0971        | 0,0147           | 0,0738           | 0,735                    | 0,935 | 0,874            |
| <i>T45-ac7</i>  | 0,790                  | 0,0246                     | 0,738                     | <b>6,6</b>    | 0,1074        | 0,0150           | 0,0820           | 0,851                    | 0,929 | 0,867            |
| <i>T45-ac8</i>  | 0,974                  | 0,0296                     | 0,882                     | <b>9,4</b>    | 0,1243        | 0,0155           | 0,0881           | 1,059                    | 0,920 | 0,833            |
| <i>T45-ac9</i>  | 1,063                  | 0,0306                     | 0,974                     | <b>8,3</b>    | 0,1256        | 0,0140           | 0,0930           | 1,163                    | 0,914 | 0,838            |
| <i>T45-ac10</i> | 1,158                  | 0,0321                     | 1,071                     | <b>7,5</b>    | 0,1245        | 0,0119           | 0,0965           | 1,286                    | 0,901 | 0,833            |
| <i>T50-ac1</i>  | 0,271                  | 0,0060                     | 0,279                     | <b>3,2</b>    | 0,0314        | 0,0052           | 0,0465           | 0,282                    | 0,961 | 0,992            |
| <i>T50-ac2</i>  | 0,396                  | 0,0089                     | 0,401                     | <b>1,3</b>    | 0,0465        | 0,0076           | 0,0520           | 0,413                    | 0,960 | 0,972            |
| <i>T50-ac3</i>  | 0,552                  | 0,0127                     | 0,541                     | <b>1,9</b>    | 0,0646        | 0,0101           | 0,0575           | 0,577                    | 0,956 | 0,938            |
| <i>T50-ac4</i>  | 0,678                  | 0,0158                     | 0,650                     | <b>4,1</b>    | 0,0776        | 0,0111           | 0,0625           | 0,713                    | 0,950 | 0,911            |
| <i>T50-ac5</i>  | 0,805                  | 0,0188                     | 0,758                     | <b>5,8</b>    | 0,0895        | 0,0119           | 0,0682           | 0,851                    | 0,945 | 0,891            |
| <i>T50-ac6</i>  | 0,919                  | 0,0214                     | 0,857                     | <b>6,8</b>    | 0,0987        | 0,0122           | 0,0731           | 0,978                    | 0,940 | 0,876            |

|                 |       |        |       |            |        |        |        |       |       |       |
|-----------------|-------|--------|-------|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| <i>T50-ac7</i>  | 1,053 | 0,0241 | 0,972 | <b>7,8</b> | 0,1089 | 0,0125 | 0,0789 | 1,126 | 0,936 | 0,863 |
| <i>T50-ac8</i>  | 1,221 | 0,0275 | 1,115 | <b>8,7</b> | 0,1194 | 0,0123 | 0,0853 | 1,315 | 0,928 | 0,848 |
| <i>T50-ac9</i>  | 1,455 | 0,0320 | 1,323 | <b>9,1</b> | 0,1329 | 0,0120 | 0,0956 | 1,584 | 0,918 | 0,835 |
| <i>T50-ac10</i> | 1,533 | 0,0328 | 1,413 | <b>7,8</b> | 0,1275 | 0,0098 | 0,0978 | 1,699 | 0,902 | 0,832 |
| <i>T55-ac1</i>  | 0,304 | 0,0061 | 0,314 | <b>3,2</b> | 0,0314 | 0,0047 | 0,0465 | 0,317 | 0,960 | 0,992 |
| <i>T55-ac2</i>  | 0,452 | 0,0092 | 0,458 | <b>1,3</b> | 0,0469 | 0,0070 | 0,0522 | 0,471 | 0,960 | 0,972 |
| <i>T55-ac3</i>  | 0,658 | 0,0136 | 0,644 | <b>2,1</b> | 0,0661 | 0,0089 | 0,0583 | 0,691 | 0,953 | 0,933 |
| <i>T55-ac4</i>  | 0,795 | 0,0166 | 0,761 | <b>4,2</b> | 0,0781 | 0,0098 | 0,0630 | 0,837 | 0,949 | 0,909 |
| <i>T55-ac5</i>  | 0,905 | 0,0190 | 0,857 | <b>5,3</b> | 0,0868 | 0,0102 | 0,0675 | 0,959 | 0,944 | 0,893 |
| <i>T55-ac6</i>  | 1,011 | 0,0213 | 0,946 | <b>6,5</b> | 0,0957 | 0,0108 | 0,0719 | 1,075 | 0,941 | 0,880 |
| <i>T55-ac7</i>  | 1,231 | 0,0258 | 1,133 | <b>7,9</b> | 0,1120 | 0,0115 | 0,0810 | 1,318 | 0,934 | 0,859 |
| <i>T55-ac8</i>  | 1,375 | 0,0283 | 1,255 | <b>8,7</b> | 0,1212 | 0,0118 | 0,0862 | 1,477 | 0,930 | 0,850 |
| <i>T55-ac9</i>  | 1,647 | 0,0324 | 1,496 | <b>9,1</b> | 0,1326 | 0,0111 | 0,0948 | 1,790 | 0,920 | 0,836 |
| <i>T55-ac10</i> | 1,780 | 0,0341 | 1,622 | <b>8,8</b> | 0,1344 | 0,0101 | 0,0986 | 1,954 | 0,911 | 0,830 |
| <i>T60-ac1</i>  | 0,360 | 0,0068 | 0,371 | <b>3,1</b> | 0,0335 | 0,0047 | 0,0475 | 0,375 | 0,959 | 0,989 |
| <i>T60-ac2</i>  | 0,543 | 0,0104 | 0,548 | <b>0,9</b> | 0,0501 | 0,0067 | 0,0535 | 0,568 | 0,957 | 0,965 |
| <i>T60-ac3</i>  | 0,669 | 0,0129 | 0,660 | <b>1,3</b> | 0,0616 | 0,0081 | 0,0568 | 0,700 | 0,956 | 0,943 |
| <i>T60-ac4</i>  | 0,843 | 0,0164 | 0,812 | <b>3,7</b> | 0,0751 | 0,0089 | 0,0619 | 0,889 | 0,949 | 0,914 |
| <i>T60-ac5</i>  | 0,978 | 0,0192 | 0,928 | <b>5,1</b> | 0,0850 | 0,0094 | 0,0667 | 1,036 | 0,944 | 0,895 |
| <i>T60-ac6</i>  | 1,190 | 0,0233 | 1,108 | <b>6,9</b> | 0,1003 | 0,0103 | 0,0745 | 1,268 | 0,938 | 0,874 |
| <i>T60-ac7</i>  | 1,360 | 0,0263 | 1,254 | <b>7,8</b> | 0,1105 | 0,0105 | 0,0804 | 1,457 | 0,933 | 0,861 |
| <i>T60-ac8</i>  | 1,561 | 0,0298 | 1,429 | <b>8,4</b> | 0,1209 | 0,0105 | 0,0874 | 1,685 | 0,926 | 0,848 |
| <i>T60-ac9</i>  | 1,780 | 0,0328 | 1,625 | <b>8,7</b> | 0,1287 | 0,0100 | 0,0935 | 1,939 | 0,918 | 0,838 |
| <i>T60-ac10</i> | 1,918 | 0,0347 | 1,767 | <b>7,9</b> | 0,1280 | 0,0085 | 0,0977 | 2,124 | 0,903 | 0,832 |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE L – Compilado dos experimentos com água quente no ramal complexo e  
água fria no ramal reto**

Tabela L1 – Dados adquiridos nos experimentos com água quente no ramal complexo e fria  
no reto para  $T_h = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Experimento        | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh  |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|------|
| <i>aqc1-afri1</i>  | 62,40    | 17,27    | 25,89    | 56,84    | 0,27      | 0,41      | 0,01     | 0,02     | 1449 | 1815 |
| <i>aqc2-afri1</i>  | 62,60    | 17,51    | 26,25    | 57,38    | 0,27      | 0,45      | 0,01     | 0,04     | 1458 | 1965 |
| <i>aqc3-afri1</i>  | 62,99    | 17,67    | 26,62    | 58,16    | 0,27      | 0,49      | 0,01     | 0,06     | 1461 | 2194 |
| <i>aqc4-afri1</i>  | 63,65    | 17,85    | 27,11    | 59,26    | 0,27      | 0,55      | 0,01     | 0,09     | 1481 | 2495 |
| <i>aqc5-afri1</i>  | 64,17    | 18,01    | 27,71    | 60,64    | 0,27      | 0,73      | 0,01     | 0,19     | 1491 | 3315 |
| <i>aqc6-afri1</i>  | 64,74    | 18,09    | 28,11    | 61,60    | 0,27      | 0,84      | 0,01     | 0,28     | 1498 | 3885 |
| <i>aqc7-afri1</i>  | 64,75    | 18,10    | 28,25    | 61,93    | 0,27      | 0,95      | 0,01     | 0,37     | 1505 | 4394 |
| <i>aqc8-afri1</i>  | 64,71    | 18,20    | 28,46    | 62,25    | 0,26      | 1,06      | 0,00     | 0,47     | 1470 | 4934 |
| <i>aqc9-afri1</i>  | 64,78    | 18,23    | 28,61    | 62,58    | 0,26      | 1,19      | 0,00     | 0,60     | 1458 | 5521 |
| <i>aqc10-afri1</i> | 64,89    | 18,17    | 28,68    | 62,87    | 0,26      | 1,31      | 0,00     | 0,73     | 1457 | 6097 |
| <i>aqc11-afri1</i> | 64,84    | 18,30    | 28,85    | 62,99    | 0,26      | 1,42      | 0,00     | 0,87     | 1459 | 6643 |
| <i>aqc12-afri1</i> | 64,90    | 18,23    | 28,85    | 63,15    | 0,26      | 1,52      | 0,00     | 1,00     | 1460 | 7097 |
| <i>aqc13-afri1</i> | 64,83    | 18,26    | 28,94    | 63,22    | 0,26      | 1,64      | 0,00     | 1,17     | 1462 | 7690 |
| <i>aqc1-afri2</i>  | 63,74    | 18,29    | 26,61    | 57,16    | 0,32      | 0,40      | 0,04     | 0,02     | 1754 | 1791 |
| <i>aqc2-afri2</i>  | 63,83    | 18,36    | 26,87    | 57,87    | 0,32      | 0,45      | 0,04     | 0,05     | 1762 | 2026 |
| <i>aqc3-afri2</i>  | 63,80    | 18,28    | 26,93    | 58,23    | 0,32      | 0,50      | 0,04     | 0,06     | 1760 | 2215 |
| <i>aqc4-afri2</i>  | 64,05    | 18,37    | 27,21    | 58,96    | 0,32      | 0,55      | 0,04     | 0,09     | 1764 | 2497 |
| <i>aqc5-afri2</i>  | 64,07    | 18,36    | 27,60    | 60,07    | 0,32      | 0,74      | 0,04     | 0,21     | 1776 | 3347 |
| <i>aqc6-afri2</i>  | 64,08    | 18,32    | 27,72    | 60,54    | 0,32      | 0,84      | 0,04     | 0,29     | 1777 | 3850 |
| <i>aqc7-afri2</i>  | 63,83    | 18,34    | 27,83    | 60,71    | 0,32      | 0,96      | 0,04     | 0,39     | 1782 | 4375 |
| <i>aqc8-afri2</i>  | 63,34    | 18,36    | 27,85    | 60,58    | 0,32      | 1,09      | 0,04     | 0,51     | 1781 | 4932 |
| <i>aqc9-afri2</i>  | 62,99    | 18,43    | 27,94    | 60,56    | 0,32      | 1,22      | 0,04     | 0,65     | 1787 | 5535 |
| <i>aqc10-afri2</i> | 62,78    | 18,49    | 28,03    | 60,56    | 0,32      | 1,34      | 0,04     | 0,80     | 1791 | 6065 |
| <i>aqc11-afri2</i> | 62,46    | 18,55    | 28,08    | 60,43    | 0,32      | 1,46      | 0,04     | 0,95     | 1795 | 6583 |
| <i>aqc12-afri2</i> | 62,29    | 18,63    | 28,17    | 60,42    | 0,32      | 1,59      | 0,04     | 1,13     | 1794 | 7132 |
| <i>aqc13-afri2</i> | 62,15    | 18,72    | 28,25    | 60,41    | 0,32      | 1,70      | 0,04     | 1,29     | 1795 | 7650 |
| <i>aqc1-afri3</i>  | 62,22    | 18,28    | 25,80    | 55,48    | 0,38      | 0,41      | 0,07     | 0,02     | 2020 | 1774 |
| <i>aqc2-afri3</i>  | 62,14    | 18,30    | 25,97    | 56,05    | 0,38      | 0,46      | 0,07     | 0,05     | 2030 | 2007 |
| <i>aqc3-afri3</i>  | 62,16    | 18,47    | 26,23    | 56,37    | 0,38      | 0,50      | 0,07     | 0,06     | 2040 | 2171 |
| <i>aqc4-afri3</i>  | 62,30    | 18,47    | 26,43    | 57,02    | 0,38      | 0,56      | 0,07     | 0,09     | 2046 | 2449 |
| <i>aqc5-afri3</i>  | 62,22    | 18,50    | 26,82    | 58,10    | 0,38      | 0,75      | 0,07     | 0,21     | 2050 | 3299 |
| <i>aqc6-afri3</i>  | 62,38    | 18,56    | 27,05    | 58,70    | 0,38      | 0,86      | 0,07     | 0,29     | 2065 | 3821 |
| <i>aqc7-afri3</i>  | 62,35    | 18,70    | 27,30    | 59,09    | 0,38      | 0,97      | 0,07     | 0,39     | 2068 | 4314 |
| <i>aqc8-afri3</i>  | 62,12    | 18,83    | 27,48    | 59,24    | 0,38      | 1,11      | 0,07     | 0,53     | 2081 | 4921 |
| <i>aqc9-afri3</i>  | 61,98    | 18,93    | 27,63    | 59,42    | 0,38      | 1,24      | 0,07     | 0,68     | 2082 | 5521 |
| <i>aqc10-afri3</i> | 61,51    | 19,06    | 27,73    | 59,21    | 0,37      | 1,37      | 0,07     | 0,83     | 2085 | 6065 |
| <i>aqc11-afri3</i> | 61,18    | 19,26    | 27,88    | 59,06    | 0,38      | 1,49      | 0,07     | 0,97     | 2097 | 6557 |
| <i>aqc12-afri3</i> | 60,97    | 19,37    | 28,00    | 59,02    | 0,38      | 1,60      | 0,07     | 1,15     | 2103 | 7069 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| <i>aqc13-afr3</i> | 60,74 | 19,46 | 28,08 | 58,92 | 0,38 | 1,71 | 0,07 | 1,29 | 2107 | 7501 |
| <i>aqc1-afr4</i>  | 57,37 | 18,41 | 24,64 | 51,32 | 0,44 | 0,45 | 0,10 | 0,03 | 2325 | 1799 |
| <i>aqc2-afr4</i>  | 57,52 | 18,46 | 24,84 | 51,90 | 0,44 | 0,49 | 0,10 | 0,06 | 2332 | 1985 |
| <i>aqc3-afr4</i>  | 57,54 | 18,59 | 25,06 | 52,30 | 0,44 | 0,53 | 0,10 | 0,08 | 2345 | 2172 |
| <i>aqc4-afr4</i>  | 57,10 | 18,45 | 25,03 | 52,49 | 0,44 | 0,62 | 0,10 | 0,12 | 2344 | 2511 |
| <i>aqc5-afr4</i>  | 57,00 | 18,38 | 25,26 | 53,35 | 0,44 | 0,81 | 0,10 | 0,24 | 2344 | 3300 |
| <i>aqc6-afr4</i>  | 57,17 | 18,35 | 25,41 | 53,96 | 0,44 | 0,94 | 0,10 | 0,35 | 2346 | 3861 |
| <i>aqc7-afr4</i>  | 57,09 | 18,49 | 25,62 | 54,22 | 0,44 | 1,06 | 0,10 | 0,46 | 2356 | 4383 |
| <i>aqc8-afr4</i>  | 56,98 | 18,68 | 25,85 | 54,43 | 0,44 | 1,19 | 0,10 | 0,60 | 2374 | 4928 |
| <i>aqc9-afr4</i>  | 57,00 | 18,84 | 26,07 | 54,69 | 0,44 | 1,32 | 0,10 | 0,75 | 2373 | 5472 |
| <i>aqc10-afr4</i> | 57,03 | 19,01 | 26,28 | 54,92 | 0,44 | 1,46 | 0,10 | 0,92 | 2386 | 6034 |
| <i>aqc11-afr4</i> | 57,16 | 19,18 | 26,49 | 55,21 | 0,44 | 1,58 | 0,10 | 1,10 | 2397 | 6568 |
| <i>aqc12-afr4</i> | 57,19 | 19,28 | 26,64 | 55,40 | 0,44 | 1,71 | 0,10 | 1,28 | 2407 | 7107 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela L2 – Dados adquiridos nos experimentos com água quente no ramal complexo e fria no reto para  $T_h = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Experimento       | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh  |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|------|
| <i>aqc1-afr1</i>  | 51,84    | 17,80    | 24,17    | 48,26    | 0,27      | 0,46      | 0,01     | 0,05     | 1434 | 1752 |
| <i>aqc2-afr1</i>  | 52,25    | 17,80    | 24,38    | 49,00    | 0,27      | 0,52      | 0,01     | 0,08     | 1435 | 1999 |
| <i>aqc3-afr1</i>  | 52,33    | 17,83    | 24,51    | 49,35    | 0,27      | 0,58      | 0,01     | 0,11     | 1436 | 2232 |
| <i>aqc4-afr1</i>  | 52,23    | 17,83    | 24,61    | 49,55    | 0,27      | 0,65      | 0,01     | 0,15     | 1436 | 2505 |
| <i>aqc5-afr1</i>  | 52,11    | 17,84    | 24,82    | 50,01    | 0,27      | 0,86      | 0,01     | 0,29     | 1445 | 3293 |
| <i>aqc6-afr1</i>  | 52,06    | 17,90    | 24,98    | 50,24    | 0,27      | 1,00      | 0,01     | 0,41     | 1448 | 3841 |
| <i>aqc7-afr1</i>  | 51,95    | 17,91    | 25,06    | 50,34    | 0,27      | 1,14      | 0,01     | 0,54     | 1449 | 4382 |
| <i>aqc8-afr1</i>  | 51,99    | 17,95    | 25,18    | 50,56    | 0,27      | 1,29      | 0,01     | 0,70     | 1451 | 4967 |
| <i>aqc9-afr1</i>  | 52,13    | 17,98    | 25,29    | 50,83    | 0,27      | 1,42      | 0,01     | 0,86     | 1455 | 5489 |
| <i>aqc10-afr1</i> | 52,22    | 17,98    | 25,40    | 51,04    | 0,27      | 1,57      | 0,01     | 1,04     | 1455 | 6072 |
| <i>aqc11-afr1</i> | 52,22    | 18,00    | 25,45    | 51,12    | 0,27      | 1,70      | 0,01     | 1,23     | 1457 | 6587 |
| <i>aqc1-afr2</i>  | 51,66    | 18,06    | 24,21    | 47,33    | 0,33      | 0,46      | 0,04     | 0,05     | 1719 | 1736 |
| <i>aqc2-afr2</i>  | 52,14    | 18,08    | 24,45    | 48,16    | 0,33      | 0,53      | 0,04     | 0,08     | 1719 | 1987 |
| <i>aqc3-afr2</i>  | 52,75    | 18,05    | 24,64    | 48,99    | 0,32      | 0,58      | 0,04     | 0,11     | 1720 | 2213 |
| <i>aqc4-afr2</i>  | 52,96    | 18,05    | 24,77    | 49,52    | 0,33      | 0,65      | 0,04     | 0,15     | 1752 | 2503 |
| <i>aqc5-afr2</i>  | 52,85    | 18,13    | 25,07    | 50,16    | 0,33      | 0,85      | 0,04     | 0,30     | 1761 | 3292 |
| <i>aqc6-afr2</i>  | 52,44    | 18,17    | 25,14    | 50,15    | 0,33      | 0,99      | 0,04     | 0,41     | 1762 | 3799 |
| <i>aqc7-afr2</i>  | 51,99    | 18,16    | 25,14    | 49,99    | 0,33      | 1,13      | 0,04     | 0,55     | 1762 | 4340 |
| <i>aqc8-afr2</i>  | 51,33    | 18,20    | 25,10    | 49,58    | 0,33      | 1,28      | 0,04     | 0,72     | 1759 | 4878 |
| <i>aqc9-afr2</i>  | 51,28    | 18,18    | 25,15    | 49,72    | 0,33      | 1,43      | 0,04     | 0,90     | 1764 | 5442 |
| <i>aqc10-afr2</i> | 51,36    | 18,19    | 25,23    | 49,93    | 0,33      | 1,57      | 0,04     | 1,10     | 1762 | 5997 |
| <i>aqc11-afr2</i> | 51,52    | 18,21    | 25,36    | 50,18    | 0,33      | 1,71      | 0,04     | 1,30     | 1766 | 6538 |
| <i>aqc1-afr3</i>  | 51,36    | 18,24    | 23,87    | 46,82    | 0,39      | 0,47      | 0,08     | 0,05     | 2042 | 1763 |
| <i>aqc2-afr3</i>  | 51,48    | 18,21    | 23,98    | 47,28    | 0,39      | 0,53      | 0,08     | 0,08     | 2048 | 1970 |
| <i>aqc3-afr3</i>  | 51,48    | 18,22    | 24,09    | 47,63    | 0,39      | 0,59      | 0,08     | 0,11     | 2044 | 2195 |
| <i>aqc4-afr3</i>  | 51,42    | 18,30    | 24,28    | 48,01    | 0,39      | 0,67      | 0,08     | 0,16     | 2050 | 2512 |
| <i>aqc5-afr3</i>  | 51,40    | 18,27    | 24,48    | 48,71    | 0,39      | 0,88      | 0,08     | 0,32     | 2059 | 3310 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| <i>aqc6-afr3</i>  | 51,22 | 18,35 | 24,63 | 48,89 | 0,39 | 1,01 | 0,08 | 0,44 | 2060 | 3830 |
| <i>aqc7-afr3</i>  | 51,12 | 18,41 | 24,74 | 49,07 | 0,39 | 1,16 | 0,08 | 0,59 | 2066 | 4378 |
| <i>aqc8-afr3</i>  | 50,82 | 18,43 | 24,78 | 49,02 | 0,39 | 1,31 | 0,08 | 0,77 | 2067 | 4950 |
| <i>aqc9-afr3</i>  | 50,86 | 18,43 | 24,84 | 49,21 | 0,39 | 1,45 | 0,08 | 0,94 | 2068 | 5469 |
| <i>aqc10-afr3</i> | 51,03 | 18,45 | 24,94 | 49,51 | 0,39 | 1,58 | 0,08 | 1,13 | 2071 | 6001 |
| <i>aqc11-afr3</i> | 51,18 | 18,39 | 24,96 | 49,74 | 0,39 | 1,70 | 0,08 | 1,30 | 2072 | 6455 |
| <i>aqc1-afr4</i>  | 52,47 | 18,40 | 23,95 | 47,36 | 0,44 | 0,47 | 0,10 | 0,05 | 2323 | 1769 |
| <i>aqc2-afr4</i>  | 52,85 | 18,35 | 24,10 | 48,17 | 0,44 | 0,53 | 0,10 | 0,08 | 2324 | 2005 |
| <i>aqc3-afr4</i>  | 52,62 | 18,40 | 24,19 | 48,33 | 0,44 | 0,58 | 0,10 | 0,11 | 2323 | 2200 |
| <i>aqc4-afr4</i>  | 52,15 | 18,44 | 24,27 | 48,32 | 0,44 | 0,66 | 0,10 | 0,15 | 2329 | 2482 |
| <i>aqc5-afr4</i>  | 52,31 | 18,24 | 24,41 | 49,25 | 0,44 | 0,86 | 0,10 | 0,29 | 2327 | 3281 |
| <i>aqc6-afr4</i>  | 51,99 | 18,33 | 24,53 | 49,34 | 0,44 | 1,00 | 0,10 | 0,41 | 2338 | 3800 |
| <i>aqc7-afr4</i>  | 51,47 | 18,36 | 24,56 | 49,16 | 0,44 | 1,14 | 0,10 | 0,55 | 2335 | 4303 |
| <i>aqc8-afr4</i>  | 51,29 | 18,24 | 24,50 | 49,22 | 0,44 | 1,28 | 0,10 | 0,70 | 2331 | 4845 |
| <i>aqc9-afr4</i>  | 51,21 | 18,16 | 24,48 | 49,33 | 0,44 | 1,41 | 0,10 | 0,86 | 2328 | 5356 |
| <i>aqc10-afr4</i> | 51,23 | 18,30 | 24,65 | 49,51 | 0,44 | 1,55 | 0,10 | 1,05 | 2335 | 5898 |
| <i>aqc11-afr4</i> | 51,29 | 18,39 | 24,78 | 49,71 | 0,44 | 1,68 | 0,10 | 1,24 | 2337 | 6402 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela L3 – Dados adquiridos nos experimentos com água quente no ramal complexo e fria no reto para  $T_h = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$

| Experimento      | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh  |
|------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|------|
| <i>aqc1-afr1</i> | 40,60    | 18,11    | 22,31    | 38,53    | 0,28      | 0,55      | 0,01     | 0,09     | 1425 | 1741 |
| <i>aqc2-afr1</i> | 40,12    | 18,04    | 22,22    | 38,33    | 0,28      | 0,63      | 0,01     | 0,13     | 1421 | 1969 |
| <i>aqc3-afr1</i> | 40,05    | 18,03    | 22,24    | 38,41    | 0,28      | 0,70      | 0,01     | 0,17     | 1417 | 2185 |
| <i>aqc4-afr1</i> | 40,03    | 18,01    | 22,29    | 38,57    | 0,28      | 0,79      | 0,01     | 0,24     | 1426 | 2487 |
| <i>aqc5-afr1</i> | 40,06    | 18,01    | 22,42    | 38,93    | 0,28      | 1,04      | 0,01     | 0,45     | 1424 | 3257 |
| <i>aqc6-afr1</i> | 40,02    | 18,03    | 22,49    | 39,05    | 0,28      | 1,21      | 0,01     | 0,63     | 1423 | 3804 |
| <i>aqc7-afr1</i> | 40,08    | 18,05    | 22,56    | 39,22    | 0,28      | 1,39      | 0,01     | 0,82     | 1427 | 4371 |
| <i>aqc8-afr1</i> | 40,19    | 18,05    | 22,62    | 39,43    | 0,28      | 1,56      | 0,01     | 1,06     | 1425 | 4925 |
| <i>aqc9-afr1</i> | 40,34    | 18,05    | 22,71    | 39,65    | 0,28      | 1,72      | 0,01     | 1,29     | 1426 | 5468 |
| <i>aqc1-afr2</i> | 39,43    | 17,71    | 21,47    | 37,26    | 0,34      | 0,57      | 0,05     | 0,10     | 1730 | 1748 |
| <i>aqc2-afr2</i> | 39,79    | 17,63    | 21,53    | 37,77    | 0,34      | 0,64      | 0,05     | 0,14     | 1745 | 1989 |
| <i>aqc3-afr2</i> | 39,82    | 17,65    | 21,62    | 37,98    | 0,34      | 0,71      | 0,05     | 0,18     | 1742 | 2203 |
| <i>aqc4-afr2</i> | 39,79    | 17,68    | 21,72    | 38,19    | 0,34      | 0,81      | 0,05     | 0,25     | 1749 | 2516 |
| <i>aqc5-afr2</i> | 39,77    | 17,70    | 21,86    | 38,51    | 0,34      | 1,05      | 0,05     | 0,47     | 1750 | 3291 |
| <i>aqc6-afr2</i> | 39,69    | 17,74    | 21,94    | 38,61    | 0,34      | 1,23      | 0,05     | 0,65     | 1757 | 3835 |
| <i>aqc7-afr2</i> | 39,70    | 17,76    | 22,01    | 38,75    | 0,34      | 1,41      | 0,05     | 0,87     | 1760 | 4399 |
| <i>aqc8-afr2</i> | 39,74    | 17,76    | 22,06    | 38,90    | 0,34      | 1,58      | 0,05     | 1,10     | 1758 | 4933 |
| <i>aqc9-afr2</i> | 39,78    | 17,76    | 22,10    | 39,01    | 0,34      | 1,71      | 0,05     | 1,31     | 1760 | 5359 |
| <i>aqc1-afr3</i> | 42,49    | 17,82    | 21,92    | 39,64    | 0,40      | 0,55      | 0,08     | 0,08     | 2036 | 1766 |
| <i>aqc2-afr3</i> | 41,69    | 17,82    | 21,86    | 39,22    | 0,40      | 0,62      | 0,08     | 0,12     | 2034 | 1982 |
| <i>aqc3-afr3</i> | 40,86    | 17,81    | 21,78    | 38,73    | 0,40      | 0,70      | 0,08     | 0,17     | 2030 | 2210 |
| <i>aqc4-afr3</i> | 40,57    | 17,80    | 21,80    | 38,70    | 0,40      | 0,80      | 0,08     | 0,24     | 2033 | 2520 |
| <i>aqc5-afr3</i> | 40,61    | 17,82    | 21,95    | 39,15    | 0,40      | 1,05      | 0,08     | 0,46     | 2035 | 3329 |

|                  |       |       |       |       |      |      |      |      |      |      |
|------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| <i>aqc6-afr3</i> | 40,81 | 17,85 | 22,09 | 39,52 | 0,40 | 1,22 | 0,08 | 0,63 | 2041 | 3865 |
| <i>aqc7-afr3</i> | 41,03 | 17,86 | 22,20 | 39,88 | 0,40 | 1,38 | 0,08 | 0,83 | 2042 | 4428 |
| <i>aqc8-afr3</i> | 41,19 | 17,91 | 22,31 | 40,15 | 0,40 | 1,54 | 0,08 | 1,05 | 2055 | 4958 |
| <i>aqc9-afr3</i> | 41,23 | 17,93 | 22,39 | 40,30 | 0,40 | 1,71 | 0,08 | 1,30 | 2052 | 5513 |
| <i>aqc1-afr4</i> | 40,61 | 18,64 | 22,29 | 37,85 | 0,45 | 0,57 | 0,11 | 0,09 | 2330 | 1783 |
| <i>aqc2-afr4</i> | 40,65 | 18,58 | 22,32 | 38,10 | 0,45 | 0,64 | 0,11 | 0,13 | 2327 | 2014 |
| <i>aqc3-afr4</i> | 40,42 | 18,62 | 22,38 | 38,10 | 0,45 | 0,71 | 0,11 | 0,17 | 2323 | 2210 |
| <i>aqc4-afr4</i> | 40,36 | 18,61 | 22,45 | 38,31 | 0,45 | 0,81 | 0,11 | 0,23 | 2325 | 2537 |
| <i>aqc5-afr4</i> | 40,29 | 18,64 | 22,62 | 38,66 | 0,45 | 1,06 | 0,11 | 0,43 | 2328 | 3317 |
| <i>aqc6-afr4</i> | 40,14 | 18,66 | 22,68 | 38,74 | 0,45 | 1,23 | 0,11 | 0,60 | 2332 | 3874 |
| <i>aqc7-afr4</i> | 40,18 | 18,70 | 22,77 | 38,94 | 0,45 | 1,41 | 0,11 | 0,79 | 2339 | 4448 |
| <i>aqc8-afr4</i> | 40,28 | 18,69 | 22,79 | 39,17 | 0,45 | 1,57 | 0,11 | 1,01 | 2344 | 4965 |
| <i>aqc9-afr4</i> | 40,43 | 18,70 | 22,82 | 39,43 | 0,45 | 1,73 | 0,11 | 1,27 | 2342 | 5482 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela L4 – Resultados dos experimentos água quente no ramal complexo e fria no reto para

$$T_h = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento       | qh [kW] | qc [kW] | u(qh) [kW] | u(qc) [kW] | Uh [kW/°C] | Uac [kW/°C] | u(UAc) [kW/°C] | u(UAh) [kW/°C] |
|-------------------|---------|---------|------------|------------|------------|-------------|----------------|----------------|
| <i>aqc1-afr1</i>  | 9,62    | 9,81    | 1,29       | 0,62       | 0,253      | 0,258       | 0,017          | 0,034          |
| <i>aqc2-afr1</i>  | 9,73    | 9,94    | 1,40       | 0,62       | 0,256      | 0,261       | 0,017          | 0,037          |
| <i>aqc3-afr1</i>  | 9,98    | 10,14   | 1,55       | 0,62       | 0,260      | 0,264       | 0,016          | 0,041          |
| <i>aqc4-afr1</i>  | 10,19   | 10,54   | 1,75       | 0,62       | 0,262      | 0,271       | 0,016          | 0,045          |
| <i>aqc5-afr1</i>  | 10,75   | 11,02   | 2,31       | 0,63       | 0,272      | 0,279       | 0,016          | 0,059          |
| <i>aqc6-afr1</i>  | 11,06   | 11,37   | 2,70       | 0,63       | 0,277      | 0,284       | 0,016          | 0,068          |
| <i>aqc7-afr1</i>  | 11,20   | 11,54   | 3,04       | 0,63       | 0,280      | 0,288       | 0,016          | 0,076          |
| <i>aqc8-afr1</i>  | 10,95   | 11,35   | 3,41       | 0,61       | 0,274      | 0,284       | 0,016          | 0,085          |
| <i>aqc9-afr1</i>  | 10,94   | 11,37   | 3,82       | 0,61       | 0,273      | 0,283       | 0,016          | 0,095          |
| <i>aqc10-afr1</i> | 11,02   | 11,51   | 4,21       | 0,61       | 0,273      | 0,285       | 0,015          | 0,104          |
| <i>aqc11-afr1</i> | 11,02   | 11,53   | 4,58       | 0,61       | 0,274      | 0,287       | 0,016          | 0,114          |
| <i>aqc12-afr1</i> | 11,08   | 11,62   | 4,89       | 0,61       | 0,275      | 0,288       | 0,015          | 0,121          |
| <i>aqc13-afr1</i> | 11,05   | 11,68   | 5,30       | 0,61       | 0,275      | 0,290       | 0,016          | 0,132          |
| <i>aqc1-afr2</i>  | 11,10   | 11,22   | 1,27       | 0,74       | 0,292      | 0,295       | 0,020          | 0,034          |
| <i>aqc2-afr2</i>  | 11,34   | 11,49   | 1,43       | 0,74       | 0,297      | 0,301       | 0,020          | 0,038          |
| <i>aqc3-afr2</i>  | 11,53   | 11,66   | 1,56       | 0,74       | 0,300      | 0,304       | 0,020          | 0,041          |
| <i>aqc4-afr2</i>  | 11,80   | 11,91   | 1,75       | 0,74       | 0,305      | 0,308       | 0,019          | 0,046          |
| <i>aqc5-afr2</i>  | 12,30   | 12,46   | 2,34       | 0,74       | 0,315      | 0,319       | 0,019          | 0,060          |
| <i>aqc6-afr2</i>  | 12,50   | 12,68   | 2,69       | 0,74       | 0,319      | 0,323       | 0,019          | 0,069          |
| <i>aqc7-afr2</i>  | 12,54   | 12,82   | 3,06       | 0,75       | 0,321      | 0,328       | 0,019          | 0,078          |
| <i>aqc8-afr2</i>  | 12,54   | 12,79   | 3,45       | 0,75       | 0,324      | 0,330       | 0,020          | 0,089          |
| <i>aqc9-afr2</i>  | 12,45   | 12,85   | 3,88       | 0,75       | 0,324      | 0,334       | 0,020          | 0,101          |
| <i>aqc10-afr2</i> | 12,45   | 12,89   | 4,26       | 0,75       | 0,325      | 0,337       | 0,020          | 0,111          |
| <i>aqc11-afr2</i> | 12,44   | 12,88   | 4,63       | 0,75       | 0,327      | 0,339       | 0,020          | 0,122          |
| <i>aqc12-afr2</i> | 12,39   | 12,87   | 5,02       | 0,75       | 0,328      | 0,340       | 0,020          | 0,133          |
| <i>aqc13-afr2</i> | 12,39   | 12,84   | 5,38       | 0,75       | 0,329      | 0,341       | 0,020          | 0,143          |
| <i>aqc1-afr3</i>  | 11,56   | 11,79   | 1,27       | 0,85       | 0,314      | 0,320       | 0,024          | 0,035          |

|                  |       |       |      |      |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <i>aqc2-af3</i>  | 11,76 | 12,06 | 1,44 | 0,86 | 0,318 | 0,326 | 0,024 | 0,039 |
| <i>aqc3-af3</i>  | 12,05 | 12,22 | 1,55 | 0,86 | 0,327 | 0,331 | 0,024 | 0,042 |
| <i>aqc4-af3</i>  | 12,35 | 12,52 | 1,74 | 0,86 | 0,332 | 0,336 | 0,023 | 0,047 |
| <i>aqc5-af3</i>  | 12,88 | 13,05 | 2,34 | 0,86 | 0,344 | 0,348 | 0,023 | 0,063 |
| <i>aqc6-af3</i>  | 13,26 | 13,36 | 2,70 | 0,86 | 0,352 | 0,355 | 0,023 | 0,072 |
| <i>aqc7-af3</i>  | 13,21 | 13,50 | 3,05 | 0,86 | 0,351 | 0,359 | 0,023 | 0,081 |
| <i>aqc8-af3</i>  | 13,33 | 13,62 | 3,48 | 0,87 | 0,356 | 0,364 | 0,024 | 0,093 |
| <i>aqc9-af3</i>  | 13,28 | 13,66 | 3,90 | 0,87 | 0,356 | 0,366 | 0,024 | 0,105 |
| <i>aqc10-af3</i> | 13,19 | 13,58 | 4,30 | 0,87 | 0,358 | 0,368 | 0,024 | 0,117 |
| <i>aqc11-af3</i> | 13,19 | 13,54 | 4,65 | 0,87 | 0,362 | 0,372 | 0,024 | 0,128 |
| <i>aqc12-af3</i> | 13,11 | 13,55 | 5,02 | 0,87 | 0,362 | 0,374 | 0,025 | 0,139 |
| <i>aqc13-af3</i> | 13,03 | 13,53 | 5,34 | 0,87 | 0,363 | 0,376 | 0,025 | 0,148 |
| <i>aqc1-af4</i>  | 11,26 | 11,39 | 1,34 | 0,99 | 0,343 | 0,347 | 0,030 | 0,041 |
| <i>aqc2-af4</i>  | 11,47 | 11,67 | 1,47 | 0,99 | 0,347 | 0,353 | 0,030 | 0,045 |
| <i>aqc3-af4</i>  | 11,68 | 11,85 | 1,61 | 0,99 | 0,353 | 0,358 | 0,030 | 0,049 |
| <i>aqc4-af4</i>  | 11,88 | 12,07 | 1,86 | 0,99 | 0,360 | 0,365 | 0,030 | 0,056 |
| <i>aqc5-af4</i>  | 12,30 | 12,59 | 2,43 | 0,99 | 0,369 | 0,378 | 0,030 | 0,073 |
| <i>aqc6-af4</i>  | 12,60 | 12,91 | 2,84 | 0,99 | 0,374 | 0,384 | 0,030 | 0,084 |
| <i>aqc7-af4</i>  | 12,73 | 13,03 | 3,22 | 0,99 | 0,379 | 0,388 | 0,030 | 0,096 |
| <i>aqc8-af4</i>  | 12,75 | 13,15 | 3,62 | 1,00 | 0,382 | 0,394 | 0,030 | 0,108 |
| <i>aqc9-af4</i>  | 12,80 | 13,19 | 4,01 | 0,99 | 0,384 | 0,396 | 0,030 | 0,121 |
| <i>aqc10-af4</i> | 12,86 | 13,27 | 4,42 | 1,00 | 0,387 | 0,399 | 0,030 | 0,133 |
| <i>aqc11-af4</i> | 12,90 | 13,34 | 4,81 | 1,00 | 0,388 | 0,401 | 0,031 | 0,144 |
| <i>aqc12-af4</i> | 12,82 | 13,45 | 5,19 | 1,00 | 0,385 | 0,404 | 0,031 | 0,156 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela L5 – Resultados dos experimentos água quente no ramal complexo e fria no reto para

$$T_h = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento      | qh [kW] | qc [kW] | u(qh) [kW] | u(qc) [kW] | Uah [kW/°C] | Uac [kW/°C] | u(UAc) [kW/°C] | u(UAh) [kW/°C] |
|------------------|---------|---------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|----------------|
| <i>aqc1-af1</i>  | 6,94    | 7,28    | 1,35       | 0,61       | 0,239       | 0,251       | 0,021          | 0,046          |
| <i>aqc2-af1</i>  | 7,13    | 7,51    | 1,53       | 0,61       | 0,242       | 0,254       | 0,021          | 0,052          |
| <i>aqc3-af1</i>  | 7,29    | 7,62    | 1,70       | 0,61       | 0,246       | 0,257       | 0,021          | 0,058          |
| <i>aqc4-af1</i>  | 7,34    | 7,71    | 1,91       | 0,61       | 0,248       | 0,260       | 0,021          | 0,065          |
| <i>aqc5-af1</i>  | 7,53    | 7,97    | 2,51       | 0,62       | 0,254       | 0,269       | 0,021          | 0,085          |
| <i>aqc6-af1</i>  | 7,59    | 8,07    | 2,92       | 0,62       | 0,256       | 0,272       | 0,021          | 0,099          |
| <i>aqc7-af1</i>  | 7,65    | 8,16    | 3,34       | 0,62       | 0,259       | 0,276       | 0,021          | 0,113          |
| <i>aqc8-af1</i>  | 7,70    | 8,24    | 3,78       | 0,62       | 0,260       | 0,278       | 0,021          | 0,128          |
| <i>aqc9-af1</i>  | 7,75    | 8,35    | 4,17       | 0,62       | 0,260       | 0,281       | 0,021          | 0,140          |
| <i>aqc10-af1</i> | 7,79    | 8,45    | 4,60       | 0,62       | 0,261       | 0,283       | 0,021          | 0,154          |
| <i>aqc11-af1</i> | 7,82    | 8,50    | 4,99       | 0,62       | 0,262       | 0,285       | 0,021          | 0,167          |
| <i>aqc1-af2</i>  | 8,41    | 8,40    | 1,34       | 0,73       | 0,297       | 0,296       | 0,026          | 0,047          |
| <i>aqc2-af2</i>  | 8,74    | 8,66    | 1,53       | 0,73       | 0,303       | 0,300       | 0,026          | 0,053          |
| <i>aqc3-af2</i>  | 9,10    | 8,96    | 1,69       | 0,73       | 0,309       | 0,304       | 0,025          | 0,057          |
| <i>aqc4-af2</i>  | 9,34    | 9,28    | 1,90       | 0,74       | 0,313       | 0,312       | 0,025          | 0,064          |
| <i>aqc5-af2</i>  | 9,60    | 9,58    | 2,50       | 0,75       | 0,321       | 0,321       | 0,025          | 0,084          |

|                              |       |       |      |      |       |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <i>aqc6-af<sub>r</sub>2</i>  | 9,47  | 9,62  | 2,89 | 0,75 | 0,320 | 0,325 | 0,026 | 0,098 |
| <i>aqc7-af<sub>r</sub>2</i>  | 9,48  | 9,65  | 3,31 | 0,75 | 0,324 | 0,329 | 0,026 | 0,113 |
| <i>aqc8-af<sub>r</sub>2</i>  | 9,37  | 9,52  | 3,73 | 0,74 | 0,326 | 0,331 | 0,026 | 0,130 |
| <i>aqc9-af<sub>r</sub>2</i>  | 9,35  | 9,62  | 4,17 | 0,75 | 0,325 | 0,335 | 0,026 | 0,145 |
| <i>aqc10-af<sub>r</sub>2</i> | 9,42  | 9,72  | 4,58 | 0,75 | 0,327 | 0,337 | 0,026 | 0,159 |
| <i>aqc11-af<sub>r</sub>2</i> | 9,55  | 9,86  | 4,99 | 0,75 | 0,330 | 0,340 | 0,026 | 0,172 |
| <i>aqc1-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,01  | 9,15  | 1,37 | 0,87 | 0,321 | 0,326 | 0,031 | 0,049 |
| <i>aqc2-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,26  | 9,39  | 1,52 | 0,87 | 0,328 | 0,332 | 0,031 | 0,054 |
| <i>aqc3-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,45  | 9,52  | 1,69 | 0,87 | 0,333 | 0,335 | 0,031 | 0,060 |
| <i>aqc4-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,54  | 9,69  | 1,94 | 0,87 | 0,336 | 0,341 | 0,031 | 0,068 |
| <i>aqc5-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,87  | 10,10 | 2,54 | 0,87 | 0,345 | 0,353 | 0,031 | 0,089 |
| <i>aqc6-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,89  | 10,17 | 2,94 | 0,87 | 0,347 | 0,356 | 0,031 | 0,103 |
| <i>aqc7-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,92  | 10,28 | 3,36 | 0,87 | 0,348 | 0,361 | 0,031 | 0,118 |
| <i>aqc8-af<sub>r</sub>3</i>  | 9,90  | 10,30 | 3,81 | 0,87 | 0,350 | 0,365 | 0,031 | 0,135 |
| <i>aqc9-af<sub>r</sub>3</i>  | 10,03 | 10,39 | 4,20 | 0,87 | 0,354 | 0,367 | 0,031 | 0,148 |
| <i>aqc10-af<sub>r</sub>3</i> | 10,05 | 10,52 | 4,60 | 0,88 | 0,353 | 0,369 | 0,031 | 0,162 |
| <i>aqc11-af<sub>r</sub>3</i> | 10,22 | 10,67 | 4,94 | 0,88 | 0,356 | 0,372 | 0,031 | 0,172 |
| <i>aqc1-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,03 | 10,23 | 1,36 | 0,99 | 0,349 | 0,356 | 0,035 | 0,048 |
| <i>aqc2-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,34 | 10,57 | 1,53 | 0,99 | 0,353 | 0,361 | 0,034 | 0,053 |
| <i>aqc3-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,37 | 10,63 | 1,68 | 0,99 | 0,356 | 0,364 | 0,034 | 0,058 |
| <i>aqc4-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,49 | 10,71 | 1,90 | 0,99 | 0,363 | 0,371 | 0,035 | 0,066 |
| <i>aqc5-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,99 | 11,33 | 2,51 | 0,99 | 0,373 | 0,385 | 0,034 | 0,085 |
| <i>aqc6-af<sub>r</sub>4</i>  | 11,05 | 11,43 | 2,90 | 0,99 | 0,378 | 0,392 | 0,034 | 0,100 |
| <i>aqc7-af<sub>r</sub>4</i>  | 10,95 | 11,40 | 3,30 | 0,99 | 0,380 | 0,396 | 0,035 | 0,115 |
| <i>aqc8-af<sub>r</sub>4</i>  | 11,05 | 11,51 | 3,72 | 0,99 | 0,383 | 0,399 | 0,035 | 0,129 |
| <i>aqc9-af<sub>r</sub>4</i>  | 11,13 | 11,62 | 4,11 | 0,99 | 0,385 | 0,402 | 0,035 | 0,142 |
| <i>aqc10-af<sub>r</sub>4</i> | 11,15 | 11,66 | 4,52 | 0,99 | 0,387 | 0,404 | 0,035 | 0,157 |
| <i>aqc11-af<sub>r</sub>4</i> | 11,18 | 11,71 | 4,90 | 0,99 | 0,387 | 0,406 | 0,035 | 0,170 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela L6 – Resultados dos experimentos água quente no ramal complexo e fria no reto para

$$T_h = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento                 | q <sub>h</sub> [kW] | q <sub>c</sub> [kW] | u(q <sub>h</sub> ) [kW] | u(q <sub>c</sub> ) [kW] | U <sub>ah</sub> [kW/°C] | U <sub>ac</sub> [kW/°C] | u(U <sub>Ac</sub> ) [kW/°C] | u(U <sub>Ah</sub> ) [kW/°C] |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| <i>aqc1-af<sub>r</sub>1</i> | 4,79                | 4,86                | 1,47                    | 0,61                    | 0,248                   | 0,251                   | 0,032                       | 0,076                       |
| <i>aqc2-af<sub>r</sub>1</i> | 4,74                | 4,83                | 1,67                    | 0,61                    | 0,248                   | 0,253                   | 0,033                       | 0,088                       |
| <i>aqc3-af<sub>r</sub>1</i> | 4,81                | 4,86                | 1,85                    | 0,61                    | 0,253                   | 0,255                   | 0,032                       | 0,097                       |
| <i>aqc4-af<sub>r</sub>1</i> | 4,83                | 4,97                | 2,11                    | 0,61                    | 0,253                   | 0,260                   | 0,033                       | 0,110                       |
| <i>aqc5-af<sub>r</sub>1</i> | 4,94                | 5,10                | 2,75                    | 0,61                    | 0,257                   | 0,265                   | 0,032                       | 0,143                       |
| <i>aqc6-af<sub>r</sub>1</i> | 4,94                | 5,14                | 3,21                    | 0,61                    | 0,257                   | 0,267                   | 0,032                       | 0,167                       |
| <i>aqc7-af<sub>r</sub>1</i> | 4,96                | 5,22                | 3,69                    | 0,61                    | 0,257                   | 0,270                   | 0,032                       | 0,191                       |
| <i>aqc8-af<sub>r</sub>1</i> | 4,94                | 5,27                | 4,15                    | 0,61                    | 0,254                   | 0,272                   | 0,032                       | 0,214                       |
| <i>aqc9-af<sub>r</sub>1</i> | 4,98                | 5,37                | 4,60                    | 0,61                    | 0,255                   | 0,274                   | 0,032                       | 0,235                       |
| <i>aqc1-af<sub>r</sub>2</i> | 5,16                | 5,37                | 1,49                    | 0,75                    | 0,275                   | 0,286                   | 0,041                       | 0,080                       |
| <i>aqc2-af<sub>r</sub>2</i> | 5,42                | 5,61                | 1,69                    | 0,76                    | 0,282                   | 0,293                   | 0,040                       | 0,089                       |
| <i>aqc3-af<sub>r</sub>2</i> | 5,45                | 5,70                | 1,87                    | 0,76                    | 0,283                   | 0,296                   | 0,040                       | 0,098                       |

|                  |      |      |      |      |       |       |       |       |
|------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| <i>aqc4-afr2</i> | 5,42 | 5,80 | 2,14 | 0,76 | 0,281 | 0,301 | 0,040 | 0,111 |
| <i>aqc5-afr2</i> | 5,55 | 5,98 | 2,79 | 0,76 | 0,287 | 0,310 | 0,040 | 0,145 |
| <i>aqc6-afr2</i> | 5,52 | 6,05 | 3,25 | 0,76 | 0,287 | 0,314 | 0,040 | 0,169 |
| <i>aqc7-afr2</i> | 5,55 | 6,13 | 3,73 | 0,76 | 0,288 | 0,318 | 0,040 | 0,193 |
| <i>aqc8-afr2</i> | 5,55 | 6,19 | 4,18 | 0,76 | 0,286 | 0,320 | 0,040 | 0,216 |
| <i>aqc9-afr2</i> | 5,52 | 6,24 | 4,53 | 0,76 | 0,284 | 0,321 | 0,040 | 0,234 |
| <i>aqc1-afr3</i> | 6,51 | 6,85 | 1,47 | 0,88 | 0,307 | 0,323 | 0,042 | 0,070 |
| <i>aqc2-afr3</i> | 6,41 | 6,74 | 1,66 | 0,88 | 0,311 | 0,327 | 0,043 | 0,081 |
| <i>aqc3-afr3</i> | 6,25 | 6,62 | 1,86 | 0,88 | 0,312 | 0,331 | 0,044 | 0,093 |
| <i>aqc4-afr3</i> | 6,29 | 6,66 | 2,13 | 0,88 | 0,317 | 0,336 | 0,045 | 0,108 |
| <i>aqc5-afr3</i> | 6,44 | 6,90 | 2,80 | 0,88 | 0,323 | 0,345 | 0,045 | 0,141 |
| <i>aqc6-afr3</i> | 6,54 | 7,07 | 3,25 | 0,88 | 0,325 | 0,351 | 0,044 | 0,161 |
| <i>aqc7-afr3</i> | 6,62 | 7,23 | 3,71 | 0,88 | 0,325 | 0,355 | 0,044 | 0,182 |
| <i>aqc8-afr3</i> | 6,69 | 7,36 | 4,14 | 0,89 | 0,326 | 0,359 | 0,044 | 0,202 |
| <i>aqc9-afr3</i> | 6,67 | 7,43 | 4,60 | 0,88 | 0,325 | 0,361 | 0,044 | 0,224 |
| <i>aqc1-afr4</i> | 6,60 | 6,86 | 1,51 | 1,00 | 0,352 | 0,366 | 0,054 | 0,081 |
| <i>aqc2-afr4</i> | 6,84 | 7,02 | 1,70 | 1,00 | 0,362 | 0,371 | 0,053 | 0,090 |
| <i>aqc3-afr4</i> | 6,84 | 7,05 | 1,87 | 0,99 | 0,365 | 0,376 | 0,054 | 0,100 |
| <i>aqc4-afr4</i> | 6,95 | 7,19 | 2,15 | 0,99 | 0,370 | 0,383 | 0,054 | 0,115 |
| <i>aqc5-afr4</i> | 7,19 | 7,45 | 2,80 | 0,99 | 0,382 | 0,396 | 0,054 | 0,149 |
| <i>aqc6-afr4</i> | 7,20 | 7,52 | 3,28 | 1,00 | 0,384 | 0,401 | 0,054 | 0,175 |
| <i>aqc7-afr4</i> | 7,34 | 7,64 | 3,76 | 1,00 | 0,391 | 0,407 | 0,054 | 0,200 |
| <i>aqc8-afr4</i> | 7,28 | 7,69 | 4,19 | 1,00 | 0,384 | 0,406 | 0,054 | 0,221 |
| <i>aqc9-afr4</i> | 7,26 | 7,74 | 4,61 | 1,00 | 0,379 | 0,405 | 0,053 | 0,241 |

Fonte: Autor (2025).

**APÊNDICE M – Compilado dos experimentos com água fria no ramal complexo e água quente no ramal reto**

Tabela M1 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 30\text{ °C}$

| Experimento       | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh   |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|-------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 30,34    | 19,16    | 22,23    | 29,35    | 0,26      | 0,73      | 0,00     | 0,25     | 550  | 4713  |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 30,48    | 19,22    | 21,55    | 29,34    | 0,40      | 0,73      | 0,06     | 0,25     | 826  | 4729  |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 30,19    | 19,38    | 21,19    | 29,01    | 0,53      | 0,73      | 0,14     | 0,25     | 1091 | 4664  |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 29,89    | 19,50    | 20,95    | 28,69    | 0,67      | 0,73      | 0,24     | 0,25     | 1390 | 4650  |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 29,76    | 19,57    | 20,81    | 28,53    | 0,80      | 0,73      | 0,36     | 0,25     | 1649 | 4622  |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 29,60    | 19,66    | 20,72    | 28,37    | 0,93      | 0,73      | 0,50     | 0,25     | 1921 | 4594  |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 29,47    | 19,69    | 20,63    | 28,22    | 1,06      | 0,73      | 0,65     | 0,25     | 2194 | 4602  |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 29,42    | 19,78    | 20,62    | 28,16    | 1,19      | 0,73      | 0,82     | 0,25     | 2461 | 4586  |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 29,39    | 19,85    | 20,62    | 28,12    | 1,32      | 0,73      | 1,01     | 0,25     | 2737 | 4582  |
| <i>afc10-aqr1</i> | 29,38    | 19,95    | 20,65    | 28,11    | 1,46      | 0,73      | 1,22     | 0,25     | 3025 | 4604  |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 29,74    | 19,63    | 22,72    | 29,12    | 0,26      | 1,11      | 0,00     | 0,64     | 558  | 7056  |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 29,66    | 19,72    | 22,02    | 28,95    | 0,39      | 1,11      | 0,05     | 0,64     | 827  | 7042  |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 29,66    | 19,74    | 21,61    | 28,88    | 0,52      | 1,10      | 0,13     | 0,64     | 1094 | 7010  |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 29,65    | 19,80    | 21,36    | 28,82    | 0,66      | 1,10      | 0,22     | 0,64     | 1369 | 7011  |
| <i>afc5-aqr2</i>  | 29,63    | 19,85    | 21,19    | 28,77    | 0,80      | 1,10      | 0,35     | 0,64     | 1660 | 7010  |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 29,59    | 19,94    | 21,12    | 28,73    | 0,92      | 1,11      | 0,48     | 0,65     | 1920 | 7039  |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 29,58    | 20,03    | 21,08    | 28,70    | 1,06      | 1,11      | 0,63     | 0,65     | 2207 | 7047  |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 29,53    | 20,09    | 21,03    | 28,63    | 1,19      | 1,11      | 0,81     | 0,65     | 2482 | 7023  |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 29,48    | 20,14    | 21,00    | 28,57    | 1,32      | 1,11      | 1,00     | 0,65     | 2755 | 7004  |
| <i>afc10-aqr2</i> | 29,44    | 20,14    | 20,92    | 28,52    | 1,46      | 1,11      | 1,22     | 0,65     | 3043 | 7003  |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 29,83    | 19,35    | 22,64    | 29,34    | 0,26      | 1,45      | 0,00     | 1,14     | 551  | 9284  |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 29,84    | 19,32    | 21,84    | 29,25    | 0,40      | 1,45      | 0,06     | 1,13     | 826  | 9290  |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 29,77    | 19,39    | 21,41    | 29,14    | 0,53      | 1,45      | 0,14     | 1,14     | 1106 | 9266  |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 29,69    | 19,45    | 21,14    | 29,03    | 0,67      | 1,45      | 0,23     | 1,14     | 1377 | 9242  |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 29,59    | 19,60    | 21,04    | 28,91    | 0,80      | 1,45      | 0,35     | 1,14     | 1659 | 9220  |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 29,57    | 19,67    | 20,94    | 28,87    | 0,93      | 1,45      | 0,48     | 1,14     | 1923 | 9230  |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 29,55    | 19,79    | 20,92    | 28,84    | 1,06      | 1,45      | 0,64     | 1,14     | 2199 | 9234  |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 29,58    | 19,89    | 20,91    | 28,85    | 1,19      | 1,45      | 0,81     | 1,14     | 2467 | 9218  |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 29,62    | 20,01    | 20,94    | 28,88    | 1,32      | 1,45      | 1,00     | 1,14     | 2744 | 9241  |
| <i>afc10-aqr3</i> | 29,70    | 20,10    | 20,97    | 28,95    | 1,44      | 1,45      | 1,19     | 1,14     | 3000 | 9239  |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 30,91    | 19,71    | 23,35    | 30,42    | 0,26      | 1,61      | 0,00     | 1,41     | 548  | 10553 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 30,82    | 19,77    | 22,49    | 30,25    | 0,39      | 1,61      | 0,06     | 1,41     | 830  | 10535 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 30,77    | 19,84    | 22,03    | 30,15    | 0,53      | 1,61      | 0,13     | 1,41     | 1104 | 10497 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 30,73    | 19,93    | 21,78    | 30,08    | 0,65      | 1,62      | 0,22     | 1,43     | 1367 | 10580 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 30,67    | 20,02    | 21,60    | 29,99    | 0,79      | 1,62      | 0,34     | 1,43     | 1647 | 10571 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 30,62    | 20,10    | 21,49    | 29,93    | 0,92      | 1,62      | 0,48     | 1,42     | 1924 | 10543 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 30,59    | 20,13    | 21,38    | 29,88    | 1,05      | 1,62      | 0,62     | 1,43     | 2192 | 10557 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 30,47    | 20,20    | 21,31    | 29,76    | 1,18      | 1,62      | 0,79     | 1,42     | 2478 | 10524 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| <i>afc9-aqr4</i>  | 30,31 | 20,27 | 21,26 | 29,60 | 1,31 | 1,62 | 0,99 | 1,43 | 2748 | 10462 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 30,21 | 20,25 | 21,17 | 29,49 | 1,45 | 1,62 | 1,20 | 1,42 | 3029 | 10461 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M2 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 35\text{ °C}$

| Experimento       | Thi [°C] | Tci [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh   |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|-------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 35,85    | 19,87    | 24,45    | 34,21    | 0,25      | 0,67      | -0,01    | 0,20     | 548  | 4776  |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 35,75    | 19,98    | 23,34    | 33,92    | 0,38      | 0,67      | 0,05     | 0,20     | 817  | 4762  |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 35,73    | 20,05    | 22,72    | 33,77    | 0,52      | 0,66      | 0,12     | 0,20     | 1098 | 4741  |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 35,72    | 20,16    | 22,38    | 33,67    | 0,65      | 0,66      | 0,22     | 0,20     | 1370 | 4730  |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 35,72    | 20,24    | 22,15    | 33,60    | 0,78      | 0,66      | 0,33     | 0,20     | 1648 | 4738  |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 35,79    | 20,34    | 22,02    | 33,61    | 0,91      | 0,66      | 0,46     | 0,20     | 1925 | 4743  |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 35,80    | 20,40    | 21,89    | 33,58    | 1,04      | 0,67      | 0,61     | 0,20     | 2198 | 4750  |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 35,76    | 20,49    | 21,84    | 33,51    | 1,16      | 0,66      | 0,76     | 0,20     | 2456 | 4720  |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 35,73    | 20,57    | 21,79    | 33,45    | 1,30      | 0,67      | 0,96     | 0,20     | 2751 | 4747  |
| <i>afc10-aqr1</i> | 35,71    | 20,58    | 21,70    | 33,40    | 1,43      | 0,66      | 1,17     | 0,20     | 3026 | 4727  |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 35,46    | 19,60    | 24,47    | 34,28    | 0,26      | 0,97      | 0,00     | 0,49     | 552  | 6929  |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 35,26    | 19,61    | 23,22    | 33,92    | 0,39      | 0,97      | 0,05     | 0,49     | 825  | 6890  |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 35,05    | 19,68    | 22,54    | 33,62    | 0,52      | 0,97      | 0,13     | 0,50     | 1101 | 6883  |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 34,87    | 19,87    | 22,23    | 33,40    | 0,65      | 0,98      | 0,22     | 0,50     | 1375 | 6884  |
| <i>afc5-aqr2</i>  | 34,77    | 19,98    | 22,00    | 33,26    | 0,78      | 0,98      | 0,33     | 0,50     | 1651 | 6891  |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 34,87    | 20,14    | 21,92    | 33,32    | 0,92      | 0,99      | 0,47     | 0,51     | 1932 | 6952  |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 34,92    | 20,21    | 21,81    | 33,33    | 1,04      | 0,99      | 0,61     | 0,51     | 2198 | 6972  |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 34,98    | 20,34    | 21,80    | 33,37    | 1,16      | 0,98      | 0,77     | 0,51     | 2454 | 6939  |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 35,06    | 20,51    | 21,82    | 33,42    | 1,31      | 0,98      | 0,98     | 0,51     | 2768 | 6955  |
| <i>afc10-aqr2</i> | 35,21    | 20,62    | 21,84    | 33,54    | 1,43      | 0,99      | 1,17     | 0,51     | 3030 | 6980  |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 35,82    | 20,09    | 25,22    | 34,92    | 0,25      | 1,29      | -0,01    | 0,90     | 548  | 9337  |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 35,65    | 20,19    | 23,98    | 34,62    | 0,38      | 1,29      | 0,05     | 0,90     | 824  | 9281  |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 35,55    | 20,26    | 23,29    | 34,44    | 0,51      | 1,29      | 0,12     | 0,90     | 1105 | 9276  |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 35,48    | 20,34    | 22,89    | 34,31    | 0,64      | 1,29      | 0,21     | 0,90     | 1363 | 9266  |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 35,47    | 20,43    | 22,64    | 34,26    | 0,77      | 1,29      | 0,32     | 0,90     | 1640 | 9257  |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 35,49    | 20,51    | 22,45    | 34,24    | 0,91      | 1,31      | 0,45     | 0,92     | 1931 | 9358  |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 35,45    | 20,63    | 22,35    | 34,18    | 1,04      | 1,31      | 0,60     | 0,92     | 2210 | 9349  |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 35,39    | 20,70    | 22,26    | 34,11    | 1,17      | 1,31      | 0,77     | 0,93     | 2485 | 9372  |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 35,38    | 20,81    | 22,23    | 34,08    | 1,29      | 1,31      | 0,94     | 0,93     | 2745 | 9376  |
| <i>afc10-aqr3</i> | 35,37    | 20,82    | 22,13    | 34,06    | 1,42      | 1,32      | 1,15     | 0,93     | 3031 | 9384  |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 35,56    | 19,58    | 24,76    | 34,83    | 0,26      | 1,61      | 0,00     | 1,40     | 554  | 11600 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 35,39    | 19,60    | 23,50    | 34,55    | 0,39      | 1,61      | 0,05     | 1,40     | 829  | 11533 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 35,22    | 19,71    | 22,82    | 34,30    | 0,53      | 1,61      | 0,14     | 1,40     | 1114 | 11469 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 34,98    | 19,90    | 22,50    | 34,03    | 0,65      | 1,61      | 0,22     | 1,40     | 1368 | 11422 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 34,84    | 20,18    | 22,37    | 33,88    | 0,78      | 1,63      | 0,34     | 1,44     | 1662 | 11520 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 34,87    | 20,25    | 22,21    | 33,87    | 0,90      | 1,63      | 0,46     | 1,44     | 1913 | 11518 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 34,87    | 20,33    | 22,07    | 33,85    | 1,04      | 1,63      | 0,62     | 1,44     | 2211 | 11515 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 34,95    | 20,47    | 22,06    | 33,91    | 1,16      | 1,63      | 0,77     | 1,44     | 2469 | 11540 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| <i>afc9-aqr4</i>  | 35,02 | 20,60 | 22,05 | 33,96 | 1,30 | 1,62 | 0,97 | 1,44 | 2763 | 11538 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 35,10 | 20,74 | 22,08 | 34,03 | 1,43 | 1,62 | 1,17 | 1,44 | 3038 | 11543 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M3 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 40\text{ °C}$

| Experimento       | Thi [°C] | Tei [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh   |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|-------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 40,90    | 20,11    | 25,62    | 38,59    | 0,26      | 0,58      | 0,00     | 0,13     | 565  | 4533  |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 41,34    | 20,30    | 24,57    | 38,64    | 0,38      | 0,57      | 0,06     | 0,13     | 836  | 4530  |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 40,51    | 20,57    | 23,85    | 37,75    | 0,51      | 0,58      | 0,13     | 0,13     | 1110 | 4483  |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 40,29    | 20,66    | 23,42    | 37,50    | 0,64      | 0,60      | 0,22     | 0,15     | 1385 | 4638  |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 40,06    | 20,84    | 23,17    | 37,19    | 0,77      | 0,60      | 0,34     | 0,15     | 1668 | 4592  |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 40,05    | 20,91    | 22,95    | 37,11    | 0,91      | 0,60      | 0,47     | 0,15     | 1952 | 4593  |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 40,00    | 21,04    | 22,82    | 37,01    | 1,06      | 0,60      | 0,64     | 0,14     | 2287 | 4607  |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 40,20    | 21,17    | 22,84    | 37,16    | 1,15      | 0,60      | 0,75     | 0,15     | 2476 | 4609  |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 40,19    | 21,23    | 22,76    | 37,11    | 1,27      | 0,60      | 0,92     | 0,14     | 2735 | 4623  |
| <i>afc10-aqr1</i> | 40,36    | 20,97    | 22,36    | 37,16    | 1,42      | 0,60      | 1,15     | 0,15     | 3040 | 4597  |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 40,45    | 19,49    | 26,00    | 38,75    | 0,25      | 0,89      | 0,00     | 0,38     | 550  | 6977  |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 40,56    | 19,65    | 24,54    | 38,62    | 0,38      | 0,89      | 0,05     | 0,38     | 816  | 6970  |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 40,51    | 19,98    | 23,82    | 38,42    | 0,51      | 0,89      | 0,13     | 0,39     | 1104 | 6966  |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 40,41    | 20,07    | 23,29    | 38,22    | 0,64      | 0,89      | 0,21     | 0,38     | 1372 | 6941  |
| <i>afc5-aqr2</i>  | 40,37    | 20,18    | 22,90    | 38,10    | 0,79      | 0,89      | 0,34     | 0,39     | 1678 | 6907  |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 40,36    | 20,22    | 22,69    | 38,03    | 0,89      | 0,89      | 0,45     | 0,39     | 1900 | 6914  |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 40,34    | 20,38    | 22,56    | 37,97    | 1,03      | 0,89      | 0,60     | 0,38     | 2187 | 6923  |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 40,26    | 20,48    | 22,45    | 37,85    | 1,16      | 0,89      | 0,76     | 0,38     | 2463 | 6896  |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 40,27    | 20,47    | 22,29    | 37,82    | 1,27      | 0,89      | 0,92     | 0,38     | 2693 | 6902  |
| <i>afc10-aqr2</i> | 40,22    | 21,05    | 22,63    | 37,83    | 1,42      | 0,90      | 1,14     | 0,41     | 3045 | 6948  |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 40,51    | 19,66    | 26,47    | 39,20    | 0,25      | 1,18      | -0,01    | 0,71     | 546  | 9318  |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 40,47    | 19,57    | 24,64    | 38,95    | 0,38      | 1,19      | 0,05     | 0,72     | 827  | 9331  |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 40,22    | 19,64    | 23,62    | 38,58    | 0,52      | 1,18      | 0,13     | 0,71     | 1121 | 9237  |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 39,91    | 19,76    | 23,09    | 38,21    | 0,65      | 1,18      | 0,22     | 0,71     | 1380 | 9199  |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 39,57    | 20,00    | 22,83    | 37,84    | 0,77      | 1,18      | 0,33     | 0,71     | 1648 | 9110  |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 39,54    | 20,20    | 22,69    | 37,78    | 0,90      | 1,19      | 0,46     | 0,73     | 1924 | 9189  |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 39,62    | 20,32    | 22,56    | 37,81    | 1,04      | 1,20      | 0,61     | 0,73     | 2208 | 9238  |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 39,69    | 20,45    | 22,48    | 37,84    | 1,17      | 1,20      | 0,78     | 0,73     | 2494 | 9246  |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 39,73    | 20,49    | 22,36    | 37,84    | 1,29      | 1,20      | 0,96     | 0,73     | 2756 | 9247  |
| <i>afc10-aqr3</i> | 39,74    | 21,28    | 22,92    | 37,90    | 1,42      | 1,20      | 1,14     | 0,77     | 3066 | 9239  |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 40,71    | 20,58    | 27,54    | 39,69    | 0,24      | 1,49      | -0,01    | 1,21     | 546  | 11820 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 40,47    | 20,67    | 25,79    | 39,29    | 0,37      | 1,49      | 0,04     | 1,21     | 822  | 11769 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 40,27    | 20,77    | 24,84    | 38,99    | 0,50      | 1,49      | 0,11     | 1,20     | 1103 | 11667 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 40,20    | 20,86    | 24,27    | 38,85    | 0,63      | 1,49      | 0,20     | 1,21     | 1379 | 11685 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 40,13    | 20,97    | 23,90    | 38,73    | 0,76      | 1,49      | 0,31     | 1,21     | 1658 | 11643 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 40,01    | 20,99    | 23,56    | 38,57    | 0,89      | 1,49      | 0,44     | 1,21     | 1942 | 11625 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 39,88    | 21,07    | 23,36    | 38,41    | 1,02      | 1,49      | 0,58     | 1,21     | 2214 | 11575 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 39,83    | 21,15    | 23,21    | 38,34    | 1,15      | 1,49      | 0,73     | 1,21     | 2483 | 11557 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| <i>afc9-aqr4</i>  | 39,85 | 21,20 | 23,09 | 38,34 | 1,27 | 1,49 | 0,91 | 1,21 | 2744 | 11545 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 40,21 | 21,35 | 23,10 | 38,65 | 1,42 | 1,49 | 1,15 | 1,21 | 3085 | 11654 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M4 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 45\text{ °C}$

| Experimento       | Thi [°C] | Tei [°C] | Tco [°C] | Tho [°C] | mc [kg/s] | mh [kg/s] | Pc [bar] | Ph [bar] | Rec  | Reh   |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|------|-------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 45,57    | 19,94    | 27,10    | 42,63    | 0,24      | 0,55      | 0,00     | 0,12     | 548  | 4671  |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 45,38    | 19,99    | 25,25    | 42,02    | 0,38      | 0,55      | 0,05     | 0,12     | 826  | 4678  |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 45,14    | 20,18    | 24,30    | 41,56    | 0,51      | 0,56      | 0,12     | 0,12     | 1104 | 4664  |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 45,06    | 20,40    | 23,80    | 41,33    | 0,64      | 0,55      | 0,21     | 0,12     | 1381 | 4604  |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 45,05    | 20,64    | 23,57    | 41,23    | 0,76      | 0,56      | 0,32     | 0,12     | 1652 | 4650  |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 45,18    | 20,80    | 23,37    | 41,24    | 0,89      | 0,55      | 0,45     | 0,12     | 1930 | 4642  |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 45,27    | 20,92    | 23,23    | 41,25    | 1,02      | 0,55      | 0,58     | 0,12     | 2201 | 4640  |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 45,34    | 21,05    | 23,13    | 41,24    | 1,14      | 0,55      | 0,74     | 0,12     | 2472 | 4651  |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 45,46    | 21,18    | 23,08    | 41,29    | 1,28      | 0,56      | 0,93     | 0,12     | 2771 | 4664  |
| <i>afc10-aqr1</i> | 45,18    | 21,29    | 23,04    | 40,96    | 1,39      | 0,56      | 1,10     | 0,12     | 3006 | 4667  |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 46,13    | 20,51    | 28,77    | 43,95    | 0,24      | 0,83      | -0,01    | 0,33     | 545  | 7139  |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 45,82    | 20,75    | 26,78    | 43,35    | 0,36      | 0,82      | 0,04     | 0,33     | 815  | 7053  |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 45,82    | 20,90    | 25,70    | 43,14    | 0,49      | 0,82      | 0,11     | 0,33     | 1092 | 7061  |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 45,66    | 21,03    | 25,00    | 42,84    | 0,62      | 0,82      | 0,20     | 0,33     | 1368 | 7027  |
| <i>afc5-aqr2</i>  | 45,54    | 21,09    | 24,45    | 42,62    | 0,76      | 0,82      | 0,31     | 0,33     | 1666 | 6998  |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 45,25    | 21,12    | 24,08    | 42,28    | 0,88      | 0,82      | 0,43     | 0,34     | 1920 | 6943  |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 45,04    | 21,23    | 23,83    | 42,02    | 1,01      | 0,82      | 0,57     | 0,33     | 2201 | 6919  |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 44,93    | 21,26    | 23,61    | 41,88    | 1,14      | 0,82      | 0,73     | 0,33     | 2477 | 6926  |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 45,04    | 21,41    | 23,54    | 41,93    | 1,27      | 0,82      | 0,93     | 0,33     | 2781 | 6916  |
| <i>afc10-aqr2</i> | 45,73    | 21,62    | 23,63    | 42,42    | 1,39      | 0,82      | 1,10     | 0,33     | 3048 | 6948  |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 44,78    | 20,12    | 28,19    | 43,15    | 0,24      | 1,09      | -0,01    | 0,63     | 556  | 9284  |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 44,66    | 20,20    | 26,26    | 42,77    | 0,37      | 1,10      | 0,04     | 0,63     | 822  | 9259  |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 44,59    | 20,41    | 25,22    | 42,52    | 0,50      | 1,10      | 0,12     | 0,63     | 1110 | 9238  |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 44,85    | 20,72    | 24,81    | 42,66    | 0,63      | 1,09      | 0,20     | 0,63     | 1376 | 9260  |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 45,07    | 20,94    | 24,50    | 42,78    | 0,75      | 1,09      | 0,31     | 0,63     | 1647 | 9287  |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 45,36    | 21,15    | 24,32    | 42,98    | 0,88      | 1,09      | 0,43     | 0,63     | 1929 | 9324  |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 45,54    | 21,16    | 24,02    | 43,06    | 1,00      | 1,09      | 0,57     | 0,63     | 2199 | 9335  |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 45,69    | 21,29    | 23,90    | 43,15    | 1,13      | 1,09      | 0,73     | 0,63     | 2475 | 9362  |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 45,61    | 21,21    | 23,59    | 43,03    | 1,27      | 1,09      | 0,91     | 0,63     | 2762 | 9353  |
| <i>afc10-aqr3</i> | 45,73    | 21,63    | 23,79    | 43,06    | 1,39      | 1,07      | 1,10     | 0,61     | 3042 | 9180  |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 46,10    | 20,14    | 29,04    | 44,62    | 0,24      | 1,34      | -0,01    | 0,97     | 547  | 11642 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 45,89    | 20,21    | 26,81    | 44,18    | 0,37      | 1,34      | 0,04     | 0,97     | 821  | 11585 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 45,66    | 20,33    | 25,57    | 43,81    | 0,50      | 1,34      | 0,12     | 0,97     | 1107 | 11509 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 45,37    | 20,65    | 24,97    | 43,45    | 0,63      | 1,34      | 0,20     | 0,97     | 1383 | 11426 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 45,18    | 20,87    | 24,56    | 43,20    | 0,76      | 1,34      | 0,31     | 0,97     | 1661 | 11400 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 45,00    | 21,05    | 24,28    | 43,00    | 0,88      | 1,36      | 0,43     | 0,99     | 1938 | 11514 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 45,06    | 21,18    | 24,06    | 43,00    | 1,01      | 1,35      | 0,58     | 0,99     | 2222 | 11503 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 45,11    | 21,28    | 23,92    | 43,01    | 1,13      | 1,35      | 0,72     | 0,99     | 2476 | 11492 |

|                   |       |       |       |       |      |      |      |      |      |       |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|-------|
| <i>afc9-aqr4</i>  | 45,18 | 21,27 | 23,69 | 43,03 | 1,26 | 1,36 | 0,91 | 0,99 | 2760 | 11535 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 45,19 | 21,36 | 23,59 | 43,01 | 1,39 | 1,36 | 1,10 | 0,99 | 3034 | 11539 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M5 – Dados adquiridos nos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 50\text{ °C}$

| Experimento      | $T_{hi}$ [°C] | $T_{ci}$ [°C] | $T_{co}$ [°C] | $T_{ho}$ [°C] | $m_c$ [kg/s] | $m_h$ [kg/s] | $P_c$ [bar] | $P_h$ [bar] | Rec  | Reh  |
|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|------|------|
| <i>afc1-aqr1</i> | 52,93         | 20,09         | 29,57         | 48,66         | 0,24         | 0,50         | -0,01       | 0,09        | 553  | 4738 |
| <i>afc2-aqr1</i> | 52,46         | 20,20         | 27,03         | 47,71         | 0,37         | 0,50         | 0,04        | 0,09        | 821  | 4691 |
| <i>afc3-aqr1</i> | 52,17         | 20,28         | 25,63         | 47,12         | 0,50         | 0,50         | 0,12        | 0,09        | 1097 | 4693 |
| <i>afc4-aqr1</i> | 51,57         | 20,40         | 24,73         | 46,39         | 0,63         | 0,50         | 0,20        | 0,09        | 1375 | 4608 |
| <i>afc5-aqr1</i> | 51,31         | 20,47         | 24,15         | 46,00         | 0,76         | 0,50         | 0,31        | 0,09        | 1654 | 4575 |
| <i>afc6-aqr1</i> | 51,13         | 20,56         | 23,75         | 45,71         | 0,89         | 0,50         | 0,45        | 0,09        | 1937 | 4587 |
| <i>afc7-aqr1</i> | 50,89         | 20,65         | 23,48         | 45,43         | 1,02         | 0,50         | 0,58        | 0,09        | 2204 | 4574 |
| <i>afc8-aqr1</i> | 50,74         | 20,70         | 23,26         | 45,22         | 1,14         | 0,50         | 0,74        | 0,09        | 2455 | 4562 |
| <i>afc9-aqr1</i> | 50,57         | 20,79         | 23,06         | 45,01         | 1,30         | 0,50         | 0,96        | 0,09        | 2793 | 4551 |
| <i>afc1-aqr2</i> | 52,43         | 19,69         | 30,02         | 49,28         | 0,24         | 0,73         | -0,01       | 0,25        | 551  | 6940 |
| <i>afc2-aqr2</i> | 52,07         | 19,85         | 27,42         | 48,49         | 0,36         | 0,72         | 0,04        | 0,25        | 819  | 6836 |
| <i>afc3-aqr2</i> | 51,32         | 19,98         | 25,79         | 47,52         | 0,50         | 0,73         | 0,12        | 0,25        | 1111 | 6779 |
| <i>afc4-aqr2</i> | 51,04         | 20,26         | 25,11         | 47,21         | 0,63         | 0,75         | 0,21        | 0,27        | 1380 | 6986 |
| <i>afc5-aqr2</i> | 50,41         | 20,36         | 24,46         | 46,55         | 0,76         | 0,76         | 0,31        | 0,28        | 1654 | 7001 |
| <i>afc6-aqr2</i> | 50,04         | 20,54         | 24,09         | 46,12         | 0,88         | 0,76         | 0,44        | 0,28        | 1921 | 6904 |
| <i>afc7-aqr2</i> | 49,67         | 20,70         | 23,82         | 45,73         | 1,02         | 0,76         | 0,58        | 0,28        | 2205 | 6888 |
| <i>afc8-aqr2</i> | 48,97         | 20,81         | 23,57         | 45,13         | 1,14         | 0,77         | 0,74        | 0,29        | 2472 | 6929 |
| <i>afc9-aqr2</i> | 48,48         | 20,96         | 23,43         | 44,67         | 1,27         | 0,78         | 0,93        | 0,29        | 2760 | 6910 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M6 – Resultados dos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para  $T_h = 30\text{ °C}$

| Experimento       | $q_h$ [kW] | $q_c$ [kW] | $u(qh)$ [kW] | $u(qc)$ [kW] | $U_{ah}$ [kW/°C] | $U_{ac}$ [kW/°C] | $u(UAc)$ [kW/°C] |
|-------------------|------------|------------|--------------|--------------|------------------|------------------|------------------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 3,02       | 3,38       | 1,78         | 0,58         | 0,332            | 0,371            | 0,066            |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 3,50       | 3,87       | 1,78         | 0,88         | 0,368            | 0,406            | 0,094            |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 3,60       | 4,00       | 1,77         | 1,17         | 0,387            | 0,429            | 0,127            |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 3,68       | 4,07       | 1,77         | 1,49         | 0,406            | 0,449            | 0,165            |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 3,74       | 4,12       | 1,76         | 1,76         | 0,418            | 0,460            | 0,198            |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 3,76       | 4,14       | 1,75         | 2,05         | 0,427            | 0,471            | 0,235            |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 3,81       | 4,18       | 1,76         | 2,35         | 0,439            | 0,481            | 0,271            |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 3,84       | 4,20       | 1,75         | 2,63         | 0,447            | 0,490            | 0,307            |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 3,86       | 4,25       | 1,75         | 2,92         | 0,453            | 0,499            | 0,344            |
| <i>afc10-aqr1</i> | 3,90       | 4,28       | 1,76         | 3,23         | 0,463            | 0,507            | 0,383            |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 2,87       | 3,41       | 2,68         | 0,59         | 0,351            | 0,416            | 0,075            |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 3,28       | 3,80       | 2,68         | 0,88         | 0,390            | 0,451            | 0,106            |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 3,57       | 4,09       | 2,66         | 1,16         | 0,416            | 0,476            | 0,137            |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 3,79       | 4,30       | 2,67         | 1,46         | 0,438            | 0,497            | 0,170            |

|                   |      |      |      |      |       |       |       |
|-------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <i>afc5-aqr2</i>  | 3,95 | 4,47 | 2,67 | 1,77 | 0,455 | 0,515 | 0,205 |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 4,03 | 4,55 | 2,68 | 2,04 | 0,467 | 0,527 | 0,238 |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 4,11 | 4,63 | 2,68 | 2,35 | 0,479 | 0,539 | 0,275 |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 4,16 | 4,68 | 2,68 | 2,64 | 0,488 | 0,549 | 0,311 |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 4,19 | 4,72 | 2,67 | 2,93 | 0,496 | 0,559 | 0,348 |
| <i>afc10-aqr2</i> | 4,25 | 4,79 | 2,67 | 3,24 | 0,502 | 0,567 | 0,384 |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 2,95 | 3,61 | 3,51 | 0,58 | 0,346 | 0,423 | 0,071 |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 3,53 | 4,17 | 3,52 | 0,88 | 0,395 | 0,467 | 0,101 |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 3,82 | 4,50 | 3,51 | 1,18 | 0,422 | 0,497 | 0,132 |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 4,02 | 4,70 | 3,51 | 1,47 | 0,444 | 0,520 | 0,164 |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 4,12 | 4,82 | 3,50 | 1,77 | 0,462 | 0,539 | 0,200 |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 4,27 | 4,94 | 3,51 | 2,05 | 0,479 | 0,555 | 0,232 |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 4,32 | 5,01 | 3,51 | 2,35 | 0,489 | 0,567 | 0,267 |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 4,40 | 5,09 | 3,51 | 2,63 | 0,500 | 0,577 | 0,300 |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 4,50 | 5,15 | 3,51 | 2,92 | 0,512 | 0,587 | 0,334 |
| <i>afc10-aqr3</i> | 4,56 | 5,22 | 3,51 | 3,19 | 0,519 | 0,594 | 0,364 |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 3,32 | 3,92 | 3,94 | 0,58 | 0,367 | 0,433 | 0,067 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 3,85 | 4,47 | 3,94 | 0,88 | 0,411 | 0,477 | 0,096 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 4,18 | 4,81 | 3,93 | 1,17 | 0,439 | 0,506 | 0,125 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 4,41 | 5,03 | 3,97 | 1,45 | 0,463 | 0,528 | 0,153 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 4,58 | 5,19 | 3,97 | 1,75 | 0,482 | 0,546 | 0,185 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 4,70 | 5,32 | 3,96 | 2,04 | 0,496 | 0,561 | 0,216 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 4,81 | 5,45 | 3,96 | 2,33 | 0,508 | 0,575 | 0,247 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 4,85 | 5,51 | 3,96 | 2,63 | 0,518 | 0,589 | 0,282 |
| <i>afc9-aqr4</i>  | 4,83 | 5,48 | 3,94 | 2,91 | 0,525 | 0,597 | 0,318 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 4,88 | 5,55 | 3,95 | 3,21 | 0,534 | 0,608 | 0,353 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M7 – Resultados dos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para

$$T_h = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento       | qh [kW] | qc [kW] | u(qh) [kW] | u(qc) [kW] | Uah [kW/°C] | Uac [kW/°C] | u(UAc) [kW/°C] |
|-------------------|---------|---------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 4,55    | 4,84    | 1,70       | 0,57       | 0,355       | 0,378       | 0,046          |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 5,09    | 5,37    | 1,70       | 0,86       | 0,387       | 0,408       | 0,066          |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 5,45    | 5,76    | 1,69       | 1,16       | 0,408       | 0,431       | 0,087          |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 5,69    | 5,99    | 1,69       | 1,44       | 0,424       | 0,446       | 0,108          |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 5,90    | 6,20    | 1,69       | 1,74       | 0,438       | 0,460       | 0,130          |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 6,06    | 6,37    | 1,69       | 2,03       | 0,449       | 0,471       | 0,151          |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 6,20    | 6,50    | 1,69       | 2,32       | 0,458       | 0,480       | 0,172          |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 6,24    | 6,56    | 1,68       | 2,59       | 0,464       | 0,487       | 0,193          |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 6,34    | 6,64    | 1,70       | 2,90       | 0,473       | 0,495       | 0,217          |
| <i>afc10-aqr1</i> | 6,41    | 6,73    | 1,69       | 3,19       | 0,478       | 0,502       | 0,239          |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 4,79    | 5,21    | 2,47       | 0,58       | 0,376       | 0,408       | 0,047          |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 5,42    | 5,85    | 2,46       | 0,87       | 0,413       | 0,446       | 0,067          |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 5,79    | 6,22    | 2,47       | 1,16       | 0,438       | 0,471       | 0,089          |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 6,00    | 6,43    | 2,47       | 1,45       | 0,458       | 0,491       | 0,112          |

|                   |      |      |      |      |       |       |       |
|-------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|
| <i>afc5-aqr2</i>  | 6,19 | 6,61 | 2,48 | 1,75 | 0,475 | 0,507 | 0,135 |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 6,40 | 6,82 | 2,50 | 2,04 | 0,490 | 0,522 | 0,157 |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 6,57 | 6,97 | 2,50 | 2,32 | 0,501 | 0,531 | 0,178 |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 6,64 | 7,08 | 2,49 | 2,59 | 0,507 | 0,540 | 0,198 |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 6,75 | 7,17 | 2,49 | 2,92 | 0,516 | 0,548 | 0,224 |
| <i>afc10-aqr2</i> | 6,87 | 7,31 | 2,50 | 3,19 | 0,523 | 0,556 | 0,244 |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 4,89 | 5,36 | 3,31 | 0,57 | 0,388 | 0,425 | 0,047 |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 5,55 | 6,04 | 3,29 | 0,86 | 0,427 | 0,465 | 0,068 |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 6,01 | 6,52 | 3,30 | 1,16 | 0,456 | 0,494 | 0,089 |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 6,33 | 6,81 | 3,30 | 1,43 | 0,477 | 0,513 | 0,109 |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 6,57 | 7,10 | 3,30 | 1,72 | 0,493 | 0,533 | 0,130 |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 6,81 | 7,36 | 3,33 | 2,03 | 0,509 | 0,550 | 0,152 |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 6,94 | 7,48 | 3,33 | 2,32 | 0,521 | 0,561 | 0,175 |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 7,02 | 7,59 | 3,34 | 2,61 | 0,529 | 0,572 | 0,197 |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 7,11 | 7,67 | 3,34 | 2,88 | 0,538 | 0,580 | 0,219 |
| <i>afc10-aqr3</i> | 7,24 | 7,81 | 3,35 | 3,18 | 0,547 | 0,590 | 0,241 |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 4,93 | 5,54 | 4,11 | 0,58 | 0,382 | 0,429 | 0,047 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 5,70 | 6,33 | 4,10 | 0,87 | 0,427 | 0,474 | 0,067 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 6,17 | 6,84 | 4,09 | 1,18 | 0,458 | 0,507 | 0,089 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 6,37 | 7,03 | 4,08 | 1,44 | 0,479 | 0,529 | 0,110 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 6,54 | 7,18 | 4,12 | 1,75 | 0,500 | 0,549 | 0,135 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 6,75 | 7,41 | 4,12 | 2,02 | 0,514 | 0,564 | 0,155 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 6,93 | 7,61 | 4,12 | 2,33 | 0,527 | 0,578 | 0,178 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 7,08 | 7,76 | 4,13 | 2,60 | 0,538 | 0,589 | 0,198 |
| <i>afc9-aqr4</i>  | 7,21 | 7,90 | 4,12 | 2,91 | 0,548 | 0,600 | 0,222 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 7,29 | 8,00 | 4,12 | 3,19 | 0,554 | 0,609 | 0,244 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M8 – Resultados dos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para

$$T_h = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento       | qh [kW] | qfc[kW] | u(qh)<br>[kW] | u(qc)<br>[kW] | Uah<br>[kW/°C] | Uac<br>[kW/°C] | u(UAc)<br>[kW/°C] |
|-------------------|---------|---------|---------------|---------------|----------------|----------------|-------------------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 5,57    | 5,90    | 1,53          | 0,58          | 0,331          | 0,351          | 0,036             |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 6,48    | 6,84    | 1,53          | 0,87          | 0,369          | 0,390          | 0,050             |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 6,67    | 7,01    | 1,53          | 1,16          | 0,394          | 0,414          | 0,069             |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 7,01    | 7,39    | 1,58          | 1,44          | 0,416          | 0,439          | 0,086             |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 7,15    | 7,52    | 1,57          | 1,74          | 0,430          | 0,453          | 0,105             |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 7,34    | 7,74    | 1,57          | 2,04          | 0,441          | 0,465          | 0,123             |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 7,50    | 7,91    | 1,58          | 2,39          | 0,453          | 0,478          | 0,145             |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 7,61    | 8,03    | 1,58          | 2,58          | 0,456          | 0,482          | 0,155             |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 7,74    | 8,13    | 1,58          | 2,85          | 0,465          | 0,488          | 0,172             |
| <i>afc10-aqr1</i> | 7,98    | 8,29    | 1,57          | 3,18          | 0,467          | 0,485          | 0,187             |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 6,31    | 6,80    | 2,36          | 0,57          | 0,377          | 0,406          | 0,036             |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 7,22    | 7,71    | 2,36          | 0,85          | 0,414          | 0,442          | 0,050             |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 7,77    | 8,23    | 2,36          | 1,15          | 0,443          | 0,469          | 0,067             |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 8,13    | 8,63    | 2,36          | 1,44          | 0,461          | 0,489          | 0,082             |

|                   |      |       |      |      |       |       |       |
|-------------------|------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| <i>afc5-aqr2</i>  | 8,42 | 8,97  | 2,35 | 1,76 | 0,476 | 0,507 | 0,100 |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 8,65 | 9,18  | 2,35 | 2,00 | 0,488 | 0,518 | 0,113 |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 8,82 | 9,36  | 2,36 | 2,30 | 0,499 | 0,529 | 0,131 |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 8,93 | 9,49  | 2,35 | 2,59 | 0,508 | 0,539 | 0,148 |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 9,11 | 9,63  | 2,35 | 2,83 | 0,516 | 0,545 | 0,161 |
| <i>afc10-aqr2</i> | 8,98 | 9,41  | 2,37 | 3,18 | 0,523 | 0,547 | 0,186 |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 6,49 | 7,02  | 3,15 | 0,56 | 0,390 | 0,422 | 0,036 |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 7,55 | 8,09  | 3,16 | 0,86 | 0,430 | 0,461 | 0,051 |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 8,11 | 8,72  | 3,14 | 1,18 | 0,457 | 0,491 | 0,067 |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 8,43 | 9,04  | 3,13 | 1,45 | 0,479 | 0,513 | 0,083 |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 8,55 | 9,18  | 3,11 | 1,73 | 0,495 | 0,531 | 0,101 |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 8,77 | 9,41  | 3,14 | 2,02 | 0,510 | 0,547 | 0,118 |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 9,07 | 9,69  | 3,16 | 2,32 | 0,525 | 0,561 | 0,135 |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 9,26 | 9,90  | 3,16 | 2,62 | 0,535 | 0,573 | 0,152 |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 9,46 | 10,10 | 3,16 | 2,90 | 0,545 | 0,582 | 0,167 |
| <i>afc10-aqr3</i> | 9,22 | 9,74  | 3,15 | 3,19 | 0,552 | 0,582 | 0,191 |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 6,40 | 7,02  | 3,98 | 0,56 | 0,401 | 0,440 | 0,037 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 7,36 | 7,92  | 3,98 | 0,85 | 0,444 | 0,478 | 0,052 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 7,93 | 8,52  | 3,95 | 1,14 | 0,472 | 0,507 | 0,069 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 8,40 | 8,99  | 3,96 | 1,43 | 0,496 | 0,531 | 0,085 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 8,72 | 9,31  | 3,95 | 1,72 | 0,513 | 0,548 | 0,102 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 8,96 | 9,60  | 3,95 | 2,02 | 0,527 | 0,564 | 0,119 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 9,10 | 9,75  | 3,94 | 2,30 | 0,538 | 0,576 | 0,137 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 9,27 | 9,91  | 3,94 | 2,58 | 0,548 | 0,586 | 0,153 |
| <i>afc9-aqr4</i>  | 9,40 | 10,05 | 3,93 | 2,86 | 0,555 | 0,593 | 0,169 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 9,72 | 10,41 | 3,95 | 3,21 | 0,565 | 0,605 | 0,187 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M9 – Resultados dos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo para

$$T_h = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

| Experimento       | qh [kW] | qc [kW] | u(qh) [kW] | u(qc) [kW] | Uah [kW/°C] | Uac [kW/°C] | u(UAc) [kW/°C] |
|-------------------|---------|---------|------------|------------|-------------|-------------|----------------|
| <i>afc1-aqr1</i>  | 6,76    | 7,33    | 1,52       | 0,56       | 0,329       | 0,357       | 0,029          |
| <i>afc2-aqr1</i>  | 7,78    | 8,29    | 1,52       | 0,86       | 0,369       | 0,394       | 0,041          |
| <i>afc3-aqr1</i>  | 8,32    | 8,75    | 1,52       | 1,15       | 0,394       | 0,415       | 0,055          |
| <i>afc4-aqr1</i>  | 8,59    | 9,09    | 1,51       | 1,44       | 0,407       | 0,431       | 0,069          |
| <i>afc5-aqr1</i>  | 8,88    | 9,33    | 1,52       | 1,72       | 0,422       | 0,444       | 0,082          |
| <i>afc6-aqr1</i>  | 9,13    | 9,58    | 1,52       | 2,01       | 0,432       | 0,454       | 0,096          |
| <i>afc7-aqr1</i>  | 9,31    | 9,83    | 1,52       | 2,29       | 0,439       | 0,464       | 0,109          |
| <i>afc8-aqr1</i>  | 9,51    | 9,94    | 1,52       | 2,57       | 0,449       | 0,469       | 0,122          |
| <i>afc9-aqr1</i>  | 9,68    | 10,16   | 1,52       | 2,88       | 0,456       | 0,479       | 0,136          |
| <i>afc10-aqr1</i> | 9,86    | 10,12   | 1,53       | 3,13       | 0,472       | 0,485       | 0,150          |
| <i>afc1-aqr2</i>  | 7,55    | 8,19    | 2,30       | 0,55       | 0,373       | 0,405       | 0,029          |
| <i>afc2-aqr2</i>  | 8,49    | 9,14    | 2,28       | 0,83       | 0,409       | 0,440       | 0,041          |
| <i>afc3-aqr2</i>  | 9,25    | 9,84    | 2,28       | 1,12       | 0,437       | 0,465       | 0,054          |
| <i>afc4-aqr2</i>  | 9,69    | 10,26   | 2,28       | 1,41       | 0,457       | 0,483       | 0,067          |

|                   |       |       |      |      |       |       |       |
|-------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| <i>afc5-aqr2</i>  | 10,05 | 10,66 | 2,27 | 1,72 | 0,472 | 0,500 | 0,081 |
| <i>afc6-aqr2</i>  | 10,20 | 10,86 | 2,26 | 1,99 | 0,482 | 0,513 | 0,094 |
| <i>afc7-aqr2</i>  | 10,35 | 10,97 | 2,26 | 2,28 | 0,493 | 0,523 | 0,109 |
| <i>afc8-aqr2</i>  | 10,53 | 11,15 | 2,26 | 2,57 | 0,502 | 0,532 | 0,123 |
| <i>afc9-aqr2</i>  | 10,70 | 11,34 | 2,26 | 2,88 | 0,509 | 0,540 | 0,138 |
| <i>afc10-aqr2</i> | 11,30 | 11,70 | 2,26 | 3,15 | 0,527 | 0,546 | 0,147 |
| <i>afc1-aqr3</i>  | 7,45  | 8,26  | 3,02 | 0,57 | 0,380 | 0,421 | 0,030 |
| <i>afc2-aqr3</i>  | 8,63  | 9,36  | 3,02 | 0,85 | 0,423 | 0,459 | 0,043 |
| <i>afc3-aqr3</i>  | 9,46  | 10,13 | 3,01 | 1,15 | 0,457 | 0,489 | 0,056 |
| <i>afc4-aqr3</i>  | 10,03 | 10,69 | 3,01 | 1,42 | 0,478 | 0,510 | 0,069 |
| <i>afc5-aqr3</i>  | 10,51 | 11,18 | 3,02 | 1,70 | 0,496 | 0,527 | 0,081 |
| <i>afc6-aqr3</i>  | 10,90 | 11,65 | 3,02 | 1,99 | 0,509 | 0,544 | 0,094 |
| <i>afc7-aqr3</i>  | 11,36 | 12,02 | 3,02 | 2,28 | 0,523 | 0,554 | 0,105 |
| <i>afc8-aqr3</i>  | 11,62 | 12,34 | 3,03 | 2,56 | 0,532 | 0,565 | 0,118 |
| <i>afc9-aqr3</i>  | 11,84 | 12,61 | 3,03 | 2,86 | 0,540 | 0,576 | 0,131 |
| <i>afc10-aqr3</i> | 12,02 | 12,51 | 2,97 | 3,14 | 0,554 | 0,577 | 0,145 |
| <i>afc1-aqr4</i>  | 8,28  | 8,87  | 3,74 | 0,56 | 0,403 | 0,432 | 0,029 |
| <i>afc2-aqr4</i>  | 9,57  | 10,13 | 3,73 | 0,84 | 0,446 | 0,472 | 0,041 |
| <i>afc3-aqr4</i>  | 10,35 | 10,97 | 3,71 | 1,14 | 0,476 | 0,505 | 0,054 |
| <i>afc4-aqr4</i>  | 10,74 | 11,37 | 3,70 | 1,43 | 0,498 | 0,527 | 0,067 |
| <i>afc5-aqr4</i>  | 11,09 | 11,67 | 3,70 | 1,72 | 0,516 | 0,543 | 0,081 |
| <i>afc6-aqr4</i>  | 11,35 | 11,96 | 3,74 | 2,00 | 0,532 | 0,560 | 0,095 |
| <i>afc7-aqr4</i>  | 11,67 | 12,23 | 3,74 | 2,30 | 0,545 | 0,571 | 0,108 |
| <i>afc8-aqr4</i>  | 11,85 | 12,47 | 3,73 | 2,56 | 0,552 | 0,581 | 0,120 |
| <i>afc9-aqr4</i>  | 12,21 | 12,78 | 3,74 | 2,86 | 0,565 | 0,591 | 0,133 |
| <i>afc10-aqr4</i> | 12,38 | 12,97 | 3,74 | 3,14 | 0,572 | 0,599 | 0,146 |

Fonte: Autor (2025).

Tabela M10 – Resultados dos experimentos água quente no ramal reto e fria no complexo  
para  $T_h = 50\text{ °C}$

| Experimento      | q <sub>h</sub> [kW] | q <sub>c</sub> [kW] | u(q <sub>h</sub> )<br>[kW] | u(q <sub>c</sub> )<br>[kW] | U <sub>ah</sub><br>[kW/°C] | U <sub>ac</sub><br>[kW/°C] | u(UAc)<br>[kW/°C] |
|------------------|---------------------|---------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------|
| <i>afc1-aqr1</i> | 8,90                | 9,49                | 1,45                       | 0,56                       | 0,344                      | 0,367                      | 0,023             |
| <i>afc2-aqr1</i> | 9,90                | 10,45               | 1,45                       | 0,84                       | 0,374                      | 0,395                      | 0,033             |
| <i>afc3-aqr1</i> | 10,60               | 11,11               | 1,45                       | 1,13                       | 0,397                      | 0,416                      | 0,043             |
| <i>afc4-aqr1</i> | 10,80               | 11,38               | 1,43                       | 1,43                       | 0,409                      | 0,431                      | 0,054             |
| <i>afc5-aqr1</i> | 11,05               | 11,68               | 1,43                       | 1,72                       | 0,419                      | 0,444                      | 0,066             |
| <i>afc6-aqr1</i> | 11,35               | 11,93               | 1,43                       | 2,02                       | 0,432                      | 0,455                      | 0,077             |
| <i>afc7-aqr1</i> | 11,45               | 12,05               | 1,43                       | 2,30                       | 0,439                      | 0,462                      | 0,088             |
| <i>afc8-aqr1</i> | 11,60               | 12,19               | 1,43                       | 2,56                       | 0,447                      | 0,469                      | 0,099             |
| <i>afc9-aqr1</i> | 11,69               | 12,33               | 1,43                       | 2,92                       | 0,452                      | 0,477                      | 0,113             |
| <i>afc1-aqr2</i> | 9,60                | 10,31               | 2,13                       | 0,56                       | 0,371                      | 0,399                      | 0,023             |
| <i>afc2-aqr2</i> | 10,83               | 11,56               | 2,10                       | 0,84                       | 0,407                      | 0,435                      | 0,033             |
| <i>afc3-aqr2</i> | 11,56               | 12,24               | 2,10                       | 1,15                       | 0,436                      | 0,461                      | 0,044             |
| <i>afc4-aqr2</i> | 12,07               | 12,76               | 2,17                       | 1,43                       | 0,457                      | 0,483                      | 0,055             |
| <i>afc5-aqr2</i> | 12,35               | 13,03               | 2,19                       | 1,72                       | 0,474                      | 0,500                      | 0,066             |

|                  |       |       |      |      |       |       |       |
|------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| <i>afc6-aqr2</i> | 12,42 | 13,10 | 2,16 | 2,00 | 0,482 | 0,509 | 0,078 |
| <i>afc7-aqr2</i> | 12,54 | 13,23 | 2,17 | 2,29 | 0,493 | 0,520 | 0,091 |
| <i>afc8-aqr2</i> | 12,46 | 13,17 | 2,19 | 2,57 | 0,501 | 0,530 | 0,104 |
| <i>afc9-aqr2</i> | 12,38 | 13,13 | 2,19 | 2,87 | 0,508 | 0,538 | 0,118 |

Fonte: Autor (2025).