

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

**Estudo Teórico e Experimental da Estratificação
Térmica Monofásica em Tubulações Horizontais**

Autor: Hugo Cesar Rezende
Orientadora: Dra. Elizabete Jordão
Co-orientador: Dr. Moisés Alberto Navarro

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo
Abril de 2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

R339e	<p>Rezende, Hugo Cesar Estudo teórico e experimental da estratificação térmica monofásica em tubulações horizontais / Hugo Cesar Rezende. -- Campinas, SP: [s.n.], 2012.</p> <p>Orientadores: Elizabete Jordão Coorientador: Moysés Alberto Navarro. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.</p> <p>1. Reatores a água pressurizada. 2. Estratificação térmica. 3. Tubulações. 4. Mixing. 5. Fluidodinâmica computacional CFD. I. Jordão, Elizabete. II. Navarro, Moysés Alberto. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.</p>
-------	--

Título em Inglês: Theoretical and experimental investigation on single phase thermal stratification in horizontal piping system

Palavras-chave em Inglês: Pressurized water reactors, Thermal stratification, Piping, Mixing, Computacional fluid dynamics (CFD)

Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

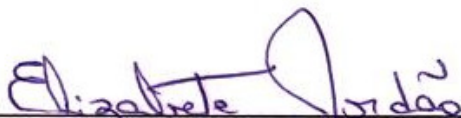
Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Vanderley de Vasconcelos, Delvonei Alves de Andrade, Amir Zacarias Mesquita, Elias Basile Tambourgi

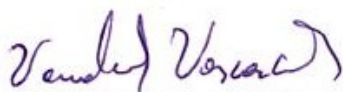
Data da defesa: 27-04-12

Programa de Pós Graduação: Engenharia Química

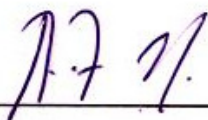
Tese de Doutorado defendida por *Hugo Cesar Rezende* em 27 de abril de 2012 e aprovada pela banca examinadora constituída pelos doutores:



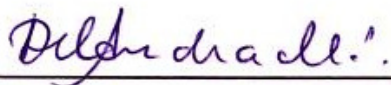
Prof. Dra. – Orientadora *Elizabeth Jordão*
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP



Prof. Dr. *Vanderley de Vasconcelos*
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN



Dr. *Amir Zacarias Mesquita*
Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN

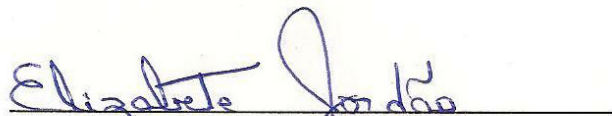


Prof. Dr. *Delvonei Alves de Andrade*
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN



Prof. Dr. *Elias Basile Tambourgi*
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Esta cópia corresponde à versão final da Tese de Doutorado: “**Estudo Teórico e Experimental da Estratificação Térmica Monofásica em Tubulações Horizontais**”, defendida por Hugo Cesar Rezende em 27 de abril de 2012.

A handwritten signature in blue ink, reading "Elizabete Jordão", is written over a horizontal line.

Prof. Dr. – Orientador *Elizabete Jordão*

Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

*Aos meus queridos pais,
Maria José e Hugo,
por todo o amor e
uma vida de dedicação.*

AGRADECIMENTOS

À Dra. Elizabete Jordão pela orientação e confiança na realização deste trabalho.

Ao Dr. Moysés Alberto Navarro, co-orientador, pela dedicação e apoio geral.

Ao Eng. André Augusto Campagnole dos Santos, pela ajuda na modelagem numérica.

Ao Dr. Ramon Molina Valle, professor do Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG - DEMEC, pelo apoio e disponibilização de recursos técnicos do DEMEC.

Aos colegas Dielson Alves Bispo, Geraldo Antônio Scoralick Martins, Antônio Romualdo Cordeiro, Paulo Antônio da Silva e Omar Cícero Felix, pela ajuda na montagem e operação da Instalação de Testes de Estratificação Térmica (ITET).

Aos estagiários Josué Alceu de Abreu, Juliano Lanza Conceição, Sofia Rodrigues de Sá Possenato, João Paulo de Andrade Ferreira, Felipe Lucas Ferreira dos Santos e Fernanda Pereira Guimarães, pela grande colaboração recebida.

Aos especialistas da Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, Dr. Pekka Nurkala, Dr. Heinz Günter Sonnenburg e Dr. Alexander V. Selesnev, pelo suporte técnico.

Ao Dr. Roberto Francisco Di Lorenzo pelo apoio junto à AIEA e, também, junto aos especialistas internacionais.

À direção da Comissão Nacional de Energia Nuclear e do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

À Agência Internacional de Energia Atômica – AIEA, pelo suporte financeiro para a construção da Instalação de Testes de Estratificação Térmica (ITET) e para às visitas técnicas de especialistas internacionais.

À Maria da Glória Gonçalves Ribeiro, secretária do SETRE.

À equipe de engenharia de projetos do SETRE.

Aos demais colegas do Serviço de Tecnologia de Reatores do CDTN.

Aos professores e colegas da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O escoamento monofásico termicamente estratificado ocorre em tubulações horizontais onde duas camadas diferentes de um mesmo líquido escoam separadamente, sem que ocorra mistura significativa entre as camadas, devido às baixas velocidades e à diferença de densidade (e temperatura). As consequências desse fenômeno não foram consideradas no projeto da maioria das centrais nucleares atualmente em operação. Entretanto, em alguns componentes de centrais nucleares, as diferenças de temperatura podem atingir cerca de 200 °C em uma região bastante estreita nas proximidades da interface entre as camadas de água fria e quente. Nesta condição, as fortes tensões geradas pelas diferenças de dilatação podem comprometer a integridade estrutural e a vida útil de tubulações relacionadas aos sistemas de segurança dessas centrais nucleares

Com o objetivo de estudar o fenômeno da estratificação foi projetada e construída a Instalação de Testes de Estratificação Térmica (ITET), tendo sido realizada uma série de experimentos simulando o bocal de injeção do gerador de vapor de uma central nuclear tipo PWR. Foram estudadas a evolução e as configurações de escoamento em regime de estratificação térmica, assim como a influência do número de Froude nos gradientes de temperatura, na posição da interface entre as camadas de água fria e de água quente e no aparecimento de oscilações desta interface. Os experimentos foram realizados com número de Froude variando de 0,02 a 0,4.

São apresentados a metodologia e os resultados dos experimentos, assim como de sua modelagem numérica. As simulações numéricas foram realizadas utilizando-se o código comercial de fluidodinâmica computacional CFX 13.0. Foi considerado um plano de simetria vertical ao longo do comprimento do tubo, de forma a reduzir o domínio geométrico à metade, reduzindo o tamanho da malha e o tempo de processamento. Foram solucionadas as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), as duas equações do modelo de turbulência RNG $k-\epsilon$, com funções de parede escaláveis e o modelo de empuxo completo. A simulação numérica apresentou boa concordância com os dados experimentais e confirmou a ocorrência da estratificação térmica e da flutuação da interface sobe as condições simuladas.

PALAVRAS CHAVE:

Reatores a água pressurizada, Estratificação térmica, Tubulações, Mistura, Fluidodinâmica Computacional (CFD)

ABSTRACT

One phase thermally stratified flows occur when two different layers of the same liquid at different temperatures flow separately in horizontal pipes without appreciable mixing due to the low velocities and difference in density (and temperature). The phenomenon was not considered in the design stage of most of the operating nuclear power plants. However, temperature differences of about 200 °C have been found in a narrow band around the hot and cold water interface in components under stratified flows. Loadings due to this phenomenon affected the integrity of safety related piping systems.

The Thermal Stratification Test Facility (ITET), built to allow the experimental simulation of the thermal stratification, is presented so as the results of some experiments simulating one phase thermally stratified flows in geometry and flow condition similar to a nuclear reactor steam generator nozzle. They have the objective of studying the flow configurations and understanding the evolution of the of thermal stratification process. The driving parameter considered to characterize flow under stratified regime due to difference in specific masses is the Froude number. Different Froude numbers, from 0.02 to 0.4, were obtained in different testes by setting injection cold water flow rates and hot water initial temperatures as planned in the test matrix. Results are presented showing the influence of Froude number on the hot and cold water interface position, temperature gradients and striping phenomenon.

Numerical simulations of these experiments were performed with the commercial finite volume Computational Fluid Dynamic code CFX 13.0. A vertical symmetry plane along the pipe was adopted to reduce the geometry in one half, reducing the mesh size and minimizing processing time. The Reynolds Averaged Navier Stokes equations (RANS), the two RNG $k-\varepsilon$ turbulence model equations with scalable wall function and the full buoyancy model were used in the simulation. The numerical results presented a satisfactory agreement with the experimental data and confirmed the occurrence of thermal stratification and striping under the simulated conditions.

KEYWORDS:

Pressurized water reactors, Thermal stratification, Piping, Mixing, Computacional fluid dynamics (CFD)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Descrição do Fenômeno da Estratificação Térmica em Tubulações	1
1.2. O Fenômeno da Estratificação Térmica nos Reatores Nucleares	3
1.3. Justificativa e Relevância.....	5
1.4. Metas e Objetivos	6
1.5. O Experimento Desenvolvido.....	8
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. Aspectos Gerais da Estratificação Térmica	11
2.2. A Estratificação Térmica nas Centrais Nucleares.....	12
2.2.1. <i>Estratificação Térmica, Flutuação da Interface e Ciclos de Carga Térmica.....</i>	<i>12</i>
2.2.2. <i>A Estratificação Térmica em Reatores Rápidos a Metal Líquido.....</i>	<i>13</i>
2.2.3. <i>A Estratificação Térmica em Reatores a Água Leve</i>	<i>15</i>
2.2.4. <i>Estudos da Estratificação Térmica em Reatores a Água Leve com enfoque estrutural ...</i>	<i>22</i>
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	25
3.1. A Instalação Experimental DTLES.....	25
3.2. O Projeto da Seção de Testes	26
3.3. A Instrumentação e o Sistema de Coleta de Dados	30
3.3.1. <i>As Medidas de Temperatura na Seção de Testes</i>	<i>30</i>
3.3.2. <i>Demais Medidas.....</i>	<i>44</i>
3.3.3. <i>O Sistema de Coleta de Dados.....</i>	<i>45</i>
3.4. Calibração dos Instrumentos e Análise de Incertezas.....	52
3.5. A Matriz de Testes.....	54
4. O MODELO NUMÉRICO	57
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	63
5.1. A Matriz de Testes Realizada.....	63
5.2. Tratamento Inicial dos Dados Experimentais	65
5.2.1. <i>Definição do Instante Zero</i>	<i>65</i>
5.2.2. <i>Restrição à Duração dos Experimentos.....</i>	<i>66</i>
5.2.3. <i>Resultados das Medidas de Temperatura</i>	<i>68</i>
5.2.4. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2159.....</i>	<i>71</i>
5.2.5. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2019.....</i>	<i>80</i>
5.2.6. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2069.....</i>	<i>87</i>
5.2.7. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2212.....</i>	<i>96</i>
5.2.8. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 1110.....</i>	<i>105</i>
5.2.9. <i>Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 1436.....</i>	<i>114</i>
5.3. Detecção da Oscilação da Interface entre a Água Fria e a Água Quente.....	122

5.4. Gradientes de Temperatura	124
5.4.1. <i>Gradientes de temperatura obtidos experimentalmente</i>	124
5.4.2. <i>Gradientes de temperatura em função do número de Froude</i>	126
5.4.3. <i>Gradientes adimensionais de temperatura</i>	129
6. RESULTADOS NUMÉRICOS	133
6.1. Resultados da Simulação de Três Experimentos.....	133
6.2. A Condição de Mistura	145
7. CONCLUSÃO	151
REFERÊNCIAS	153
ANEXO A - CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES	161
ANEXO B - CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDA DE VAZÃO	169
ANEXO C - CALIBRAÇÃO DA LINHA DE MEDIDA DE PRESSÃO	183

FIGURAS

Figura 1.1 - Efeitos da estratificação térmica.....	2
Figura 1.2 - Desenho Esquemático dos Circuitos Primário e Secundário de um Reator a Água Pressurizada.....	3
Figura 1.3 - Estratificação térmica no bocal de alimentação de um gerador de vapor.....	4
Figura 2.1 - Circuito primário do Reator Rápido Europeu a Chumbo Líquido – ELSY [Alemberti et al., 2011].....	14
Figura 2.2 – Detalhe de uma das seções de testes do experimento HDR, representando o bocal de injeção do vaso de pressão do reator [Häfner, 1990].	19
Figura 2.3 – Seção de testes de um experimento desenvolvido pela Siemens – KWU [Lenz et al., 1990].	20
Figura 2.4 – Dispositivo desenvolvido pela FRAMATOME para a prevenção da estratificação no bocal de injeção do gerador de vapor [Poussain e Holcblat, 1995].....	21
Figura 3.1 – Vista geral do DTLES.....	26
Figura 3.2 – Fluxograma do DTLES anterior às modificações introduzidas para os testes de estratificação térmica.....	27
Figura 3.3 - Diagrama simplificado do DTLES para os experimentos de estratificação.	28
Figura 3.4 - Seção de testes de estratificação térmica monofásica.....	31
Figura 3.5 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 1.	33
Figura 3.6 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 2.	34
Figura 3.7 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 3.	35
Figura 3.8 – Detalhe do método utilizado para a brasagem dos termopares de fluido e parede.	36
Figura 3.9 – Desenho esquemático das sondas verticais de cada estação de medição.	38
Figura 3.10 – Corte da seção de testes, mostrando a região onde se buscou a ocorrência da interface entre a água fria e a quente, e a amplitude esperada de oscilação da mesma.....	39
Figura 3.11 – Desenho isométrico da conexão para a brasagem de conjuntos de cinco termopares.	41
Figura 3.12 – Fotografia do tubo da seção de testes após a brasagem dos termopares.....	42
Figura 3.13 – Detalhe da Estação de Medição 1 após a brasagem dos termopares.....	42
Figura 3.14 – Detalhe dos termopares de fluido da Estação de Medição 1, vistos do interior da seção de testes.	43
Figura 3.15 – Vista parcial do DTLES durante a montagem da seção de testes de estratificação térmica.....	43
Figura 3.16 – Conexão das placas e computador do sistema de coleta de dados.	47
Figura 4.1. Modelo do domínio computacional e condições de contorno.....	57
Figura 4. 2. Detalhes de duas malhas, simplificada (à esquerda) e completa (à direita), utilizadas nas simulações que permitiram chegar à malha simplificada.....	58
Figura 4.3. Malha utilizada na tentativa de se excluir o vaso de pressão do domínio de solução.....	59
Figura 4.4. Malha utilizada nas simulações numéricas, com detalhes de refinamento no ponto de injeção de água fria e nos orifícios de saída do tubo horizontal para o vaso de pressão.....	60
Figura 5.1 – Evolução das temperaturas na Estação de Medição A durante o Experimento 2159, a partir da inversão da válvula V4.	66
Figura 5.2 – Evolução da pressão durante o Experimento 2159.	67
Figura 5.3 – Evolução da vazão durante o Experimento 2159.....	67
Figura 5.4 – Posição dos termopares da Estação de Medição 1.....	69
Figura 5.5 – Posição dos termopares da Estação de Medição 2.....	70
Figura 5.6 – Posição dos termopares da Estação de Medição 3.....	71
Figura 5.7 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.	72

Figura 5.8 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.	73
Figura 5.9 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.	73
Figura 5.10 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2159.	75
Figura 5.12 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2159.	76
Figura 5.14 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.	78
Figura 5.15 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.	78
Figura 5.16 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.	79
Figura 5.17 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.	80
Figura 5.18 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.	81
Figura 5.19 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.	82
Figura 5.20 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.	83
Figura 5.21 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.	84
Figura 5.22 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.	84
Figura 5.23 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.	85
Figura 5.24 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.	86
Figura 5.25 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.	86
Figura 5.26 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero durante o Experimento 2019.	87
Figura 5.27 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.	88
Figura 5.28 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.	89
Figura 5.29 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.	90
Figura 5.30 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.	91
Figura 5.31 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.	92
Figura 5.32 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.	92
Figura 5.33 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.	93
Figura 5.34 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.	94
Figura 5.35 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.	95

Figura 5.36 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.	96
Figura 5.37 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.	97
Figura 5.38 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.	98
Figura 5.39 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.	99
Figura 5.40 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.	100
Figura 5.41 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.	101
Figura 5.42 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.	102
Figura 5.43 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.	103
Figura 5.44 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.	104
Figura 5.45 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.	104
Figura 5.46 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.	105
Figura 5.47 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.	106
Figura 5.48 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.	107
Figura 5.49 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.	108
Figura 5.50 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.	109
Figura 5.51 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.	110
Figura 5.52 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.	111
Figura 5.53 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.	112
Figura 5.54 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.	113
Figura 5.55 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.	113
Figura 5.56 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.	114
Figura 5.57 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.	115
Figura 5.58 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.	116
Figura 5.59 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.	117
Figura 5.60 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.	118

Figura 5.61 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.	119
Figura 5.62 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.	119
Figura 5.63 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.	120
Figura 5.64 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.	121
Figura 5.65 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.	121
Figura 5.66 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.	122
Figura 5.67 – Caracterização da oscilação da interface entre a água fria e a água quente na sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.	123
Figura 5.68 – Caracterização da oscilação da interface entre a água fria e a água quente próximo da parede na Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.	124
Figura 5.69 - Evolução da diferença de temperatura entre termopares vizinhos, na sonda vertical da Estação de Medição 1, durante o Experimento 2159.	125
Figura 5.70 - Distribuição de temperatura medida ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1, no instante 76 s.	126
Figura 5.71 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais das estações de medição, em função do número de Froude, para os testes à pressão de 21 bar.	127
Figura 5.72 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais das estações de medição, em função do número de Froude, para os testes à pressão de 10,5 bar.	127
Figura 5.73 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 1, em função do número de Froude.	128
Figura 5.74 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 2, em função do número de Froude.	128
Figura 5.75 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 3, em função do número de Froude.	129
Figura 5.76 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 1, em função do número de Froude.	130
Figura 5.77 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 2, em função do número de Froude.	131
Figura 5.78 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 3, em função do número de Froude.	131
Figura 6.1 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2069 (0,354 kg/s).	134
Figura 6.2 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2146 (0,758 kg/s).	135
Figura 6.3 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2212 (1,095 kg/s).	135
Figura 6.4 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2069 (0,354 kg/s).	137
Figura 6.5 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2146 (0,758 kg/s).	137
Figura 6.6 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2212 (1,095 kg/s).	138
Figura 6.7 – Distribuição de temperatura em diferentes instantes durante o Experimento 2146, realizado à vazão de 0,758 kg/s.	139

Figura 6.8 - Perfis de velocidade e vetores de visualização em diferentes instantes, para o Experimento 2146, realizado à vazão 0,758 kg/s.	140
Figura 6.9 - Perfis de velocidade e temperatura para diferentes instantes, para o Experimento 2146, realizado à vazão de 0,758 kg/s.....	141
Figura 6.10 – Evolução das temperaturas nas posições superiores das sondas verticais das Estações de Medição 1 e 2, para o experimento 2069 (0,354 kg/s).....	142
Figura 6.11 – Evolução das temperaturas nas posições superiores das Estações de Medição 1 e 2, para o experimento 2146 (0,758 kg/s).....	143
Figura 6.12 – Distribuição de temperatura ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1.	144
Figura 6.13 – Evolução das temperaturas na cota 0 da Estação de Medição 2, para o experimento 2146 (vazão de 0,758 kg/s).	145
Figura 6.14 - Distribuição de temperatura em instantes escolhidos de cada experimento.	147
Figura 6.15 - Distribuição de temperatura na seção transversal do tubo na Estação de Medição 2 para as diferentes vazões.....	147
Figura 6.16 - Evolução da diferença de temperatura média entre as regiões superiores e inferiores do tubo (DT), para as diversas vazões.....	148

TABELAS

Tabela 3.1 – Sensores e transdutores da seção de testes e do circuito.	45
Tabela 3.2 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 0, com Ganho 200.	48
Tabela 3.3 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 1, com Ganho 200.	49
Tabela 3.4 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 2, com Ganho 200.	49
Tabela 3.5 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 3, com Ganho 200.	50
Tabela 3.6 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 4, com Ganho 200.	50
Tabela 3.7 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 5, com Ganho 200.	51
Tabela 3.8 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 6, com Ganho 1.	51
Tabela 3.9 – Variação dos parâmetros U_0 , T_H e do número de Froude correspondente na matriz de testes proposta.	55
Tabela 5.1 - Matriz de testes efetivamente realizada.	64
Tabela 6.1 – Parâmetros iniciais dos três experimentos.	133
Tabela 6.2 – Parâmetros iniciais para as novas simulações numéricas.	146

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade do SI
A	Área (da seção transversal do tubo)	m^2
C	Coefficiente de descarga	-
D	Diâmetro (diâmetro interno do tubo)	m; mm
d	Diâmetro do orifício da placa de orifício	m; mm
g	Aceleração da gravidade	m/s^2
L	Comprimento característico (para obtenção do Re)	m
L	Comprimento adimensional ($=l/D$)	-
l	Comprimento (entre dois termopares consecutivos)	m
L_1	$L_1 = L_2' = 25,4/D$ (D em [mm])	
L_2'	$L_1 = L_2' = 25,4/D$ (D em [mm])	
m	Massa	kg
n	Número de leituras	
p	Pressão	Pa
q	Vazão (vazão de injeção)	m^3/s
q_m	Vazão mássica	kg/s
q_v	Vazão volumétrica	m^3/s
R	Coefficiente de correlação	-
R^2	Coefficiente de determinação (para a curva de determinação)	-
S	Desvio padrão	-
S_i	Desvio padrão amostral	-
S_x	Desvio padrão das médias das leituras	-
T	Temperatura	$^{\circ}C$; K
t	Temperatura	$^{\circ}C$
t_f	Temperatura da água fria	$^{\circ}C$
t_q	Temperatura da água quente	$^{\circ}C$
U	Incerteza	
U_{yx}	Erro médio na previsão da quantidade "y" para um valor de "x" individual (erro padrão da curva ajustada)	
u_0	Velocidade média (na seção transversal) de injeção de água	m/s

u_l	Velocidade média na tubulação da placa de orifício	m/s
V	Tensão elétrica	V; mV
V	Volume	m ³
\dot{V}	Derivada temporal do volume	m ³ /s
Y_i	Valor de cada leitura	
\bar{Y}_i	Média das leituras	

Letras Gregas

β	Razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro da tubulação	-
Δ	Diferença	-
$\Delta\rho$	Diferença entre as densidades da água fria e da água quente	kg/m ³
Δp	Perda de pressão através da placa de orifício	Pa
ε	Fator de expansividade	
Θ	Temperatura adimensional	-
μ	Viscosidade dinâmica	kg/ms
ν	Viscosidade cinemática	m ² /s
ρ	Densidade	kg/m ³
ρ_0	Densidade da água fria	kg/m ³

Números Adimensionais

Fr	Froude	$Fr = \frac{U_0}{\left(g D \frac{ \Delta\rho _{\max}}{\rho_0} \right)^{1/2}}$
Re	Reynolds	$Re = G L / \mu$
Re_D	Reynolds para tubulação de diâmetro D	$Re = G D / \mu$

Siglas

BWR	Boiling Water Reactor (Reator a Água Fervente)
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
DBA	Design Basis Accident (Acidente Base de Projeto)
DTL-ES	Dispositivo de Testes de LOCA – Efeitos Separados
ELSY	European Lead Fast Reactor (Reator Rápido Europeu a Chumbo Líquido)
FEM	Força eletromotriz
HDR	<u>H</u> och <u>d</u> ruck <u>R</u> eaktorkreislauf <u>e</u> n Installation (Instalação de simulação dos circuitos de alta pressão de reatores)
LMFBR	Liquid Metal Fast Breeder Reactor (Reator Rápido a Metal Líquido)
LOCA	Loss of Coolant Accident (Acidente de Perda de Refrigerante)
NEA	Nuclear Energy Agency (Agência de Energia Nuclear da OCDE)
NRC	(ou USNRC) US Nuclear Regulatory Commission (Comissão Regulatória Nuclear dos EUA)
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Económico
PWR	Pressurized Water Reactor (Reator a água pressurizada)

1. INTRODUÇÃO

As superfícies das tubulações horizontais de água de usinas nucleares vêm apresentando um tipo especial de trincas, devido à fadiga. As causas dessas falhas estão associadas a tensões devido a configurações de escoamento envolvendo estratificação térmica, que podem ocorrer durante os processos de partida e de desligamento da usina, assim como sob algumas condições anormais de funcionamento [Häfner, 1990]. A região da interface entre a água quente, que fica na parte superior da tubulação, e a água fria, que fica na parte inferior da mesma, pode apresentar instabilidades, que resultam na formação de ondas. A flutuação de temperatura resultante produz ciclos de carga térmica consideráveis, afetando o material do tubo, e podendo levar à falha do mesmo [Lenz et al., 1990].

O trabalho proposto consiste na simulação experimental e numérica das configurações de escoamentos monofásicos termicamente estratificados e no estudo da influência de parâmetros característicos, tais como pressão, vazão de injeção e diferença de temperatura, sobre estas configurações de escoamentos.

1.1. Descrição do Fenômeno da Estratificação Térmica em Tubulações

O escoamento monofásico termicamente estratificado ocorre em tubulações horizontais, quando duas camadas distintas de um mesmo líquido, uma quente e outra fria, escoam a baixas velocidades, permanecendo separadas, devido à diferença entre suas densidades, estabelecendo duas regiões com diferentes níveis de temperatura (Figura 1.1). Estabelecida a estratificação no fluido, a tubulação também fica submetida à diferença de temperatura entre as suas partes inferior e superior. Podem ocorrer, então, três tipos de efeitos básicos [Poussin e Holcblat, 1995]:

- Tensões axiais na tubulação, associadas ao seu encurvamento longitudinal devido à diferença entre as dilatações das partes superior e inferior da mesma (Figura 1.1a).
- Tensões circunferenciais e distorção da forma circular da seção transversal do tubo devido, igualmente, à diferença nas dilatações nas partes superior e inferior do tubo (Figura 1.1b).
- Flutuação da interface dos líquidos quente e frio, devido à diferença de velocidades das duas camadas, o que pode levar ao aparecimento de ondas na interface (Figura 1.1c).

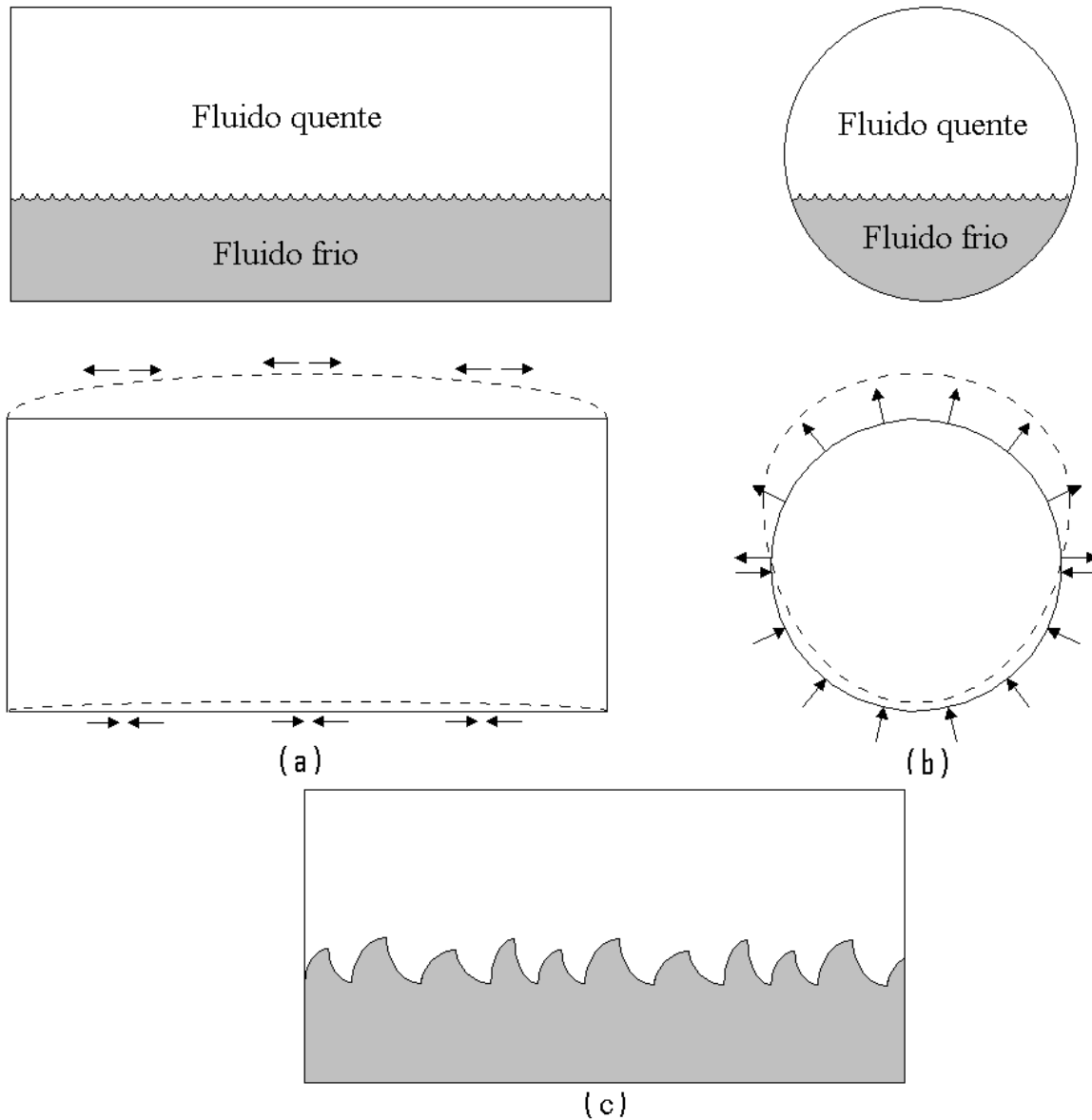


Figura 1.1 - Efeitos da estratificação térmica.

Estudos têm mostrado que, em determinadas tubulações de um reator nuclear, o escoamento termicamente estratificado pode apresentar diferenças de temperatura da ordem de 200 °C, em uma estreita faixa em torno da interface água quente /água fria [Wolf et al., 1991]. Nessas condições, os efeitos relacionados acima levam a um desgaste estrutural bastante acentuado dessas tubulações, o que representa uma séria ameaça à integridade das usinas nucleares [Faidy et al., 2008]. A estratificação térmica é ainda apresentada frequentemente como

causa de aceleração dos processos de fadiga térmica em tubulações de usinas nucleares, como descrito por Kweon et al., (2008).

1.2. O Fenômeno da Estratificação Térmica nos Reactores Nucleares

A Figura 1.2 mostra de forma esquemática o circuito primário de um reator a água pressurizada (*PWR* na sigla em inglês). A água do circuito primário, cuja pressão é superior a 160 bar e cuja temperatura mantém-se acima de 300 °C, retira calor do núcleo do reator e sede calor ao circuito secundário, no gerador de vapor, onde a água do circuito secundário, cuja pressão é significativamente menor que a do primário (~ 64 bar), é transformada em vapor.

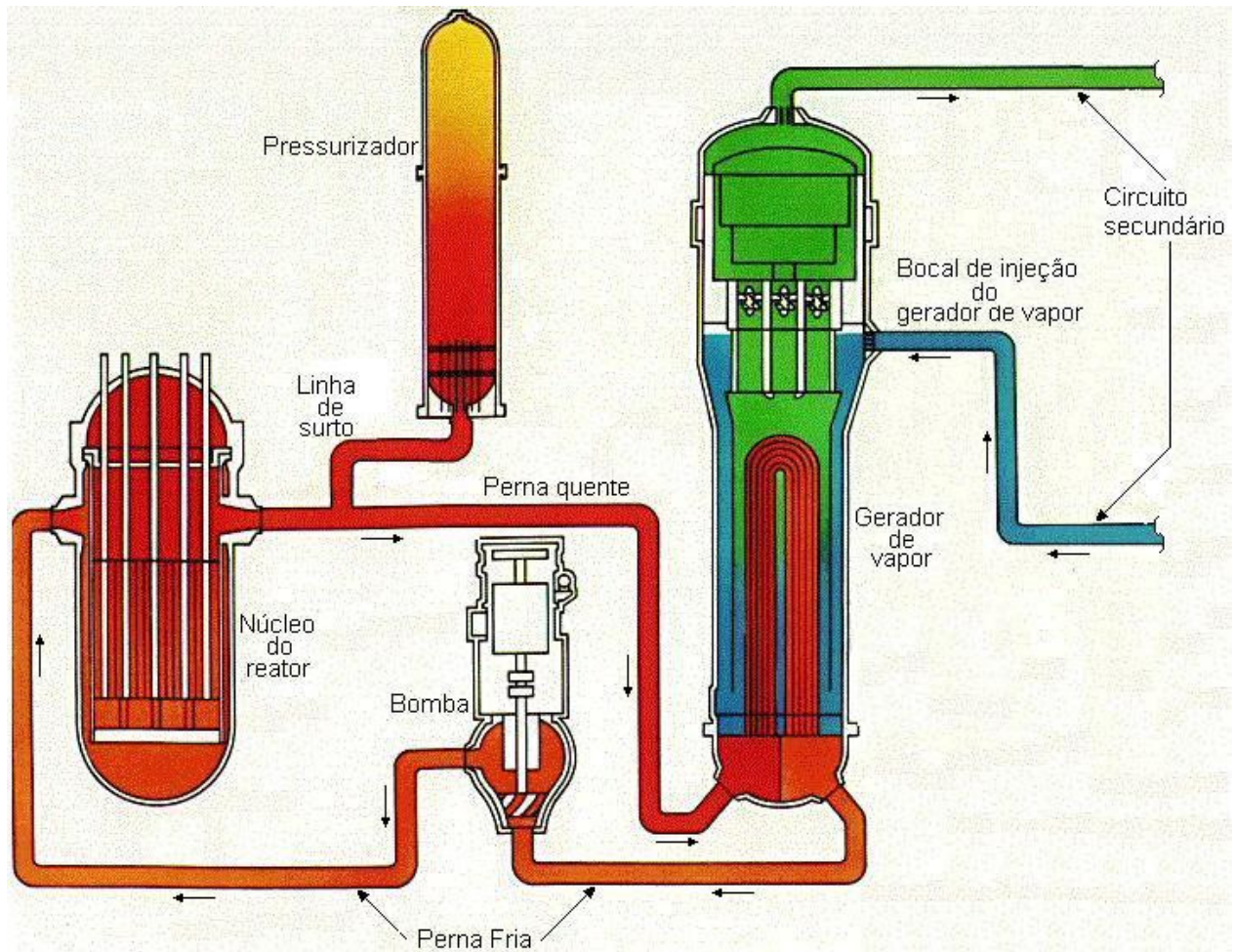


Figura 1.2 - Desenho Esquemático dos Circuitos Primário e Secundário de um Reator a Água Pressurizada.

Três regiões dos reatores nucleares têm recebido especial atenção nos estudos da estratificação térmica [Kim et al., 1993]:

- As pernas quente e fria do reator, ou seja, as tubulações do circuito primário de refrigeração do reator que vão, respectivamente, do núcleo do reator ao gerador de vapor e de volta ao núcleo, passando pela bomba de circulação;
- A linha de surto (“surge line”), que liga o pressurizador à perna quente do reator;
- O bocal de injeção de água do gerador de vapor no circuito secundário.

Em alguns reatores, o sistema de injeção de água do secundário no gerador de vapor é constituído de uma tubulação externa e outra interna, na forma de um anel, equipada com tubos na forma de ‘J’, que injetam o fluido no sentido descendente, como mostra a Figura 1.3. Na partida do reator, o aquecimento e conseqüente dilatação da água contida no gerador de vapor induz um escoamento reverso de água quente para a região do bocal de injeção. Com o início da circulação no circuito secundário, a água fria contida no circuito escoam em direção ao bocal de injeção, agora no sentido normal de operação.

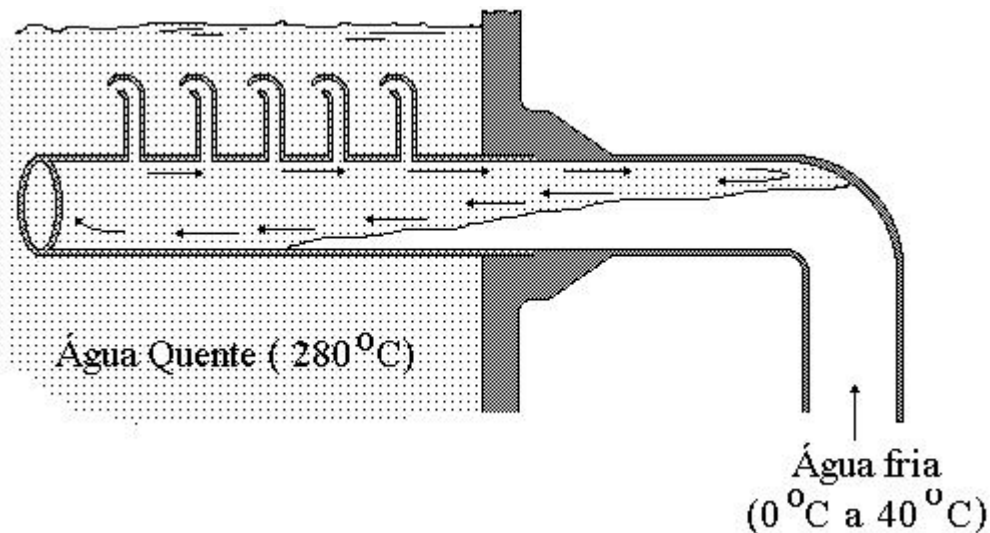


Figura 1.3 - Estratificação térmica no bocal de alimentação de um gerador de vapor.

1.3. Justificativa e Relevância

O interesse principal desta tese de doutorado deve-se à necessidade de uma melhor compreensão do processo de estratificação térmica monofásica em tubulações de reatores nucleares a água leve e seus problemas associados, tais como a flutuação da interface e a fadiga resultante nas tubulações devido às grandes variações de temperatura. Tais questões são da maior importância nas análises de segurança e de integridade estrutural das tubulações das centrais nucleares. Nos últimos anos um enorme esforço internacional tem sido realizado no sentido de se localizarem áreas críticas e condições de cargas estruturais, igualmente, críticas. O objetivo final desse esforço é a obtenção de métodos analíticos mais acurados, que permitam determinar as margens de segurança reais, utilizadas no projeto das centrais nucleares, e assim possibilitar avaliações mais realistas do tempo de vida residual dos equipamentos.

A avaliação de segurança de centrais nucleares inclui cálculos estruturais de componentes, tais como vasos de pressão e tubulações, nos piores cenários possíveis. Para este propósito, supõe-se a ocorrência de trincas nas localizações e orientações mais críticas, considerando-se, por exemplo, os históricos de fabricação e operação dos componentes [Keinänen et al., 1998].

As cargas térmicas resultantes do escoamento monofásico termicamente estratificado não foram previstas na fase de projeto, da maioria das centrais nucleares de potência atualmente em operação. As análises de flexibilidade das tubulações seguiam, normalmente, um tratamento clássico, com a hipótese de distribuição uniforme de temperatura em toda a seção transversal [Cizelj e Simonovski, 2011].

Estas cargas térmicas, entretanto, aumentam de forma muito significativa os esforços de flexão na tubulação como um todo e criam tensões locais nas seções transversais das tubulações, devido à distribuição circunferencial não linear de temperatura. Assim, tem-se procurado não só minimizar os efeitos nocivos, devidos às condições presentes no escoamento térmico estratificado, como, também, incluir as condições de carregamento provenientes da estratificação nos transientes base de projeto das centrais nucleares [Kweon et al., 2008].

Conforme mencionado o fenômeno da estratificação térmica tem sido observado no bocal de injeção do gerador de vapor, na linha de surto do pressurizador, nas linhas de injeção do sistema de refrigeração de emergência, nas linhas de remoção de calor residual, nas linhas de alimentação, etc. [Kim et al., 1993].

A escolha do bocal de injeção do gerador de vapor como o primeiro componente a ser simulado, dentro do projeto de estudos da estratificação térmica no CDTN, deve-se ao relato do aparecimento de trincas na parte horizontal desta tubulação, detectadas por meio de ensaios não destrutivos [Ferrari et al., 1993]. Estas trincas aparecem na superfície interna, com orientação circunferencial, devido à fadiga do material por ciclos de tensão na direção axial.

Os resultados dos experimentos, constituídos principalmente de medidas de evolução de temperaturas durante os mesmos, serão, empregados na validação de modelos termohidráulicos utilizados na predição de diferenciais de temperatura, tanto nas fases de projeto quanto em estudos de reavaliação da vida útil das centrais nucleares. Os modelos de análise estrutural utilizados na fase de projeto das centrais nucleares atualmente em operação empregam margens de segurança bastante elevadas. Espera-se que a utilização de modelos mais precisos venha a contribuir para um aumento bastante significativo na vida útil destas centrais. Com a substituição de alguns poucos componentes mais críticos, acredita-se que se possa elevar esta vida útil de cerca de 35 anos, em média, para aproximadamente 50 anos . Um exemplo disso foi a substituição de uma curva da linha de surto do pressurizador da usina nuclear Bohunice 3, na Eslováquia, o qual apresentou um valor calculado muito alto para o fator de fadiga cumulativa [NEA, 2005].

Recentemente têm surgido propostas para a extensão de vida útil dos reatores a água pressurizada para até 80 anos [Dalrymple, 2010]. O esforço para se aumentar a vida útil de centrais nucleares justifica-se, plenamente, uma vez que, na geração termonuclear de energia elétrica, o custo de capital (custo de construção das usinas nucleares) representa hoje, em média, cerca de 65% do custo final do kWh gerado.

1.4. Metas e Objetivos

A impossibilidade de se estudar o fenômeno da estratificação térmica sob condições operacionais, em uma central nuclear, torna necessária a construção de dispositivos que simulem os principais componentes onde o fenômeno costuma ocorrer, tais como o bocal de injeção do gerador de vapor e a linha de surto, que liga o pressurizador ao circuito primário. Assim, decidiu-se por um programa experimental que permitisse obter uma melhor compreensão e análise do processo da estratificação térmica monofásica nas tubulações de um reator a água pressurizada, a

determinação da influência dos diversos parâmetros envolvidos no processo e a quantificação das consequências estruturais subseqüentes.

Este trabalho de tese teve como objetivo geral construir um dispositivo experimental e desenvolver duas metodologias: experimental e numérica, que permitam simular o fenômeno da estratificação térmica monofásica, nos diversos componentes das centrais nucleares, principalmente as do programa nuclear brasileiro, subsidiando estudos envolvendo a análise de vida residual de cada um destes mesmos componentes. Assim, foram realizados o projeto, montagem e exploração da primeira seção de testes deste dispositivo experimental, a qual simula o bocal de injeção do gerador de vapor. Com enfoque neste componente de centrais nucleares, definiram-se os seguintes objetivos específicos para o trabalho:

- 1) Determinar a influência dos diversos parâmetros termohidráulicos envolvidos no processo de estratificação térmica monofásica (pressão, temperatura, vazão, dimensões, etc.);
- 2) fornecer uma base de dados empíricos para a compreensão e análise do processo termohidráulico da estratificação térmica monofásica;
- 3) estabelecer as cotas e posições longitudinais onde ocorrem os maiores gradientes térmicos, durante a simulação;
- 4) estabelecer a frequência e a amplitude das oscilações na interface entre a água fria e a água quente; e,
- 5) desenvolver e validar um modelo termohidráulico, utilizando códigos de CFD, para a simulação do processo de estratificação térmica em tubulações de centrais nucleares.

A quantificação das consequências estruturais do processo de estratificação térmica monofásica nas tubulações ficou a cargo de uma outra equipe de pesquisadores do CDTN, especialistas em integridade estrutural [Silva, 2009]. A realização desse trabalho, com enfoque nas consequências estruturais exigiu a confecção de uma segunda seção de testes simulando o bocal de injeção do gerador de vapor, com a mesma geometria da primeira, mas que ainda não tivesse sido submetida a tensões de origem térmica. Como não se pretendia expor o material a cargas térmicas antecipadas, ela foi instrumentada com um número de termopares significativamente menor, sem processos de soldagem ou brasagem. Além disso, outra importante diferença no que se refere à instrumentação das duas seções de testes, foi que para os experimentos com vistas à avaliação de danos estruturais, foram posicionadas 20 rosetas, cada

uma com três “strain gauges”, na superfície externa do tubo. Esta seção de testes passou por experimentos semelhantes aos relatados aqui e, ao final dos experimentos, foi parcialmente destruída para a retirada de amostras do material do tubo, para análise.

1.5. O Experimento Desenvolvido

A geometria simulada foi a do bocal de injeção de água no gerador de vapor, apresentada na Figura 1.3. O gerador de vapor constitui-se de um trocador de calor, através do qual, o circuito primário do reator transfere calor para o secundário. Em um PWR típico, o circuito primário opera a temperaturas da ordem de 330 °C e pressões de cerca de 160 bar. O circuito secundário trabalha a pressões da ordem de 64 bar e a água do mesmo atinge, no gerador de vapor, temperaturas da ordem de 280 °C, transformando-se no vapor que aciona as turbinas para a geração de eletricidade.

A estratificação térmica no bocal de injeção do gerador de vapor ocorre, normalmente, no início de operação da usina, quando a água contida no vaso dilata, retornando à tubulação de alimentação. À medida que o vapor vai sendo produzido, ele induz a circulação no secundário, e água fria vai sendo injetada na mesma tubulação de alimentação, preenchida anteriormente por água quente. Devido às baixas velocidades das camadas de líquido quente e frio, não há mistura imediata. A água quente, a aproximadamente 280 °C, ocupa a parte superior da tubulação horizontal, enquanto a parte inferior é ocupada pela água fria, a temperaturas inferiores a 40 °C [Mayinger et al., 1991].

A tubulação de alimentação do gerador de vapor de um PWR típico tem um diâmetro de 0,3649 m, e apresenta vazões entre 8,1 e 80,6 m³/h [Cisternas, 2009], condições impossíveis de serem reproduzidas nos laboratórios do CDTN. O número adimensional normalmente empregado na modelagem de fenômenos de estratificação térmica é o número de Froude, Fr [ROHDE et al., 2007], que se constitui numa relação entre forças de inércia e forças gravitacionais, dado por:

$$Fr = \frac{U_0}{\left(|g| D \frac{|\Delta\rho|_{\max}}{\rho_0} \right)^{1/2}} \quad (1)$$

Onde,

U_0 é a velocidade média de injeção de água, em [m/s], dada por $U_0 = q/A\rho_0$;

q é a vazão de injeção, em [kg/s];

A é a área interna da seção de escoamento do tubo, em [m²];

ρ_0 é a densidade da água fria, em [kg/m³];

$|\Delta\rho|_{\max}$ é a diferença entre as densidades da água quente e da água fria, em [kg/m³];

$|g|$ é a aceleração da gravidade, em [m/s²]; e,

D é o diâmetro interno do tubo, em [m].

Considerando-se o diâmetro do tubo e a faixa de vazão fornecidos acima, e tomando-se as temperaturas de 280 °C, para a água quente, e de 40 °C, para a água fria, chega-se a uma faixa de número de Froude de operação de:

$$Fr = 0,02 \text{ a } 0,2$$

Assim, o modelo físico para a simulação experimental do problema foi projetada de forma a permitir a realização dos experimentos nessa faixa de número de Froude.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Aspectos Gerais da Estratificação Térmica

O escoamento estratificado ocorre quando duas camadas de diferentes densidades, de um mesmo fluido ou de fluidos diferentes, escoam com pequena diferença de velocidade entre si, o que acarreta pouca ou nenhuma turbulência na interface e, portanto, um baixo índice de mistura. A diferença de densidade deve-se ou à diferença de temperatura entre as duas camadas de um mesmo fluido, ou à diferença intrínseca de densidade entre fluidos diferentes. O enfoque deste trabalho concentra-se na estratificação devido à diferença de temperatura entre duas camadas de um mesmo fluido. A camada quente, mais leve, permanece acima e a fria, mais pesada, permanece na região inferior do domínio de escoamento.

Este fenômeno tem sido estudado nos mais diversos ramos da engenharia, como no campo da meteorologia [Baik et al., 1999; Chashechkin et al., 2006; Wu e Zhang, 2008], onde se torna bastante importante o conhecimento do processo de estratificação térmica entre camadas atmosféricas. Também, tem sido estudado no campo da hidrologia [Wu e Fernando, 1999; Chanut e Barnier, 2008], onde o fenômeno aparece em estuários fluviais, podendo ocorrer a estratificação, devido ou somente à diferença de temperatura entre as águas de um lago ou rio e as de seu afluente, ou agravada pela diferença de salinidade, no caso de mar ou lago salgado. O fenômeno tem, ainda, grande importância nos campos da geofísica e astrofísica [Takehiro e Lister, 2001; Brandenburg e Hazlehurst, 2001].

Nos campos da engenharia química e da engenharia mecânica, o fenômeno vem ganhando importância em processos com injeção de fluido em tanques ou tubulações principais, a partir de tubulações secundárias. Também, ocorre em trechos de tubulações secundárias, isolados em uma das extremidades e com a outra extremidade em contato com uma tubulação principal. Neste caso, a turbulência na tubulação principal pode gerar penetração de fluido na tubulação secundária. Em ambos os casos, a estratificação térmica tem grande influência no processo de fadiga das tubulações.

Uma aplicação técnica da estratificação térmica, onde esta se torna desejável, ocorre em tanques de armazenagem de sistemas solares domésticos para aquecimento de água [Alizadeh, 1999], além de outros tanques de armazenagem de água quente [Kang, 2002]. Nesses sistemas, a

água quente permanece separada da água fria, devido somente às forças de empuxo decorrentes da diferença de densidade, sem a presença de qualquer barreira física entre as mesmas.

Estudos experimentais e numéricos relacionados à performance destes tanques de armazenagem estratificados, sob diferentes condições operacionais e diferentes parâmetros de projeto podem ser encontrados em Haller et al. (2009). Tais estudos envolvendo parâmetros de projeto influenciam nas posições de entrada e saída de água no tanque, na forma dos difusores, nas velocidades e nas temperaturas de entrada.

Os modelos matemáticos envolvendo escoamentos estratificados são bastante semelhantes quer sejam para a estratificação térmica, envolvendo duas camadas de um mesmo fluido com diferentes temperaturas, como para duas camadas de uma solução química com diferenças de concentração. Isso se deve à semelhança entre os modelos de difusão de calor e de difusão química. Esse é um aspecto muito importante nas centrais nucleares a água leve, onde ácido bórico é utilizado no sistema de refrigeração de emergência. O boro é um importante absorvedor de nêutrons, e em caso de perda de refrigerante, ajuda no desligamento seguro do reator. Camadas com concentrações diferentes de ácido bórico no núcleo do reator podem levar a uma distribuição de potência não homogênea, durante os transientes de difusão de boro. Esse fenômeno tem despertado grande interesse no campo da segurança de reatores [Nijeholt e Höhne, 2006].

2.2. A Estratificação Térmica nas Centrais Nucleares

2.2.1. Estratificação Térmica, Flutuação da Interface e Ciclos de Carga Térmica

Nos últimos anos, a estratificação térmica e fenômenos correlacionados, como a flutuação da interface entre o fluido frio e o fluido quente (“striping”) e os ciclos de carga térmica (“cycling”), têm adquirido cada vez mais importância no campo da engenharia nuclear. Estes fenômenos podem ocorrer, sobretudo, em tubulações relacionadas aos sistemas de segurança das centrais nucleares, tais como as linhas de surto dos pressurizadores, linhas de injeção de refrigeração de emergência, linhas de remoção de calor residual, bocais de injeção de água, e outras tubulações onde haja a possibilidade de escoamentos simultâneo de duas camadas de um

mesmo fluido, uma fria e outra quente [Bieniuissa e Reck, 1999]. Essa condição vem sendo apontada como de grande influência na segurança das centrais, uma vez que pode gerar tensões térmicas excessivas no material das tubulações.

Além disso, tais fenômenos podem ocorrer devido a vazamentos em alguma válvula, transferência de calor através de válvulas e penetração de turbulência de uma tubulação principal dos circuitos de refrigeração do reator para um ramo de tubulação estagnado [Kim et al., 2005]. Uma vez que as duas correntes sejam postas em contato, a diferença de densidade gera a estratificação térmica. Algumas vezes, a válvula pode abrir e fechar, sucessivamente, devido a expansões e contrações do acento da mesma, provocando ciclos de carga térmica. Estes ciclos, também, podem ocorrer quando o reator é submetido a transientes operacionais, ou quando a turbulência em uma tubulação principal interage com uma camada estratificada, em um ramo da tubulação, e provoca a oscilação na interface entre as duas camadas. O fenômeno da flutuação da interface, que em inglês é conhecido como “thermal striping”, é definido como uma oscilação muito rápida da interface entre as duas camadas. Assim, a estratificação térmica propriamente dita pode resultar em diferentes níveis de expansão térmica entre as regiões superior e inferior do tubo, podendo causar deformações plásticas permanentes nas tubulações, ou danos às estruturas e suportes das mesmas. Por outro lado, os ciclos de carga térmica e as flutuações na interface podem causar alternâncias nas tensões térmicas e fadiga.

2.2.2. A Estratificação Térmica em Reatores Rápidos a Metal Líquido

A estratificação térmica e fenômenos associados têm sido reconhecidos como um grave problema de segurança nos reatores rápidos a metal líquido (“liquid metal fast breeder reactors – LMFBRs”), desde o início da década de 1980. Estes reatores normalmente utilizam sódio ou chumbo líquido como refrigerante, por serem excelentes condutores de calor, permitindo a operação com altíssimas densidades volumétricas de potência. Este tipo de reator opera com densidades de potência da ordem de até cinco vezes a de um reator a água pressurizada [Collier e Hewitt, 1987]. Normalmente, o núcleo destes reatores fica submerso em uma piscina de metal líquido, inteiramente situada no interior de um vaso de pressão. O metal líquido é bombeado através do núcleo, por meio de uma bomba submersa. Um primeiro trocador de calor transfere calor da piscina para um circuito secundário, igualmente de metal líquido. O metal do circuito

secundário cede calor para a água do circuito terciário, no gerador de vapor. O fenômeno da estratificação térmica tem sido considerado um grave problema do ponto de vista da integridade estrutural, sobretudo na câmara superior, situada logo acima do núcleo do reator, para onde o fluido escoava logo após absorver o calor do núcleo. A Figura 2.1 apresenta um desenho do circuito primário do Reator Rápido Europeu a Chumbo Líquido (“European Lead Fast Reactor—ELSY”) [Alemberti et al., 2011].

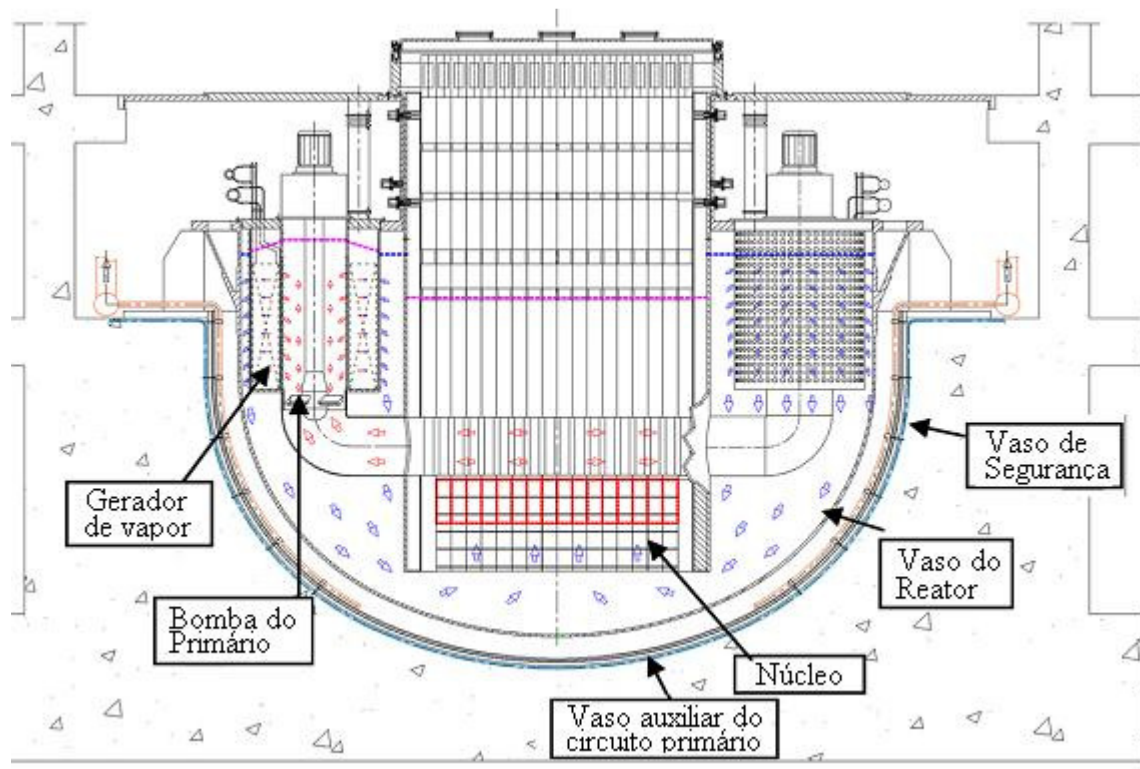


Figura 2.1 - Circuito primário do Reator Rápido Europeu a Chumbo Líquido – ELSY
[Alemberti et al., 2011].

Nos processos de desligamento, a potência do reator decresce abruptamente, de forma muito mais rápida que a vazão no circuito de refrigeração, promovendo uma queda de temperatura muito rápida na saída do núcleo. Dessa forma, o fluido frio penetra a baixas vazões na câmara superior, situada logo acima do núcleo do reator, sob as condições transientes de pós-desligamento. Devido à diferença de densidade, o fluido frio se espalha pela região inferior da

câmara, enquanto um grande volume de fluido permanece aquecido na sua região superior. Este fenômeno cria as condições de estratificação térmica e leva a gradientes de temperatura bastante acentuados na câmara superior. Este gradiente de temperatura na interface de estratificação pode causar tensões térmicas muito severas no vaso do reator e em componentes posicionados no interior do mesmo, como estruturas para posicionamento de instrumentação. Assim, o grau de estratificação e sua persistência tornam-se essenciais para o projeto de reatores rápidos [Doi e Muramatsu, 1997].

Uma vasta gama de trabalhos experimentais [Koga et al., 1997; e, Tokuhiko e Kimura, 1999] e de análise numérica [Ahn et al., 1997; Baron et al., 1992; Crouzeix et al., 2006; e, Sonnenburg, 1997], para a avaliação das características da estratificação térmica nos reatores rápidos a metal líquido, tem sido realizada e encontra-se disponíveis na literatura. Muitos dos trabalhos experimentais, que operam com modelos em escala, utilizam água como fluido de trabalho, em vez de chumbo ou sódio líquido. Entretanto, é bom notar que, devido às particularidades do fenômeno da estratificação térmica neste tipo de reator, esses trabalhos simulam o fenômeno, de preferência, em reservatórios de forma cilíndrica vertical. Nesta geometria, o fenômeno da estratificação térmica desenvolve-se de forma axissimétrica, o que não ocorre em relação à geometria do trabalho proposto, basicamente cilíndrica horizontal. Nesse caso, a inexistência de axissimetria torna a simulação do processo, inevitavelmente, tridimensional.

2.2.3. A Estratificação Térmica em Reatores a Água Leve

No ano de 1988, a comissão de regulamentação do setor nuclear dos Estados Unidos da América (“U. S. Nuclear Regulatory Commission – NRC”) relatou, por meio do seu boletim NRCB 88 – 08, a ocorrência de diversas falhas em tubulações não isoladas de centrais nucleares devido à fadiga, as quais resultaram no vazamento de pequenas quantidades de material radioativo [NRC, 1988a]. Estas falhas foram relatadas em reatores refrigerados a água leve, de ambos os tipos: reatores a água pressurizada (PWR) e reatores a água fervente (BWR). A origem dessas falhas devia-se a vazamentos em válvulas, que resultavam em estratificação ou ciclos de tensão térmicos, levando, em seguida, a rachaduras em joelhos das tubulações. Outro boletim

correlacionado, boletim NRCB 88 – 11, relata que as condições de estratificação térmica na linha de surto do pressurizador causavam deslocamentos nas tubulações, que não haviam sido considerados nas análises originais de projeto [NRC, 1988b]. De forma semelhante, Miksch et al. (1985) descrevem a ocorrência de trincas nas tubulações horizontais, das linhas de injeção de água dos geradores de vapor de centrais alemãs, submetidas a efeitos da estratificação e choques térmicos.

Os fenômenos de estratificação térmica em centrais nucleares são bastante complexos e muito diversos entre si, devido às grandes variações de geometria das tubulações, à multiplicidade de causas e também às grandes variações nos processos termohidráulicos. Assim, autoridades dos EUA propuseram alguns métodos para prever e avaliar carregamentos térmicos relacionados a eles, a fim de entender os fenômenos de estratificação térmica e propor medidas que mitiguem seus efeitos [WESTIN, J. et al., 2009]. Os métodos incluem a determinação da altura da interface de estratificação, a extensão da estratificação ao longo da tubulação, a extensão da derivação que sofre ciclagem térmica devida ao fluxo proveniente da tubulação principal por penetração de turbulência e o aquecimento de uma derivação provenientes da linha principal devido a vazamentos de válvulas de isolamento. A metodologia proposta pode ser utilizada para postular carregamentos de origem térmica e assim avaliar seus efeitos nas tensões e na fadiga das tubulações. Também pode ser utilizada para determinar os locais de monitoramento de temperaturas, para melhorar os programas de inspeção ou para projetar tubulações resistentes à fadiga para novas centrais nucleares.

A partir dessas publicações, um número considerável de centrais nucleares tem relatado eventos de falhas de componentes de reatores devido à estratificação térmica. Os casos mais frequentes de estratificação térmica em componentes de reatores a água leve, seja durante as condições normais de operação, incluindo transientes operacionais, seja fora das condições normais, ocorrem na linha de surto do pressurizador, perna quente, sistema de remoção de calor residual, sistema de reposição de água e controle volumétrico do circuito primário, sistema de refrigeração de emergência e o bocal de injeção de água do gerador de vapor [Sun et al., 1991]. Estudos experimentais e de análise numérica têm sido realizados para a simulação não somente de componentes de centrais nucleares, mas, também, de condições mais genéricas de escoamento, como estudos de penetração de turbulência em ramos de tubulações contendo fluido estagnado, estudos em tubos com temperaturas diferentes nas duas extremidades e estudos envolvendo fator

de fricção [Donne, 1982] e turbulência na interface entre o fluido frio e o fluido quente [Nourgaliev e Dinh, 1997; Svirkunov, 1998; e, Tavakoli et al., 1999].

Diversos experimentos e análises numéricas têm sido realizados para avaliação do processo de penetração de turbulência em tubulações não isoladas [Kim et al., 2005; Deutsch et al., 1997; e, Lubin e Brown, 1995]. Este fenômeno constitui-se no transporte de turbulência do circuito primário do reator, onde o escoamento apresenta elevados números de Reynolds, para ramificações de tubulações estagnadas, com uma extremidade conectada ao primário e a outra isolada por meio de uma válvula. Isto representa um mecanismo capaz de introduzir água quente em regiões preenchidas com água fria. Uma importante característica que se procura avaliar por meio destes estudos é a distância de penetração, que define o limite entre as regiões onde ocorre a estratificação térmica e aquela onde ocorre a mistura. Esta informação é da maior relevância para se estimar a região sujeita a ciclos de tensão térmica, já que se tem observado que a distância de penetração oscila. Obviamente, estes ciclos de tensão térmica têm fortes consequências para a integridade do material. A condição de penetração de turbulência ocorre nas tubulações de diversos sistemas auxiliares conectados ao circuito primário de refrigeração dos reatores, como o sistema de remoção de calor residual, sistema de reposição de água e controle volumétrico do circuito primário, sistema de refrigeração de emergência e outros.

Trabalhos experimentais envolvendo a penetração de turbulência têm sido realizados em instalações de alta pressão, que permitem simular condições mais próximas das observadas em reatores nucleares, mas, também, em instalações de baixa pressão com visualização do fenômeno [Kim et al., 2005]. Estas últimas são constituídas, normalmente, de tubos de acrílico, com injeção de corante vegetal a montante do “T” onde se localiza a ramificação com água estagnada.

Alguns estudos, tanto numéricos quanto experimentais, têm simulado o fenômeno que ocorre em um tubo horizontal isolado, com ambas as extremidades tamponadas, contendo um fluido estagnado, e em cujas extremidades são aplicadas diferentes temperaturas [Bejan e Tien, 1978; Shigeo e Bejan, 1980; e, Shiralkar et al., 1981]. Esta diferença de temperatura gera uma configuração de escoamento em contracorrente, com fluido quente escoando na região superior do tubo e o fluido frio escoando em sentido inverso na região inferior. Trata-se do fenômeno da estratificação térmica originado de um processo de convecção natural. Estes estudos, de configurações bastante simples, procuram obter uma solução para os campos de temperatura e velocidade.

A monitoração de temperatura e de tensões em tubulações de usinas nucleares, sujeitas à ocorrência de estratificação térmica, é bastante freqüente. Exemplos deste procedimento são encontrados em Yu et al. (1997) e Griesbach et al. (1991), que apresentam resultados da monitoração de temperatura e tensão nas linhas de surto, respectivamente, das unidades 3 e 4 da central coreana de Young Gwang Nuclear Power Plant (YGN 2 e 3) e das unidades 2 e 3 da central norte americana de San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS 2 e 3). Estas medições nas próprias centrais nucleares, ainda que produzam resultados realistas, não dispensam a necessidade de pesquisa experimental em instalações de simulação, onde se possa avaliar, separadamente, a influência dos diversos parâmetros de interesse na modelagem do processo. Em uma central nuclear, sob condições normais de operação, obviamente não é possível se estabelecer variações planejadas desses parâmetros, condição necessária à quantificação de suas respectivas influências.

O maior projeto experimental conhecido de simulação do fenômeno da estratificação térmica em reatores nucleares são os experimentos alemães HDR [Häfner, 1990], realizados em uma instalação de grande porte, reproduzindo não só a geometria, mas, também, as dimensões reais dos circuitos primários, tanto de reatores a água pressurizada quanto de reatores a água fervente. A utilização de uma instalação experimental permitiu, obviamente, que se evitassem os problemas inerentes às medidas realizadas nas próprias centrais nucleares. A instalação experimental simula o circuito primário do reator, e foi estudado o fenômeno da estratificação térmica no bocal de injeção do vaso de pressão do reator, trecho em que a perna fria se conecta ao vaso de pressão, que contém o núcleo do reator (Figura 1.2). Estes experimentos produziram resultados envolvendo medidas de temperatura [Wolf et al., 1992], formação e propagação de trincas [Kusmaul et al., 1990], estudos relacionando fadiga e diferenças de temperatura [Talja, 1988], etc..

O projeto HDR difere deste trabalho em diversos aspectos. Primeiramente, o HDR simula um componente do circuito primário, com todas as diferenças operacionais envolvidas, por exemplo, a pressão de trabalho no primário é de aproximadamente 160 bar, e no secundário de cerca de 54 bar. Além disso, a geometria é bastante distinta, conforme pode ser observado na Figura 2.2, que mostra uma das seções de testes utilizadas pelo experimento, onde são localizadas algumas das posições onde foram observadas trincas no bocal de injeção e no vaso de pressão do reator. O bocal do vaso de pressão do reator se conecta ao mesmo por um canal anular, em torno

do núcleo do reator, por onde a água de refrigeração é conduzida até a câmara situada abaixo do núcleo. Este canal é representado na seção de testes da Figura 2.2 como o espaço anular de 15 mm. O processo de estratificação térmica ocorre sob condições de transientes operacionais, quando água quente proveniente do núcleo pode retornar ao bocal de injeção de refrigerante.

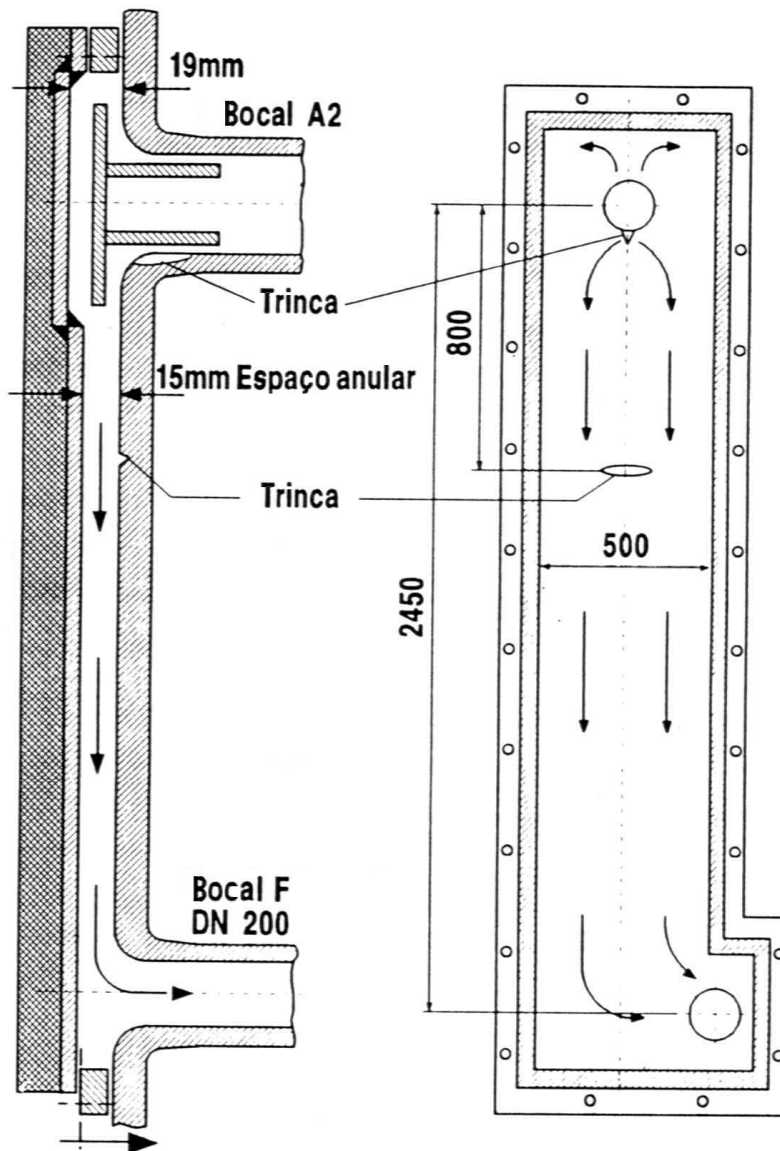


Figura 2.2 – Detalhe de uma das seções de testes do experimento HDR, representando o bocal de injeção do vaso de pressão do reator [Häfner, 1990].

Outro estudo, desenvolvido pela fabricante de reatores alemã, Siemens – KWU é apresentado por Lenz et al. (1990), dessa vez simulando um bocal de injeção de um gerador de vapor. O desenho da seção de testes deste trabalho é reproduzido pela Figura 2.3. Como pode ser visto, a geometria simulada é bastante distinta da que está sendo proposta nesta tese. Além disso, outro fator de distinção entre os dois trabalhos é que Lenz et al. (1990) enfoca rachaduras devido à corrosão, induzida pelas deformações provocadas pelo processo de estratificação térmica. Diante disso, entre os parâmetros considerados, as propriedades químicas da água, como a quantidade de oxigênio dissolvida, são apresentadas como as mais relevantes.

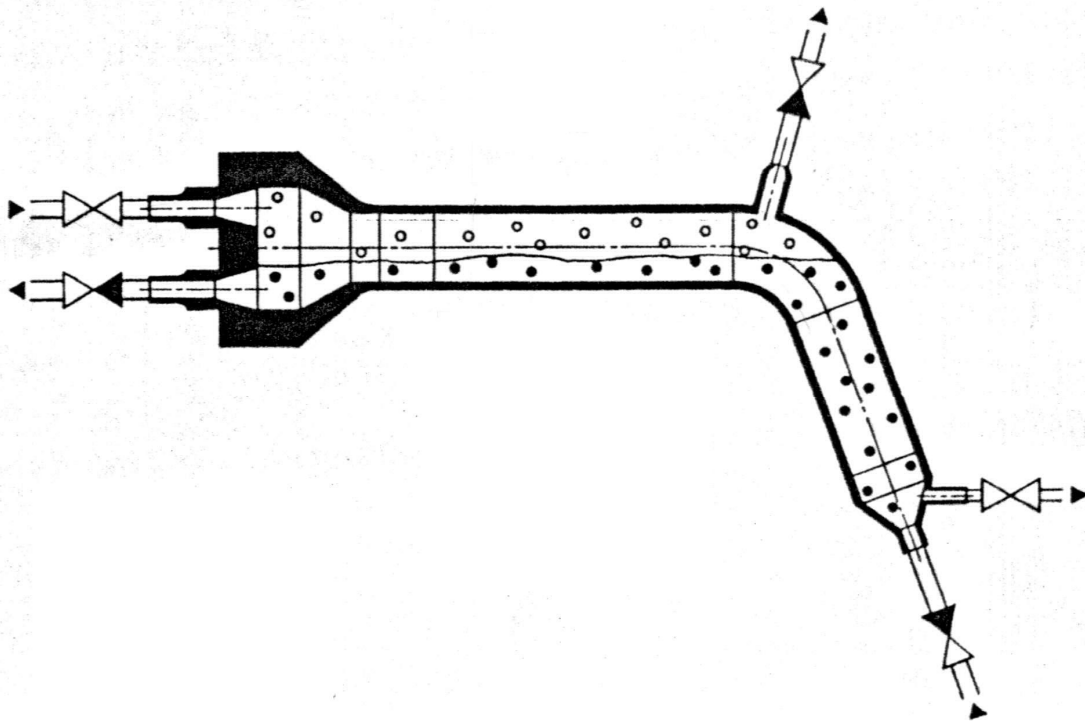


Figura 2.3 – Seção de testes de um experimento desenvolvido pela Siemens – KWU [Lenz et al., 1990].

Outro estudo envolvendo o bocal de injeção do gerador de vapor foi realizado pela Framatome, empresa francesa de tecnologia nuclear [Poussain e Holcblat, 1995]. Este estudo visava o desenvolvimento de um dispositivo anti-estratificação, mostrado na Figura 2.4, que se constitui de uma hélice posicionada no interior do bocal. Foram feitas medidas da distribuição de temperatura ao longo da parede do bocal, na própria central nuclear, antes e após a colocação do dispositivo.

Nenhum desses trabalhos encontrados na literatura consultada apresenta um estudo experimental, simulando o bocal de injeção do gerador de vapor, com o objetivo de determinar a distribuição de temperatura, no fluido e na parede, em decorrência de um processo de estratificação térmica. O trabalho mais assemelhado ao proposto, no que se refere às grandezas medidas e aos parâmetros de entrada é o HDR, que, no entanto, simula o bocal de injeção do vaso do reator.

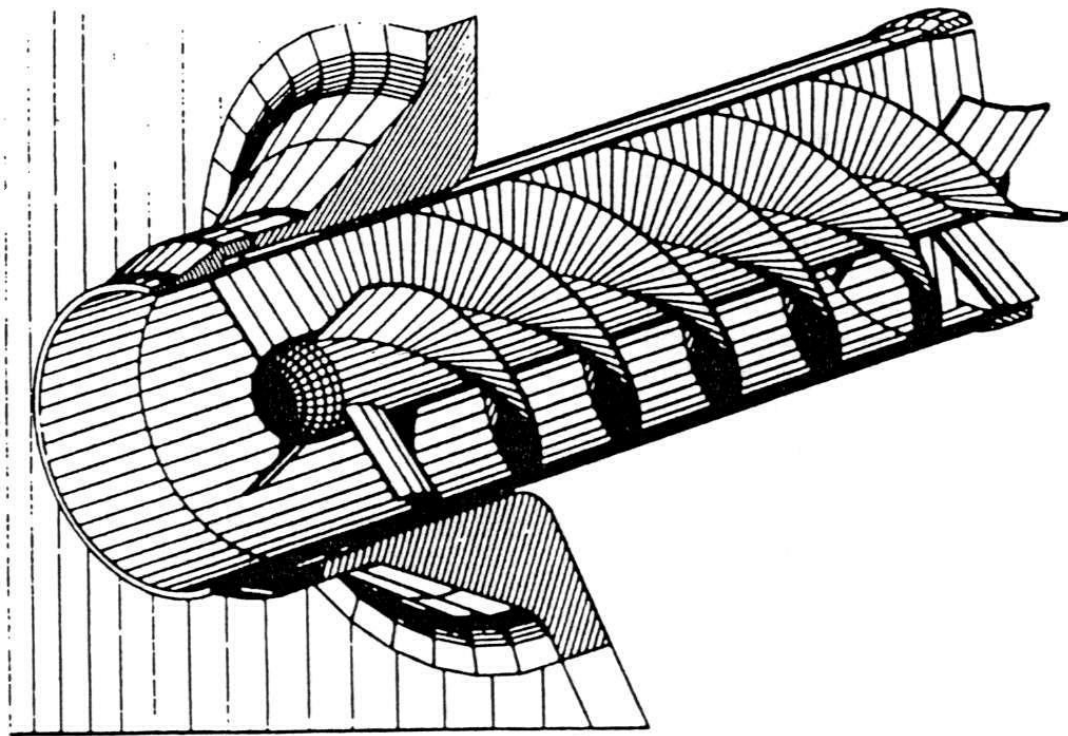


Figura 2.4 – Dispositivo desenvolvido pela FRAMATOME para a prevenção da estratificação no bocal de injeção do gerador de vapor [Poussain e Holcblat, 1995].

2.2.4. Estudos da Estratificação Térmica em Reatores a Água Leve com enfoque estrutural

Muitos trabalhos relacionados à estratificação térmica em reatores nucleares a água leve apresentam um enfoque nas consequências estruturais para as tubulações onde ocorre o fenômeno. Os processos de fadiga térmica observados nessas tubulações resultam nas consequências mais severas no que se refere à vida útil dos componentes. Merola (1995) define a fadiga térmica como a deterioração gradual com a quebra eventual de um material devido a aquecimentos e resfriamentos alternados, durante os quais a expansão térmica sofre restrição total ou parcial. Um componente submetido à fadiga térmica deve ser projetado para prevenir danos inaceitáveis. Assim, o número de ciclos de fadiga esperado deve ser menor do que o número máximo permitido pelo código de projeto.

Bush (1992) analisou as falhas ocorridas em tubulações de centrais nucleares, devido à fadiga térmica causada pelo fenômeno da estratificação, e estabeleceu uma relação entre estas e os critérios de projeto das centrais nucleares. Um estudo desenvolvido por Khaleel e Simonen (2000) estimou a probabilidade de vazamentos e rupturas de tubulações de reatores nucleares originadas em fadigas térmicas. O modelo de mecânica da fratura probabilística foi utilizado para estudar os efeitos relativos das tensões médias e do gradiente de tensões ao longo da espessura da parede do tubo e para estimar a confiabilidade das soldas da tubulação. Um estudo de fadiga térmica com origem em variações periódicas de temperaturas causadas pela estratificação térmica do fluido foi apresentado por Zuchowski (2000). O autor desenvolveu um novo conceito de medida de dano e o verificou experimentalmente. Apresentou, também, os efeitos do estado de tensões no comportamento e no mecanismo de falha de aços austeníticos e o conceito da equivalência de carregamentos térmicos e mecânicos. Hunger (1993) realizou experimentos com o objetivo de simular o crescimento de trincas, favorecido por ambiente corrosivo sob carregamentos mecânicos e térmicos, semelhantes à realidade operacional do reator. Os testes foram realizados para investigar os efeitos da estratificação em um tubo horizontal que já apresentava uma trinca circular, formada durante carregamentos devidos a momentos flexores cíclicos. Para realizar os testes foi utilizada uma tubulação com diâmetro nominal de 400 mm, alta pressão e várias vazões de água fria de alimentação. Lee e Song (1993) utilizaram o método dos elementos finitos para simular numericamente o comportamento de uma trinca localizada na região das oscilações térmicas na superfície interna da parede de um tubo com escoamento estratificado. Lee et al. (2004) discutiram os efeitos de alguns parâmetros da estratificação

térmica sobre a fadiga térmica e sobre a propagação de trincas na parede do tubo. Os parâmetros abordados no estudo foram o coeficiente de transferência de calor do fluido para a parede do tubo, a diferença de temperatura entre o fluido quente e o frio e a frequência da oscilação da temperatura do fluido. A metodologia do trabalho consistiu primeiramente na determinação da temperatura de parede sob a condição de flutuação da temperatura do fluido. Em seguida foram calculadas as tensões térmicas e o fator de intensificação de tensão, tendo como base a temperatura de parede.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. A Instalação Experimental DTLES

O experimento de Estratificação Térmica Monofásica foi montado sobre uma instalação experimental já existente no Laboratório de Termohidráulica do CDTN, o Dispositivo de Testes de LOCA (“Loss of Coolant Accident”) - Efeitos Separados (DTLES) [Ladeira e Navarro, 1992]. O DTLES é uma instalação projetada para a simulação de um Acidente de Perda de Refrigerante (LOCA), em um reator nuclear a água pressurizada. O DTLES foi construído com o objetivo principal de permitir a realização de experimentos que reproduzam os fenômenos bifásicos, que ocorrem durante as fases final da despressurização, reenchimento e reinundação do LOCA [Rezende, 1985]. Esses fenômenos incluem o escoamento paralelo e em contra corrente de água e vapor, em regimes estacionários e transientes, assim como o bloqueio da água da refrigeração de emergência pelo vapor que sai do núcleo do reator. A Figura 3.1 mostra uma visão geral do DTLES, anterior à montagem da seção de testes de estratificação térmica.

A Figura 3.2 apresenta o fluxograma original do DTLES. A realização dos experimentos de escoamento monofásicos termicamente estratificados exigiu que modificações significativas fossem implementadas na referida instalação. De fato, da instalação original somente foram utilizados dois vasos de pressão, a caldeira geradora de vapor, a bomba de circulação, além de grande parte da tubulação, válvulas e instrumentação. Toda a instalação descrita na Seção 3.2 foi construída para a realização destes experimentos.



Figura 3.1 – Vista geral do DTLES.

3.2. O Projeto da Seção de Testes

O projeto da seção de testes de estratificação térmica monofásica foi feito de forma a propiciar o estudo do fenômeno, da forma mais abrangente possível. Optou-se por uma forma geométrica adequada à simulação, tanto do bocal de injeção do gerador de vapor quanto de parte da linha de surto do pressurizador. A Figura 3.3 mostra um fluxograma do trecho do DTLES utilizado durante os experimentos, juntamente com a seção de testes montada para a simulação do bocal de injeção do pressurizador. A seção de testes propriamente dita constitui-se de um tubo de aço inoxidável de 141,3 mm de diâmetro externo, 9,5 mm de espessura de parede e 2000 mm de comprimento, com um joelho de 90° e mais 500 mm de comprimento vertical. Um prolongamento flangeado deste tubo foi posicionado no interior de um vaso de pressão, que simula o gerador de vapor.

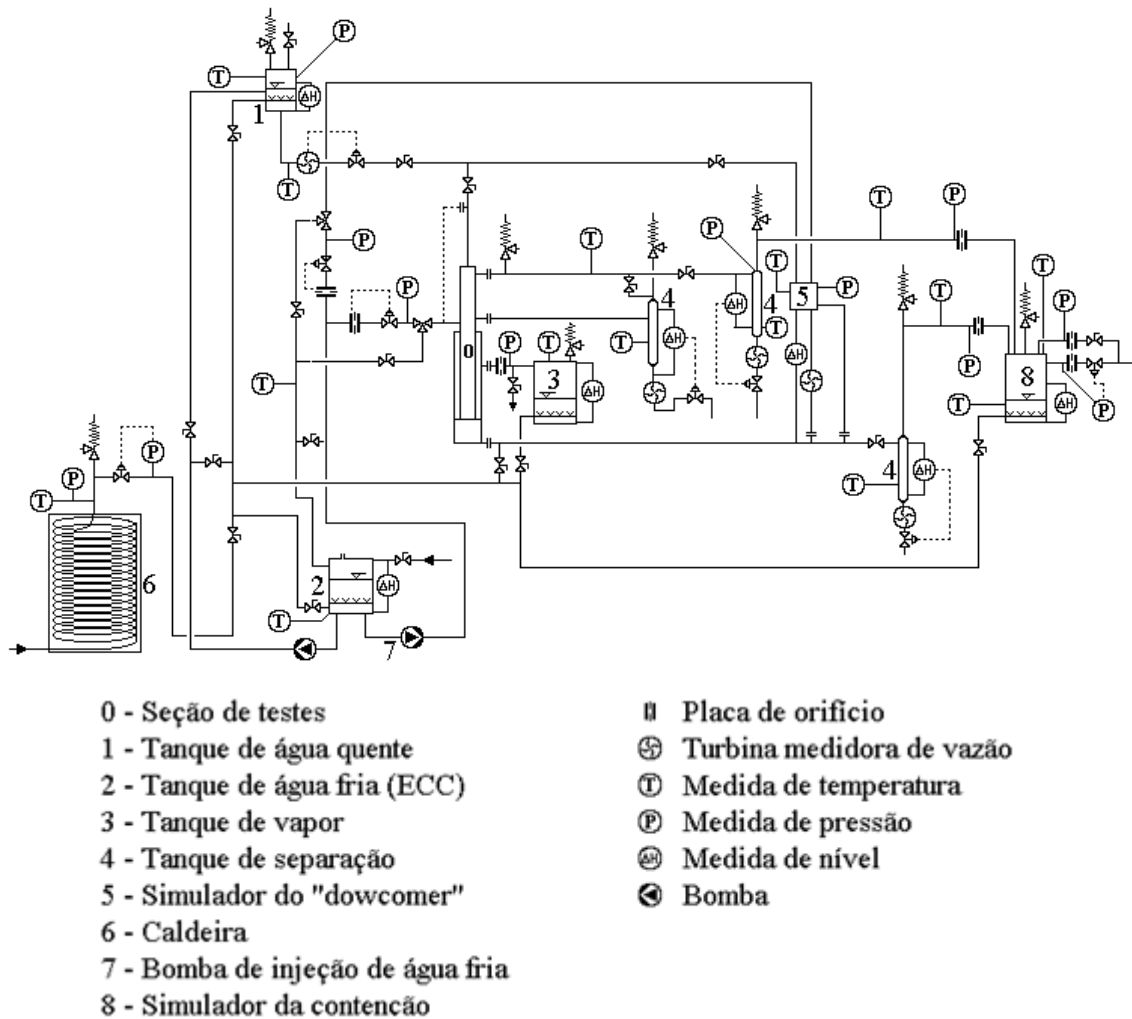


Figura 3.2 – Fluxograma do DTLES anterior às modificações introduzidas para os testes de estratificação térmica.

No início de cada teste, o tubo simulador do bocal de injeção do gerador de vapor é totalmente preenchido com água fria, enquanto o vaso de pressão é preenchido até poucos centímetros acima do trecho de tubulação horizontal no interior do mesmo. Em seguida, todo este sistema é aquecido e pressurizado por meio de vapor proveniente da caldeira. A bomba de homogeneização de temperatura garante que todo o sistema seja aquecido, da forma mais homogênea possível. Após o aquecimento, a linha de suprimento de vapor é isolada, fechando-se a válvula de esfera V5. A bomba de homogeneização é desligada e isolada por meio das válvulas de esfera V7 e V9. O suprimento de água fria vem do tanque T20, através da bomba de

circulação B20. Duas linhas de derivação, com válvulas de agulha (V2 e V3) permitem ajustar-se a pressão de recalque da bomba e a distribuição da vazão pelas duas linhas, retornando ao tanque T20 a parcela que passa pela derivação com a válvula V2. Inicialmente, a vazão de injeção, ajustada pela válvula V3 e medida na placa de orifício, é desviada pela válvula de três vias V4, passando pela válvula de agulha V1 e retornando ao tanque T20.

O teste propriamente dito tem início após a conclusão do processo de aquecimento e pressurização do sistema, quando a válvula de três vias V4 é invertida e a água fria, cuja vazão já foi ajustada, passa a ser injetada na seção de testes. O ponto de injeção de água fria é a extremidade inferior do trecho vertical do tubo simulador do bocal de injeção. Onze orifícios de 12 mm de diâmetro, posicionados longitudinalmente na parte superior do trecho de tubulação horizontal que penetra no interior do vaso de pressão simulador do gerador de vapor, permitem o escoamento da água contida no interior do tubo para o interior do vaso de pressão.

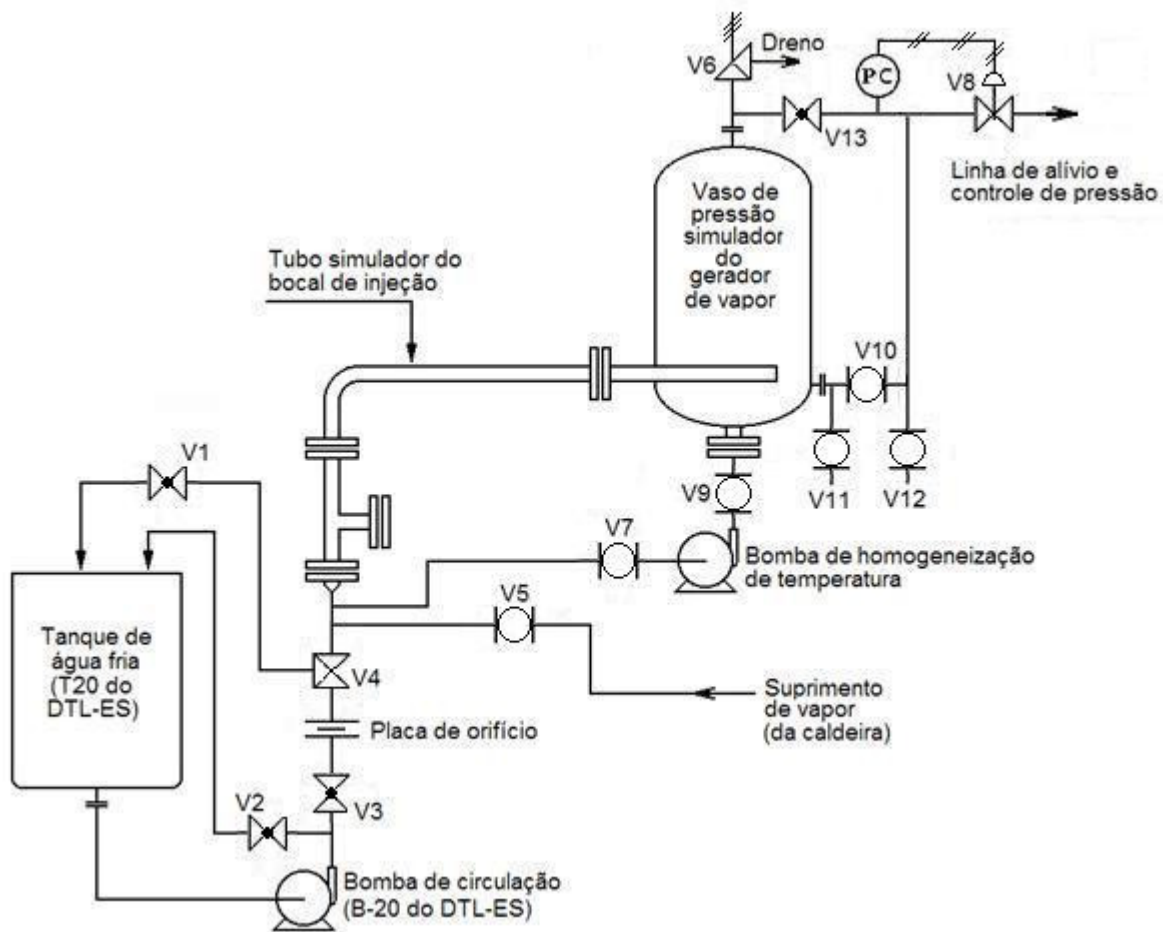


Figura 3.3 - Diagrama simplificado do DTLES para os experimentos de estratificação.

A pressão no vaso simulador do gerador de vapor é mantida por meio uma válvula de controle de pressão a montante (V8), instalada na linha de alívio e controle de pressão. Esta válvula, de acionamento pneumático, só permite a redução da pressão de 23 bar para 14 bar. Assim, a linha de alívio inclui um segundo vaso de pressão, de aço carbono, com um segundo sistema pneumático de alívio de pressão, desta vez de 14 bar para a pressão atmosférica, os quais não estão representados na Figura 3.3. Juntamente com este duplo sistema de controle de pressão a montante, o volume de vapor saturado que preenche a parte superior do vaso simulador do gerador de vapor é fundamental para que a pressão do sistema mantenha-se estável. A válvula V6 é uma válvula de segurança e as válvulas V10, V11 e V12 são válvulas de esfera, utilizadas para a despressurização do sistema, após cada experimento, e para que durante os experimentos o sistema fique isolado do restante do DTL-ES.

As dimensões da seção de testes foram definidas pelas faixas de vazão necessárias para a conservação do número de Froude, Fr , e de acordo com as limitações do DTLES (Figura 3.2), de maneira a possibilitar um tempo razoável de experimento. As limitações do DTLES são:

- Volume do tanque de água fria (tanque de baixa pressão) de 1 m^3 , que limita a capacidade total de injeção de água fria nos testes de simulação do bocal de injeção de gerador de vapor;
- Vazão da bomba de injeção limitada a $5,3 \text{ m}^3/\text{h}$ para uma altura manométrica correspondente a 23 bar; e,
- Pressão de trabalho do DTLES, igual a 23 bar, enquanto a pressão de operação do circuito secundário de uma usina nuclear e, portanto, do bocal de gerador de vapor é de aproximadamente 54 bar.

O número adimensional que tem sido utilizado nas simulações experimentos envolvendo estratificação térmica, na maioria das instalações experimentais descritas na literatura, é o número de Froude, dado pela Eq. 1, já mostrada anteriormente:

$$Fr = \frac{U_0}{\left(|g| D \frac{|\Delta\rho|_{\max}}{\rho_0} \right)^{1/2}}$$

O qual é obtido a partir da velocidade média de injeção de água, U_0 , da diferença de densidade adimensional ($|\Delta\rho|_{\max}/\rho_0$), do diâmetro do tubo, D , e do módulo da aceleração da

gravidade, $|g|$. Nos experimentos aqui descritos, a variação no número de Froude foi obtida, sobretudo, pela variação da velocidade de injeção, uma vez que com o baixo nível de pressão permitido pelo DTLES, não é possível obter-se, em termos práticos, grande variação na diferença de densidade. Vários experimentos descritos na literatura sugerem a adição de cloreto de sódio à água fria, de forma a poder-se aumentar mais significativamente a densidade da mesma. Entretanto, o DTLES opera, normalmente, com água desmineralizada e considerou-se inconveniente contaminá-lo com sal.

Uma análise preliminar mostrou, entretanto, ser possível a realização de experimentos com o número de Froude variando de 0,02 a 0,2, faixa correspondente ao encontrado nas centrais nucleares do tipo PWR. Nesta faixa, com base em resultados de modelagem encontrados na literatura, previa-se a obtenção de experimentos com diferentes comportamentos, no que se refere à mistura de fluidos e aos gradientes de temperatura. Nos experimentos com baixo número de Froude previa-se um maior nível de estratificação, com escoamento em camadas laminares bem definidas. Ao contrário, testes com maiores números de Froude deveriam resultar em maior mistura, devido à ocorrência de turbulência na interface entre os fluidos frio e quente. Entretanto, os resultados experimentais não atingiram o ponto de mistura, mesmo com números de Froude superiores ao dobro do valor máximo previsto.

3.3. A Instrumentação e o Sistema de Coleta de Dados

3.3.1. As Medidas de Temperatura na Seção de Testes

Foram definidas quatro posições ao longo do comprimento da seção de testes, chamadas estações de medição, onde foi posicionada a instrumentação. As estações de medição 1, 2 e 3, localizadas ao longo do comprimento horizontal do tubo que simula o bocal de injeção, foram amplamente instrumentadas com termopares, tanto no fluido quanto na parede. Já a Estação de Medição A, localizada no trecho vertical do tubo, possui apenas três termopares, cuja finalidade é definir o instante em que a água fria injetada atinge a cota dos mesmos.

Definida a forma e dimensões da seção de testes, partiu-se para o posicionamento dos sensores de temperatura. Foram escolhidas três seções transversais ao longo do comprimento

longitudinal do tubo simulador do bocal de injeção do gerador de vapor, chamadas de Estações de Medição 1, 2 e 3, cujo posicionamento pode ser observado na Fig. 3.4. A necessidade de se utilizarem três estações de medição deve-se ao fato de que o processo de estratificação térmica não é linear, quer seja no tempo ou no espaço, e uma interpolação não linear na direção longitudinal exige a coleta de dados experimentais em pelo menos três posições distintas.

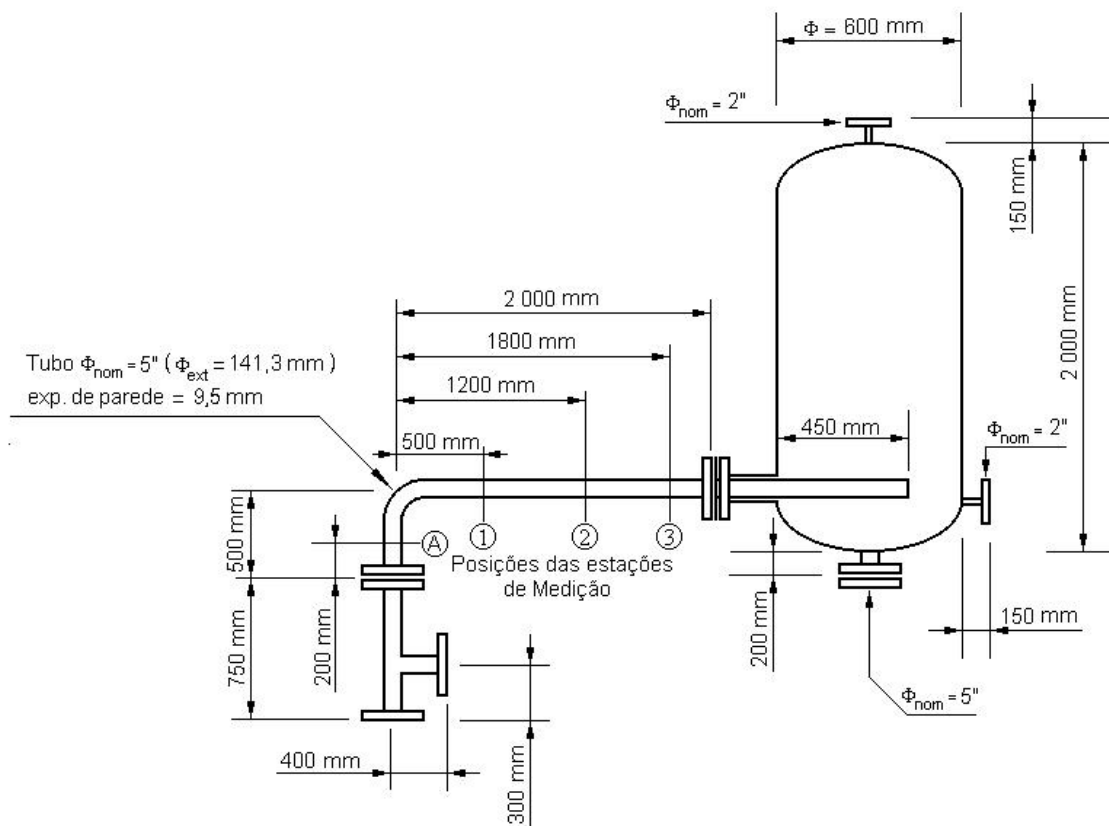


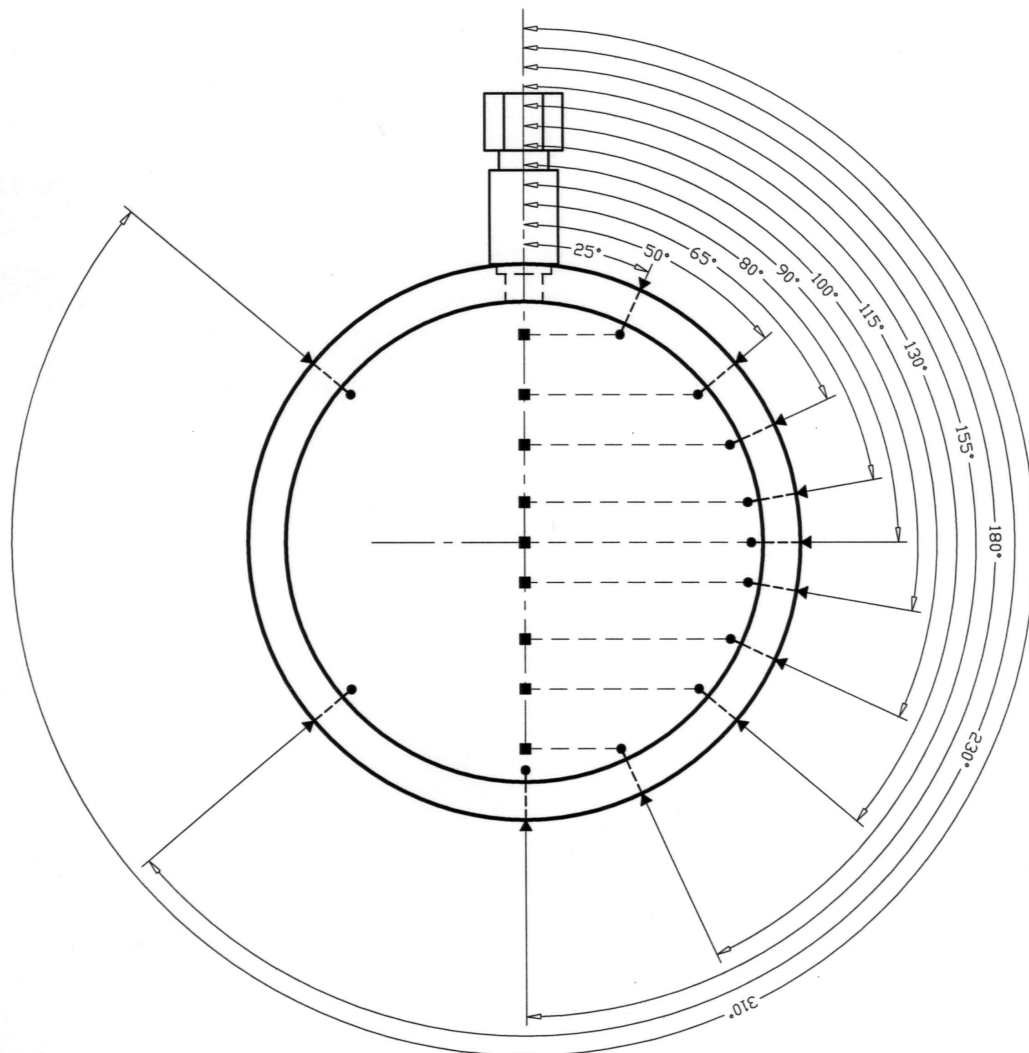
Figura 3.4 - Seção de testes de estratificação térmica monofásica.

Em cada estação de medição (Figuras 3.5, 3.6 e 3.7), foram distribuídos termopares para a medida de temperatura de fluido nas vizinhanças da parede. A junta quente de cada um destes termopares foi posicionada a 3 mm da parede, distância considerada suficiente para que não haja influência da temperatura da parede sobre o termopar. Essa distância corresponde a seis vezes o diâmetro do revestimento do termopar (0,5 mm). Para cada termopar de fluido, foi posicionado outro termopar, medindo a temperatura externa da parede, na mesma posição angular do

primeiro, para que se possa observar o amortecimento nas variações de temperatura ao longo da espessura da mesma. Entretanto, junto ao diâmetro horizontal do tubo nas Estações de Medição 2 e 3, foram posicionados conjuntos de termopares de fluido muito próximos uns dos outros, tendo sido colocado apenas um único termopar de parede para cada um destes conjuntos. Além disso, em cada uma destas estações de medição, foi colocada uma sonda removível ao longo do seu diâmetro vertical, contendo termopares de fluido, nas mesmas cotas dos termopares posicionados a 3 mm da parede. Para cada um dos dois conjunto de termopares internos, posicionados junto ao diâmetro horizontal do tubo nas estações de medição 2 e 3, foi posicionado um único termopar de sonda, no centro da seção do tubo.

As Figuras 3.5, 3.6 e 3.7 mostram a distribuição dos termopares em cada uma das Estações de Medição 1, 2 e 3, respectivamente. São mostradas as posições dos termopares de parede, dos termopares de fluido vizinhos à parede e dos termopares de fluido posicionados ao longo do diâmetro vertical da estação de medição, por meio de sondas removíveis.

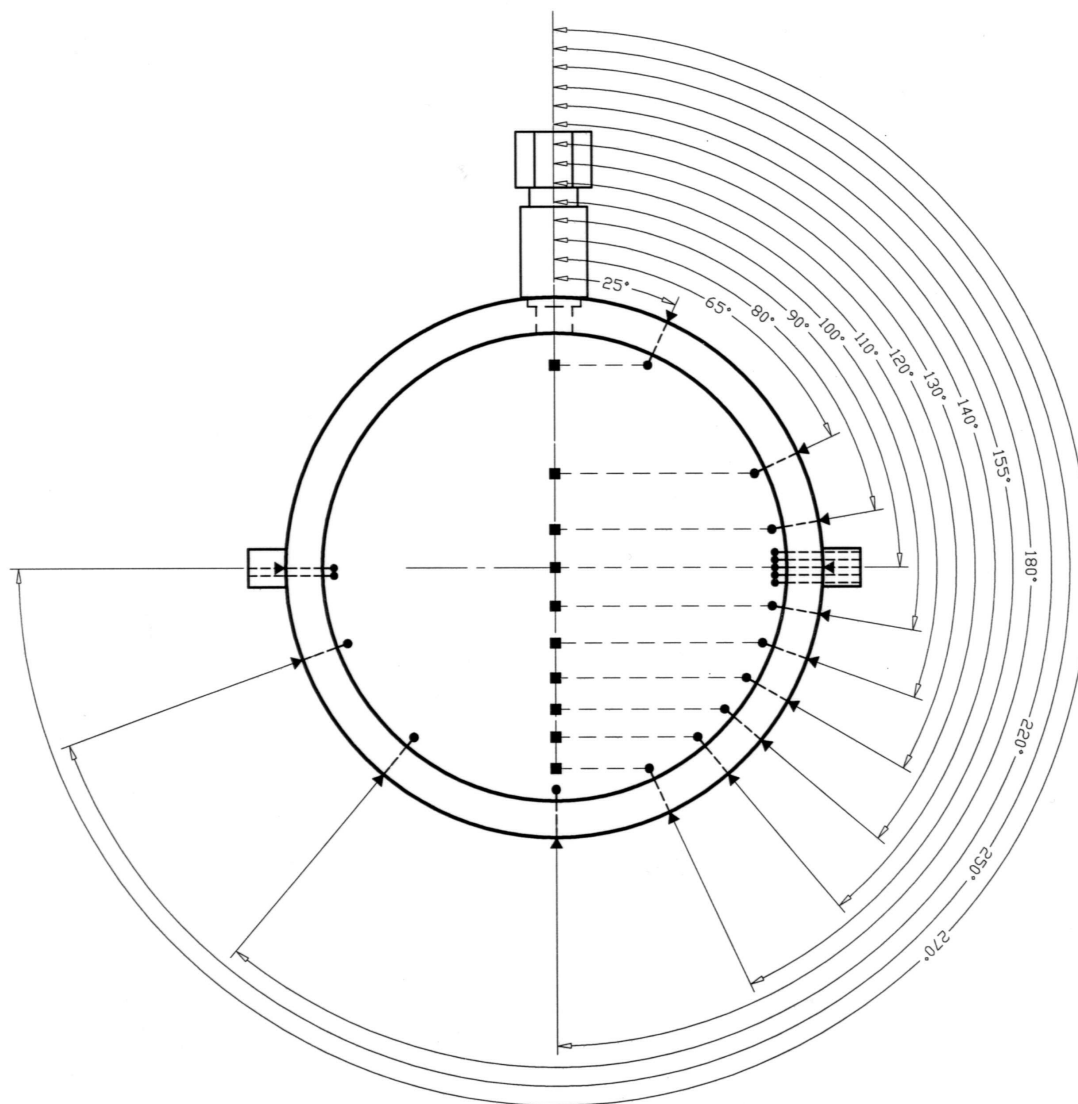
Nas Estações de Medição 1 e 2, foram posicionados termopares de fluido, vizinhos a parede interna, e seus correspondentes termopares de parede externos, do lado esquerdo do tubo, nas mesmas cotas de alguns dos termopares posicionados do lado direito. Tais termopares são, portanto, simétricos em relação ao plano vertical ao longo do eixo do tubo e têm a finalidade de demonstrar a simetria do processo.



POSIÇÃO DOS TERMOPARES

- ▼ Termopar de Parede
- Termopar de Fluido
- Termopar da Sonda

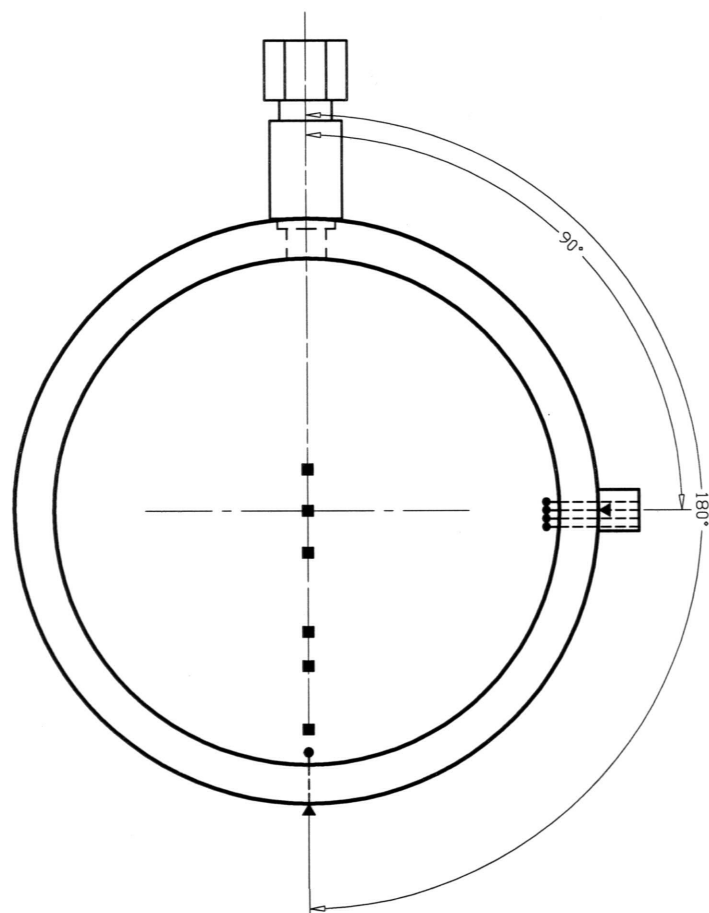
Figura 3.5 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 1.



POSIÇÃO DOS TERMOPARES

- ▼ Termopar de Parede
- Termopar de Fluido
- Termopar da Sonda

Figura 3.6 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 2.



POSIÇÃO DOS TERMOPARES

- ▼ Termopar de Parede
- Termopar de Fluido
- Termopar da Sonda

Figura 3.7 – Posicionamento dos termopares de fluido e de parede na Estação de Medição 3.

A Figura 3.8 mostra, em detalhe, como foram brasados os termopares de parede e os termopares de fluido vizinhos à parede. Todos os termopares utilizados na seção de testes deste experimento são do tipo K (cromel-alumel), com revestimento de aço inoxidável de 0,5 mm de diâmetro, 1,5 m de comprimento e junta quente aterrada. Para a brasagem dos termopares individuais foram utilizadas agulhas de aço inoxidável, brasadas à parede do tubo da seção de testes, por meio de uma liga de prata de baixo ponto de fusão ($< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$). Os termopares foram brasados a outra extremidade das agulhas, também, por meio da mesma liga de prata. Este procedimento foi necessário, uma vez que a parede da seção de testes é bastante espessa e a

brasagem dos termopares diretamente na mesma mostrou-se impraticável. Antes que se conseguisse aquecer a grande massa de parede em torno do ponto de brasagem, à temperatura de fusão da liga de prata, o termopar já teria atingido temperaturas capazes de danificá-lo. Os furos na parede do tubo têm diâmetro de 1,5 mm, no encaixe das agulhas, e de 0,7 mm desta posição até o interior do tubo.

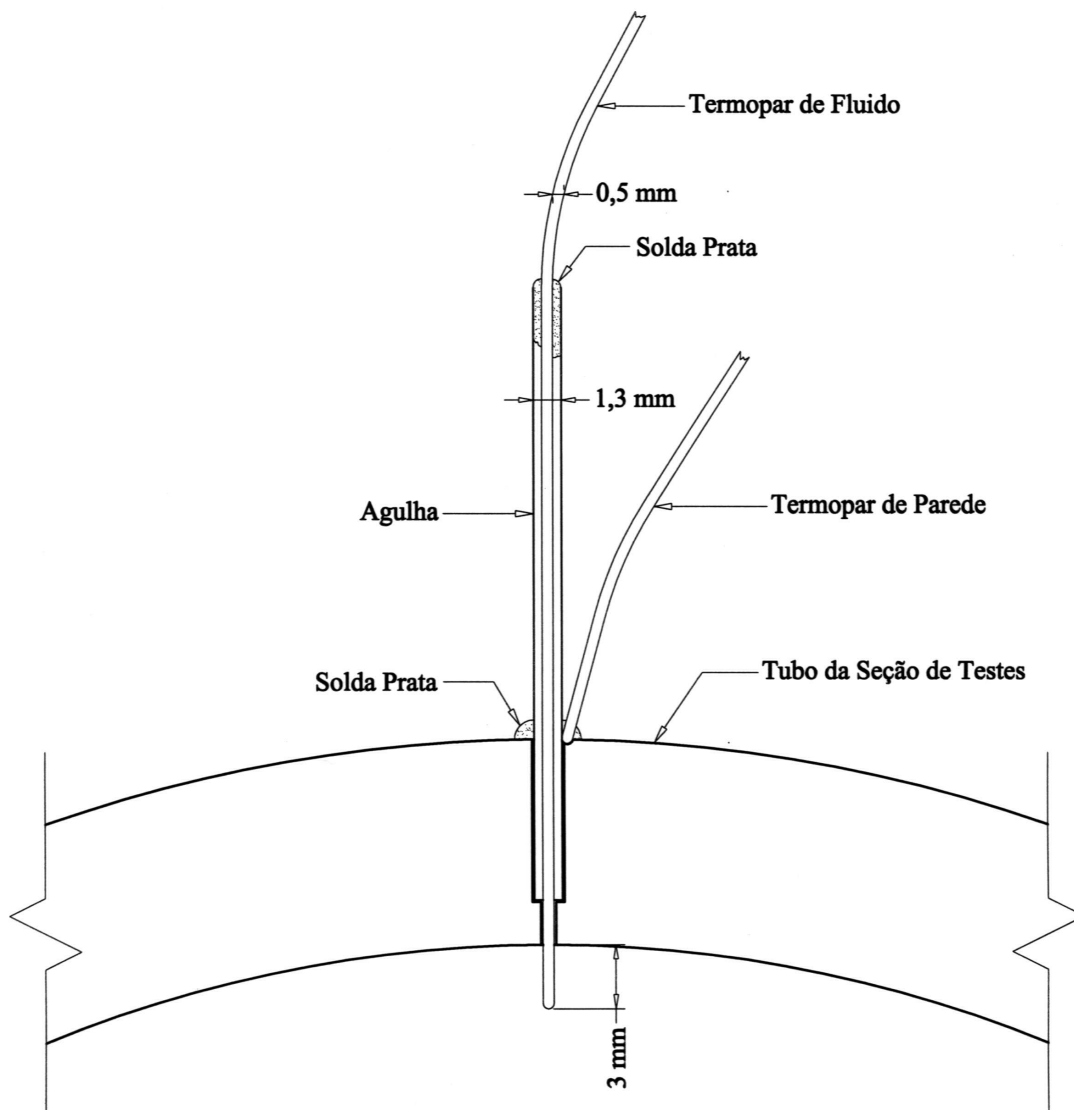


Figura 3.8 – Detalhe do método utilizado para a brasagem dos termopares de fluido e parede.

Cada estação de medição possui uma conexão de processo (conexão com vedação por meio de anilha) na sua parte superior, a fim de permitir a colocação da uma sonda removível, ao longo do diâmetro vertical da estação de medição. Cada sonda possui um conjunto de termopares, posicionados nas mesmas cotas dos termopares de fluido, já brasados ao longo da parede da respectiva estação de medição. Em cada sonda, também, foi posicionado um único termopar correspondendo a cada um dos conjuntos de termopares existentes na metade da altura do diâmetro horizontal da respectiva estação de medição. Assim, a sonda correspondente à estação de medição 1 tem nove termopares e a sonda correspondente à Estação de Medição 2 tem dez termopares. Já a sonda correspondente à Estação de Medição 3 tem seis termopares, posicionados em cotas correspondentes às de termopares internos que estivessem posicionados nos ângulos 80°, 90°, 100°, 120°, 130° e 155°.

A Figura 3.9 mostra um desenho de uma destas sondas, constituída de uma chapa de 3 mm de espessura, 9 mm de largura e 120 mm de comprimento, com ranhuras onde são posicionados os termopares. A extremidade (junta quente) de cada termopar é posicionada afastada 3 mm da parede da sonda, para evitar influências da temperatura de parede da própria sonda, na borda de ataque da mesma em relação à vazão de injeção da água fria. A extremidade superior da chapa é soldada a um tubo de 9 mm de diâmetro, através do qual saem os termopares. Este tubo é vedado por meio da anilha da conexão de processo situada na parte superior de cada estação de medição. Os termopares saem deste tubo, através de furos individuais, no tampão superior do mesmo, onde são brasadas agulhas de 0,7 mm de diâmetro interno, por meio de uma liga de prata de baixo ponto de fusão (< 400 °C). Cada termopar é brasado à outra extremidade da respectiva agulha, por meio da mesma liga de prata.

Conforme mencionado na Seção 2, um dos efeitos que podem ocorrer durante o processo de estratificação térmica é a oscilação da interface ("striping"). Esta oscilação tem a frequência máxima de 1 Hz [Ensel et al., 1995], e sua amplitude deveria ser melhor estimada para o caso de se pretender medi-la. Utilizando a metodologia descrita por Uhlmann et al. (1991), procurou-se então estimar a amplitude da oscilação e a faixa de altura da interface onde o fenômeno poderia ocorrer, para a faixa de Fr de 0,02 a 0,2. Para a faixa de vazão prevista, a amplitude máxima estimada foi de 5 mm, e isto ocorreria quando a interface estivesse próxima da altura média do tubo ($h = 0,5D$).

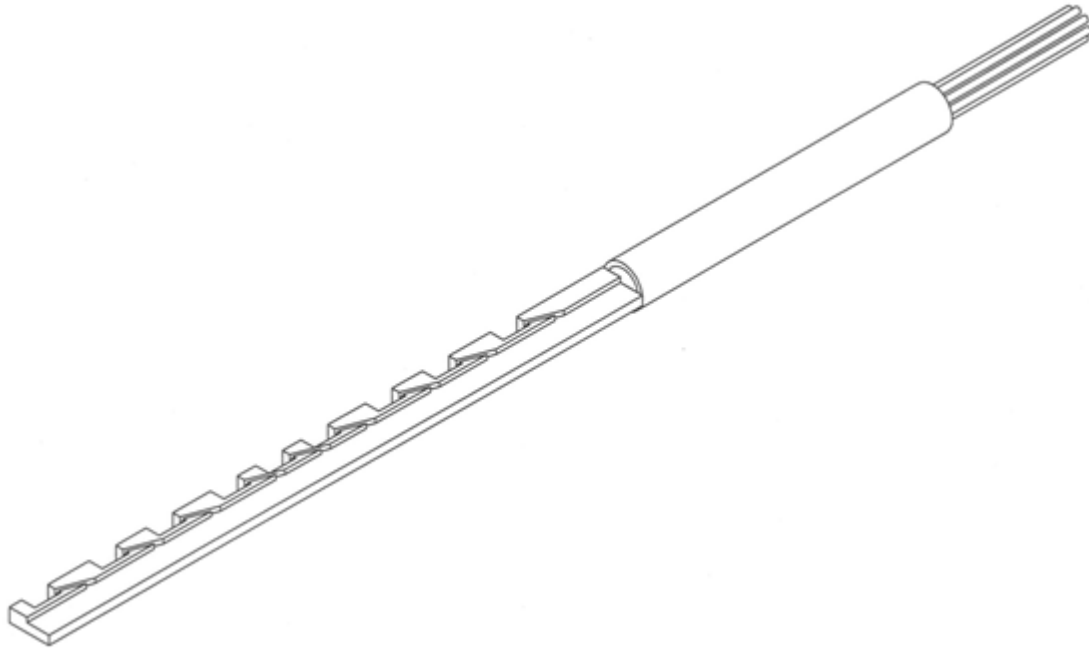


Figura 3.9 – Desenho esquemático das sondas verticais de cada estação de medição.

Ensel et al. (1995) mostra que essas oscilações são maiores na região do fluido próxima à parede interna da tubulação do que na sua região central. Por isto decidiu-se por tentar detectar este fenômeno próximo à parede externa, na metade da altura da seção de testes. Devido a dificuldades técnicas, não se procurou detectar este fenômeno em cotas diferentes, onde ele pode ocorrer, dependendo da vazão. A tentativa de observação da oscilação da interface levou, assim, à intenção de se posicionar conjuntos de cinco termopares, afastados verticalmente de 2 mm entre si, próximos à parede e na metade da altura da seção de testes, na segunda e na terceira estações de medição. Na primeira estação de medição não foi incluído este tipo de conjunto de termopares, porque não se espera obter escoamento laminar estável a uma distância inferior a seis vezes o diâmetro interno do tubo, condição necessária à ocorrência do fenômeno em questão.

A Figura 3.10 apresenta um desenho em corte da segunda estação de medição, mostrando em sombreado claro, a faixa onde se esperava detectar a interface entre a água fria e a água quente, dependendo da vazão de injeção, entre as cotas $h_{\min} = 0,2D$ e $h_{\max} = 0,6D$. A Figura 3.10 apresenta ainda uma faixa com sombreado mais escuro, representando a amplitude esperada para a oscilação da interface, quando esta ocorresse em $h = 0,5D$.

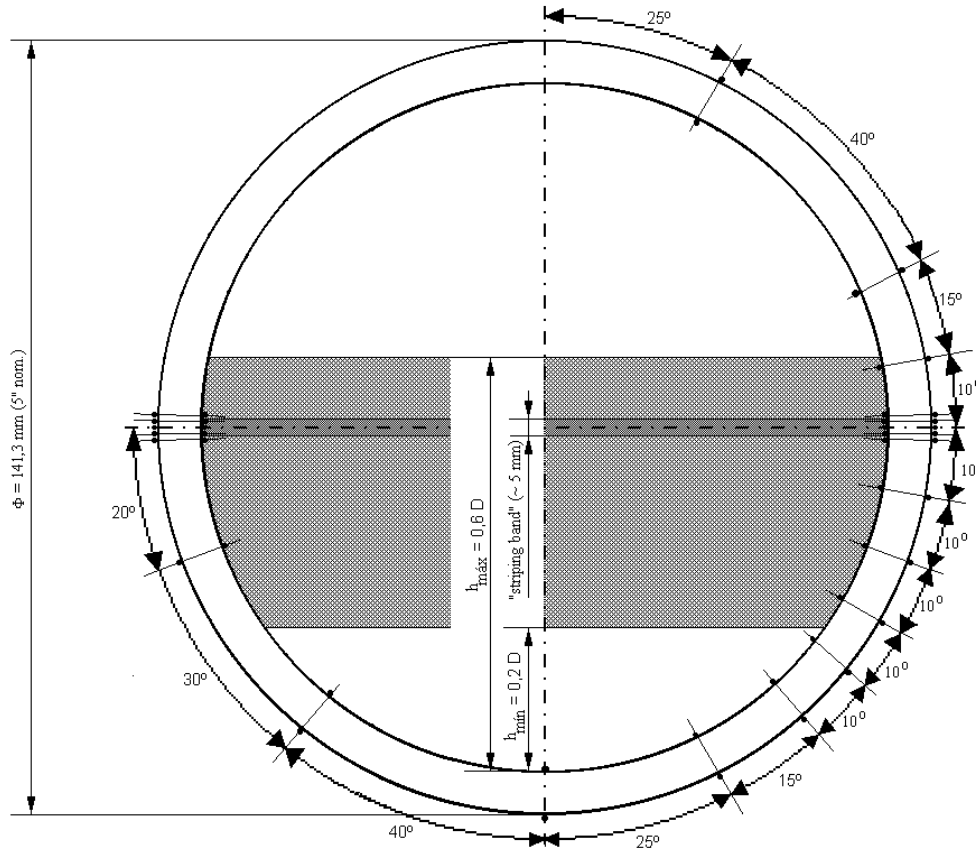


Figura 3.10 – Corte da seção de testes, mostrando a região onde se buscou a ocorrência da interface entre a água fria e a quente, e a amplitude esperada de oscilação da mesma.

Este último caso, em que se esperava obter uma zona de escoamento laminar estratificado, com a interface entre a água quente e a água fria junto ao diâmetro horizontal, representa uma condição de especial interesse prático, porque a distribuição de tensões correspondente é mais uniforme e, portanto, mais favorável à manutenção das condições estruturais residuais. A brasagem de um conjunto de termopares tão próximos uns dos outros revelou-se um procedimento extremamente delicado, e não se obteve sucesso na brasagem do total destes conjuntos de termopares a meia altura das estações de medição. Somente em um dos arranjos, posicionado do lado direito, na segunda estação de medição (Fig. 3.6) conseguiu-se brasar o conjunto completo de cinco termopares. Nesta mesma estação de medição seria, igualmente, posicionado outro conjunto do lado esquerdo. Entretanto, a ruptura de alguns termopares por excesso de temperatura, além de danos na conexão na tentativa de substituição dos mesmos, fez

com que somente dois termopares restassem deste conjunto. No único conjunto posicionado na terceira estação de medição (Fig. 3.7), do lado direito da mesma, somente restaram em funcionamento quatro termopares, pelas mesmas razões expostas anteriormente. Este problema não foi considerado muito grave para os resultados dos experimentos, uma vez que o conjunto posicionado do lado esquerdo da segunda estação de medição tinha por finalidade observar, basicamente, a simetria do processo, restando intacto o conjunto do lado direito. No caso do único conjunto de termopares posicionado na Estação de Medição 3, restaram quatro de um total de cinco termopares previstos, condição considerada satisfatória.

A Figura 3.11 mostra um desenho isométrico da conexão projetada para a brasagem desses conjuntos de termopares. A conexão é de aço inoxidável, soldada com encaixe ao tubo da seção de testes, por meio de solda TIG. Cada conexão possui cinco furos onde são brasadas cinco agulhas, por meio da liga de prata citada anteriormente. Cada termopar é posicionado passando através de uma agulha e é brasado à extremidade superior da mesma, por meio da liga de prata.

Na Estação de Medição A, mostrada no esquema da Fig. 3.4, foram posicionados três termopares, sendo um termopar de fluido próximo à parede, um termopar de fluido no centro da seção de escoamento e um termopar brasado à parede externa. O objetivo desses termopares foi detectar o instante de passagem da frente de água fria pela Estação de Medição A. Esse instante foi convencionado como o instante zero de cada experimento.

Foram confeccionadas duas juntas frias de referência para os termopares, cada uma com capacidade para receber 48 termopares. Cada uma destas juntas constitui-se de uma caixa termicamente isolada, contendo em seu interior uma placa de cobre para a homogeneização da temperatura. Os fios de extensão dos termopares, assim como os cabos que levam os sinais ao sistema de coleta de dados são aparafusados a esta placa, sem contato elétrico com a mesma. A temperatura no interior de cada caixa é medida por meio de termistores.

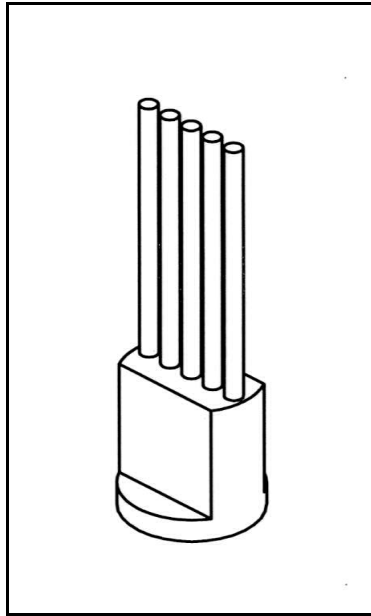


Figura 3.11 – Desenho isométrico da conexão para a brasagem de conjuntos de cinco termopares.

A Figura 3.12 apresenta uma fotografia do tubo da seção de testes após a brasagem dos termopares. A Figura 3.13 apresenta em detalhe os termopares da Estação de Medição 1, do lado externo do tubo da seção de testes, enquanto a Fig. 3.14 apresenta uma vista da mesma estação de medição pelo lado interno. Na Figura 3.15 tem-se uma vista parcial do DTLES, incluindo a seção de testes de estratificação térmica, o vaso de pressão da mesma, e o tanque de água fria, durante a fase de montagem da seção de testes.

A distribuição de medidores de temperatura de fluido foi planejada para permitir a caracterização do fenômeno da estratificação térmica, nos seus mais diversos aspectos, tais como gradientes térmicos e oscilação da interface. Da mesma maneira, a distribuição de medidores de temperatura de parede foi planejada para permitir avaliação da maneira e da intensidade como os gradientes térmicos do fluido são transmitidos para a parede. A calibração dos termopares é apresentada no Anexo A.



Figura 3.12 – Fotografia do tubo da seção de testes após a brasagem dos termopares.



Figura 3.13 – Detalhe da Estação de Medição 1 após a brasagem dos termopares.



Figura 3.14 – Detalhe dos termopares de fluido da Estação de Medição 1, vistos do interior da seção de testes.



Figura 3.15 – Vista parcial do DTLES durante a montagem da seção de testes de estratificação térmica.

3.3.2. Demais Medidas

Além das medidas feitas na seção de testes, foram feitas as seguintes medidas ao longo da instalação experimental:

– Vazão de injeção de água fria por meio de um conjunto de placa de orifício e transmissor de pressão diferencial. A vazão de injeção é um dos parâmetros de entrada dos experimentos, definidos pela matriz de testes, e fundamental na definição do número de Froude. A calibração do sistema de medida de vazão, desenvolvido com base nas normas DIN 1952 (1982) e ISO 5197-1980 (1980) é apresentada no Anexo B.

– Temperatura da água no tanque de água fria, na tubulação de injeção, tanto nas vizinhanças da placa de orifício quanto próximo ao ponto de injeção, e no vaso de simulação do gerador de vapor, por meio de quatro termopares tipo K, isolados, com revestimento de aço inoxidável, de 1 mm de diâmetro.

– Temperatura no interior das duas caixas das juntas frias de referência dos termopares, por meio de dois termistores em cada caixa. O conhecimento preciso destas temperaturas é de importância vital para o conhecimento das diversas temperaturas medidas por meio de termopares, uma vez que estes medem, de fato, a diferença entre as temperaturas da junta fria e do ponto de medição.

– Pressão no vaso de simulação do gerador de vapor e na linha de injeção de água, por meio de dois transdutores de pressão manométrica, com saída de 4 a 20 mA. O conhecimento desses valores é fundamental no início de cada teste, pois a pressão na linha de injeção deve ser equalizada com a do vaso de simulação antes da inversão da válvula de três vias, para que a vazão possa dirigir-se para a seção de testes de forma controlada.

– Nível no tanque de água fria, por meio de um transmissor de pressão diferencial, com saída de 4 a 20 mA. A função desta medida é unicamente de assegurar o suprimento de água para o experimento.

3.3.3. O Sistema de Coleta de Dados

A Tabela 3.1 apresenta a quantidade e as principais características dos sensores utilizados nos experimentos de estratificação térmica monofásica. Sendo a frequência máxima prevista para as oscilações na interface de 1 Hz [Wolf et al., 1992], a frequência de coleta deveria ser pelo menos duas vezes e meia maior que este valor [Figliola e Beasley, 1991]. O valor adotado foi de 3 Hz.

Os sinais analógicos provenientes de todos esses sensores foram enviados para um sistema de coleta e tratamento de dados, constituído de: uma placa conversora analógico/digital, da marca Advantech, modelo PCL – 818 HD; sete placas condicionadoras e multiplexadoras de sinal, também, da marca Advantech, modelo PCLD – 789 D; e, um computador com processador Intel Pentium MMX, de 220 MHz, 384 Mb de memória, disco rígido com 40 Gb, sistema operacional Windows 98 SE e monitor de vídeo de 17 polegadas.

Tabela 3.1 – Sensores e transdutores da seção de testes e do circuito.

Sensor e/ou transdutor	Quantidade	Sinal de saída
Termopar tipo K, diâmetro de 0,5 mm, com proteção em aço inox, e isolamento mineral	92	0,82 a 9,02 mV
Termopar tipo K, diâmetro 1,0 mm, com proteção em aço inox, e isolamento mineral	4	0,82 a 9,02 mV
Termistores (nas juntas frias)	4	(0 a 3V)
Transmissores de pressão		
• Medida de vazão (com placa de orifício)	1	4 a 20 mA.
• Medida de nível (por pressão diferencial)	2	4 a 20 mA.
• Medida de pressão manométrica	2	4 a 20 mA.
Total de canais	105	

As sete placas condicionadoras foram numeradas de 0 a 6, tendo sido ligadas em cascata e à placa conversora A/D, a qual foi posicionada no interior do computador, conforme pode ser visto na Fig. 3.16. Cada placa condicionadora possui 16 canais, numerados de 0 a 15. Estas placas condicionam os sinais da instrumentação, ou seja, amplificam e filtram os ruídos, e fazem a multiplexação dos mesmos, ou seja, o chaveamento para uma só saída analógica. As placas de números 0 a 5 recebem diretamente os sinais dos termopares, tendo sido ajustadas para amplificá-los com um ganho igual a 200 vezes. Já a placa de número 6 foi ajustada com ganho igual a 1, para receber diretamente os sinais dos termistores e, com a instalação de resistências de 250 Ω , receber os sinais de 4 a 20 mA. As principais características das placas condicionadoras modelo PCLD-789D são (ADVANTEC CO., 2003):

- incerteza de 0,0244% da faixa ± 1 LSB;
- 16 canais diferenciais de entrada;
- proteção máxima contra sobretensão igual a ± 30 V;
- faixa de sinal de entrada de ± 10 V máximo, variável conforme o ganho;
- amplificação de 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 ou 1000 vezes. Nas Tabelas 3.2 a 3.8 têm-se as identificações de cada sinal coletado pelas placas.

A placa conversora analógico/digital, instalada no gabinete do computador, converte o sinal analógico recebido das placas PCLD-789 em sinal digital. Essa placa, modelo PCL-818HD, pode receber até oito placas condicionadoras e apresenta as seguintes características (ADVANTEC CO., 2003):

- incerteza de 0,003% da faixa ± 1 LSB;
- resolução de 16 bits;
- taxa de coleta máxima de até 100 kHz no modo ADM (acesso direto à memória);
- proteção máxima contra sobretensão igual a ± 30 V.

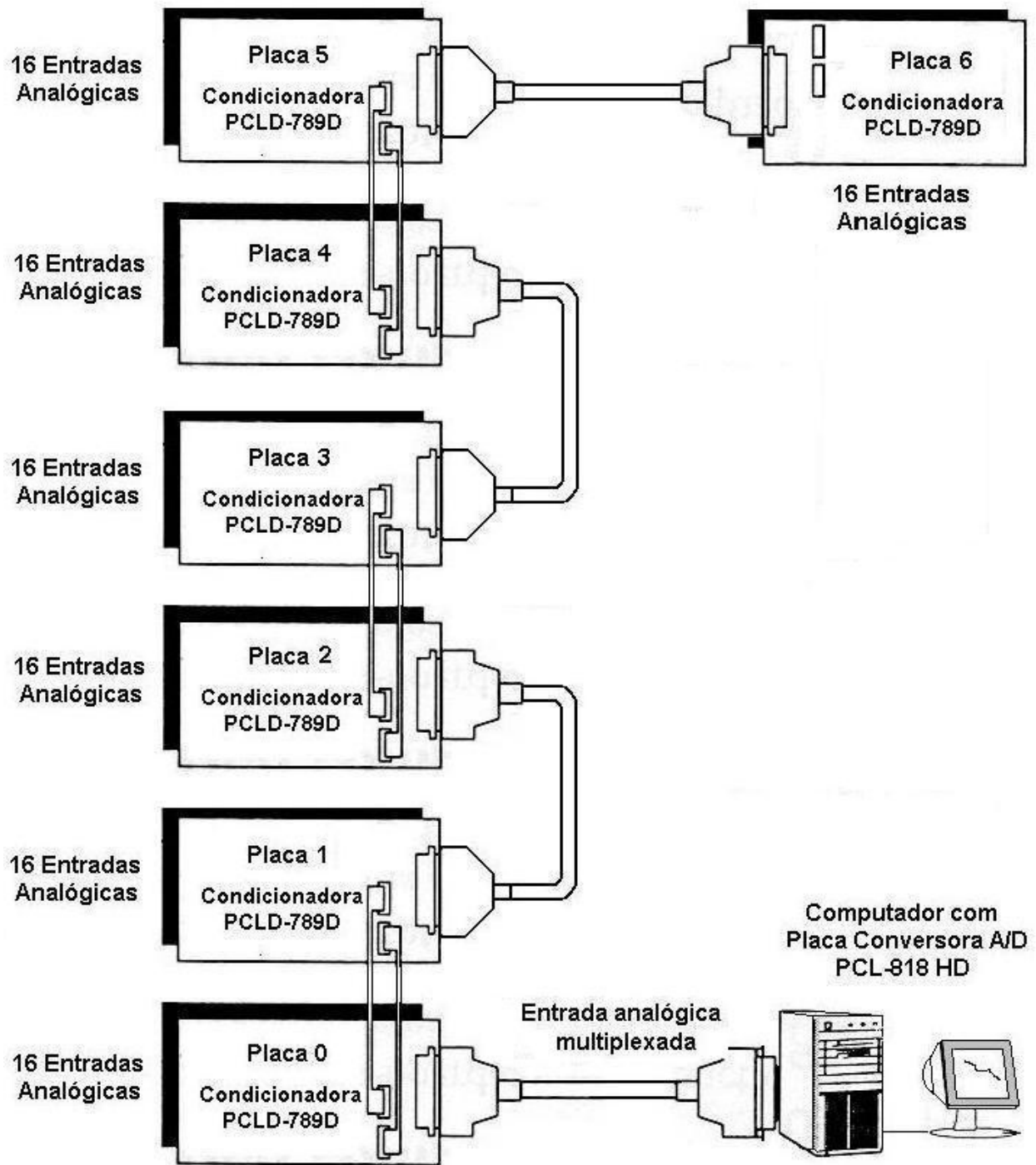


Figura 3.16 – Conexão das placas e computador do sistema de coleta de dados.

As Tabelas 3.2 a 3.8 relacionam o sensor conectado a cada um dos canais das placas condicionadoras 0 a 6, respectivamente, assim como a nomenclatura de identificação do ponto de medição. Os termopares, distribuídos em 4 estações de medição, conforme apresentado na Seção 3.3.1, receberam nomes relativos à posição de cada um deles, compostos de cinco caracteres alfanuméricos. O primeiro caractere, a letra “T”, indica que se trata de uma posição de medida de temperatura. O segundo caractere, a letra “A” ou um dos algarismos “1”, “2” ou “3”, caracteriza a estação de medição (Fig. 3.4). O terceiro caractere, a letra “E”, “I” ou “S”, caracteriza, respectivamente, os termopares externos (brasados à parede externa), internos (posicionados a 3 mm da parede interna) ou das sondas verticais. Os dois últimos dígitos representam o número sequencial do termopar, em sentido horário a partir do termopar superior, para os termopares externos e internos, e em sentido descendente para os termopares das sondas. Os termistores no interior das caixas das juntas frias de referência receberam os nomes de TC1a e TC1a, na caixa 1, e de TC2a e TC2b, na caixa dois. As posições de medida de nível foram denominadas N1 e N2, as de medida de pressão P1 e P2 e, finalmente, a posição de medida de vazão foi denominada F1.

Tabela 3.2 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 0, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P0C0	T1I01	Termopar interno da Estação de Medição 1
1	P0C1	T1I02	Termopar interno da Estação de Medição 1
2	P0C2	T1I03	Termopar interno da Estação de Medição 1
3	P0C3	T1I04	Termopar interno da Estação de Medição 1
4	P0C4	T1I05	Termopar interno da Estação de Medição 1
5	P0C5	T1I06	Termopar interno da Estação de Medição 1
6	P0C6	T1I07	Termopar interno da Estação de Medição 1
7	P0C7	T1I08	Termopar interno da Estação de Medição 1
8	P0C8	T1I09	Termopar interno da Estação de Medição 1
9	P0C9	T1I10	Termopar interno da Estação de Medição 1
10	P0C10	T1I11	Termopar interno da Estação de Medição 1
11	P0C11	T1I12	Termopar interno da Estação de Medição 1
12	P0C12	T1E01	Termopar externo da Estação de Medição 1
13	P0C13	T1E02	Termopar externo da Estação de Medição 1
14	P0C14	T1E03	Termopar externo da Estação de Medição 1
15	P0C15	T1E04	Termopar externo da Estação de Medição 1

Tabela 3.3 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 1, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P1C0	T1E05	Termopar externo da Estação de Medição 1
1	P1C1	T1E06	Termopar externo da Estação de Medição 1
2	P1C2	T1E07	Termopar externo da Estação de Medição 1
3	P1C3	T1E08	Termopar externo da Estação de Medição 1
4	P1C4	T1E09	Termopar externo da Estação de Medição 1
5	P1C5	T1E10	Termopar externo da Estação de Medição 1
6	P1C6	T1E11	Termopar externo da Estação de Medição 1
7	P1C7	TAS01	Termopar de sonda da Estação de Medição A
8	P1C8	T1S01	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
9	P1C9	T1S02	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
10	P1C10	T1S03	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
11	P1C11	T1S04	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
12	P1C12	T1S05	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
13	P1C13	T1S06	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
14	P1C14	T1S07	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
15	P1C15	T1S08	Termopar de sonda da Estação de Medição 1

Tabela 3.4 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 2, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P2C0	T1S09	Termopar de sonda da Estação de Medição 1
1	P2C1	T2S01	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
2	P2C2	T2S02	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
3	P2C3	T2S03	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
4	P2C4	T2S04	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
5	P2C5	T2S05	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
6	P2C6	T2S06	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
7	P2C7	T2S07	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
8	P2C8	T2S08	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
9	P2C9	T2S09	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
10	P2C10	T2S10	Termopar de sonda da Estação de Medição 2
11	P2C11	–	–
12	P2C12	–	–
13	P2C13	–	–
14	P2C14	–	–
15	P2C15	T1E12	Termopar externo da Estação de Medição 1

Tabela 3.5 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 3, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P3C0	T2I02	Termopar interno da Estação de Medição 2
1	P3C1	T2I03	Termopar interno da Estação de Medição 2
2	P3C2	T2I04	Termopar interno da Estação de Medição 2
3	P3C3	T2I05	Termopar interno da Estação de Medição 2
4	P3C4	T2I06	Termopar interno da Estação de Medição 2
5	P3C5	T2I07	Termopar interno da Estação de Medição 2
6	P3C6	T2I08	Termopar interno da Estação de Medição 2
7	P3C7	T2I09	Termopar interno da Estação de Medição 2
8	P3C8	T2I10	Termopar interno da Estação de Medição 2
9	P3C9	T2I11	Termopar interno da Estação de Medição 2
10	P3C10	T2I12	Termopar interno da Estação de Medição 2
11	P3C11	T2I13	Termopar interno da Estação de Medição 2
12	P3C12	T2I14	Termopar interno da Estação de Medição 2
13	P3C13	T2I15	Termopar interno da Estação de Medição 2
14	P3C14	T2I16	Termopar interno da Estação de Medição 2
15	P3C15	T2I17	Termopar interno da Estação de Medição 2

Tabela 3.6 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 4, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P4C0	T2I18	Termopar interno da Estação de Medição 2
1	P4C1	T2I19	Termopar interno da Estação de Medição 2
2	P4C2	T2I20	Termopar interno da Estação de Medição 2
3	P4C3	T2E01	Termopar externo da Estação de Medição 2
4	P4C4	T2E02	Termopar externo da Estação de Medição 2
5	P4C5	T2E03	Termopar externo da Estação de Medição 2
6	P4C6	T2E04	Termopar externo da Estação de Medição 2
7	P4C7	T2E05	Termopar externo da Estação de Medição 2
8	P4C8	T2E06	Termopar externo da Estação de Medição 2
9	P4C9	T2E07	Termopar externo da Estação de Medição 2
10	P4C10	T2E08	Termopar externo da Estação de Medição 2
11	P4C11	T2E09	Termopar externo da Estação de Medição 2
12	P4C12	T2E10	Termopar externo da Estação de Medição 2
13	P4C13	T2E11	Termopar externo da Estação de Medição 2
14	P4C14	T2E12	Termopar externo da Estação de Medição 2
15	P4C15	T2E13	Termopar externo da Estação de Medição 2

Tabela 3.7 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 5, com Ganho 200.

Canal	Identificação no programa de coleta de dados	Identificação do ponto de medição	Sensor conectado
0	P5C0	T2E14	Termopar externo da Estação de Medição 2
1	P5C1	T3I01	Termopar interno da Estação de Medição 3
2	P5C2	T3I02	Termopar interno da Estação de Medição 3
3	P5C3	T3I03	Termopar interno da Estação de Medição 3
4	P5C4	T3I04	Termopar interno da Estação de Medição 3
5	P5C5	T3I05	Termopar interno da Estação de Medição 3
6	P5C6	T3E01	Termopar externo da Estação de Medição 3
7	P5C7	T3E02	Termopar externo da Estação de Medição 3
8	P5C8	T3S01	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
9	P5C9	T3S02	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
10	P5C10	T3S03	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
11	P5C11	T3S04	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
12	P5C12	T3S05	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
13	P5C13	T3S06	Termopar de sonda da Estação de Medição 3
14	P5C14	TAI01	Termopar interno da Estação de Medição A
15	P5C15	TAE01	Termopar externo da Estação de Medição A

Tabela 3.8 – Distribuição de Sinais Coletados na Placa 6, com Ganho 1.

Canal	Identif. no programa de coleta de dados	Identif. do ponto de medição	Sensor conectado
0	P6C0	TC1a	Termistor "a" da caixa de junta fria 1
1	P6C1	TC1b	Termistor "b" da caixa de junta fria 1
2	P6C2	TC2a	Termistor "a" da caixa de junta fria 2
3	P6C3	TC2b	Termistor "b" da caixa de junta fria 2
4	P6C4	N1	Transmissor de Δp do tanque de água fria
5	P6C5	N2	Transmissor de Δp do tanque simulador do GV
6	P6C6	P1	Transmissor de pressão do tanque simulador do GV
7	P6C7	P2	Transmissor de pres. da linha de injeção de água fria
8	P6C8	F1	Transmissor de Δp da placa de orifício
9	P6C9	–	–
10	P6C10	–	–
11	P6C11	–	–
12	P6C12	–	–
13	P6C13	–	–
14	P6C14	–	–
15	P6C15	–	–

Para a aquisição e processamento dos dados foi elaborado um programa de computador em linguagem QBASIC. O programa foi dividido em quatro sub-rotinas:

- a primeira sub-rotina, utilizada para acompanhamento da fase de preparo de cada experimento, permite acompanhar pelo monitor do computador, a evolução dos principais parâmetros que são ajustados para cada experimento, ou seja, a pressão manométrica do sistema, medida no tanque simulador do GV, a vazão de injeção de água fria e algumas temperaturas selecionadas;

- a segunda sub-rotina, utilizada para a coleta dos dados durante o experimento propriamente dito, é acionada pouco antes da inversão da válvula de três vias (V4 da Fig. 3.3), quando a frequência de coleta de dados exige a utilização do modo ADM (acesso direto à memória) e não permite a conversão dos dados coletados nas respectivas unidades de medida e, conseqüentemente, não permite que a evolução do experimento seja acompanhada na tela do computador, tornando necessário que o instante de conclusão do mesmo seja estimado previamente;

- a terceira sub-rotina, acionada logo após o encerramento do experimento, extrai os dados coletados da memória do computador, separa os mesmos, faz a conversão de milivolts para as respectivas unidades de medida e gera uma planilha de dados com os resultados do experimento; e,

- A quarta sub-rotina, que pode ser acionada a qualquer momento, independentemente do restante do programa, faz uma análise preliminar do experimento, apresentando no monitor do computador uma seqüência de gráficos com a evolução dos principais parâmetros medidos, extraídos da planilha de dados gerada pela terceira sub-rotina.

3.4. Calibração dos Instrumentos e Análise de Incertezas

A calibração dos instrumentos primários de medidas foi realizada comparando-se os resultados de toda a cadeia de medida (sensor, cabos e sistema de aquisição) com padrões de referência. Foram determinados os desvios padrões das médias das leituras (S_x), as equações de correção, os coeficientes de determinação (R^2) e os erros padrões das curvas ajustadas ($U_{y,x}$). As

expressões encontradas na regressão foram adicionadas ao programa de aquisição de dados. Foram avaliadas as incertezas dos parâmetros primários e, também, foram avaliadas as incertezas dos demais resultados experimentais por meio de métodos de propagação de erro. Os resultados das calibrações são apresentados no Anexo A (temperaturas), Anexo B (vazão de injeção de água fria) e Anexo C (pressão do sistema). Outras medidas, tais como nível no tanque de água fria, nível no vaso de pressão simulador do GV e temperaturas e pressão ao longo das tubulações da instalação experimental, utilizadas apenas para controle do sistema, não tiveram apresentados os resultados de sua calibração.

A equação utilizada no cálculo do desvio padrão amostral, S_x , que caracteriza a dispersão dos resultados, é mostrada abaixo (INMETRO, 1998):

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

onde:

x = valor de cada leitura;

\bar{x} = média das leituras; e,

n = número de leituras.

A partir dos dados coletados, ajustou-se, por regressão, uma reta para cada linha de medida, expressa por:

$$y = ax + b \quad (3)$$

onde,

y é o valor da variável física corrigida pela curva de calibração;

x é o valor medido da variável física; e,

a e b são os coeficientes da curva de calibração ajustados pelo método dos mínimos quadrados.

Também, é apresentado o valor do coeficiente de determinação, R^2 (R = coeficiente de correlação), para a curva de regressão. Este coeficiente varia de 0 a 1 e mostra a proximidade dos valores estimados da curva de regressão em correspondência com os dados verdadeiros. Quanto mais próximo de 1, mais confiável é a regressão. As equações ajustadas são acrescentadas ao programa de aquisição de dados, corrigindo-se assim as leituras enviadas pelos sensores.

O erro padrão da curva de regressão, $U_{y,x}$, que é a medida de erro na previsão da quantidade “y” para um “x” individual, também, foi calculado utilizando-se a seguinte equação (HOLMAN, 1998):

$$U_{y,x} = \sqrt{\left[\frac{1}{(n-2)} \right] \left[\sum (y - \bar{y})^2 - \frac{[\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})]^2}{\sum (x - \bar{x})^2} \right]}, \quad (4)$$

A consolidação da incerteza, U , associada a cada cadeia de medição, foi realizada utilizando a seguinte expressão (COLEMAN E STEELE, 1999):

$$U = [(U_p)^2 + (S_x)^2 + (U_{y,x})^2]^{1/2}, \quad (5)$$

Onde,

U_p é a incerteza associada ao padrão de calibração;

S_x é a incerteza associada à variação estatística das medições da variável física medida (desvio padrão), e;

$U_{y,x}$ é a incerteza associada a curva ajustada (erro padrão).

O método adotado para o cálculo da propagação das incertezas foi baseado na proposta de Kline e McClintock (HOLMAN, 1998) (FIGLIOLA e BEASLEY, 1991). Supondo que um resultado R de um parâmetro seja função de várias variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Assim:

$$R = R(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad (6)$$

A incerteza no parâmetro R será:

$$U_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} U_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} U_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} U_n \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

onde,

$U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ são as incertezas consolidadas das variáveis primárias independentes, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$.

3.5. A Matriz de Testes

A Tabela 3.9 apresenta a matriz de testes proposta. A faixa do número de Froude (de 0,02 a 0,27) foi obtida pela variação da velocidade média de injeção da água fria, U_0 , prevista entre

0,0099 e 0,0989 m/s, e pela variação da temperatura da água quente, $T_H = T_0 + (\Delta T)_{\max}$, prevista entre 140° C a 219° C. A quantidade prevista de pontos experimentais foi de 31. Como pode ser observado na tabela, a maior concentração de pontos experimentais situa-se nas faixas de número de Froude de 0,02 a 0,036 e de 0,09 a 0,2. Alguns dos experimentos da matriz proposta foram repetidos sem as sondas verticais de termopares, para que se pudesse avaliar a interferência da mesma sobre o escoamento.

Tabela 3.9 – Variação dos parâmetros U_0 , T_H e do número de Froude correspondente na matriz de testes proposta.

Temperatura, T_H [°C]	219	180	140
Velocidade, U_0 [m/s]	Número de Froude, Fr		
0,0099	0,020	0,024	0,030
0,0119	0,024	0,029	0,036
0,0133	0,027	–	–
0,0148	0,030	0,036	0,045
0,0163	0,033	–	–
0,0178	0,036	–	–
0,0297	0,060	–	0,090
0,0444	0,090	0,108	0,135
0,0594	0,120	0,144	0,180
0,0666	0,135	0,160	0,200
0,0740	0,150	0,180	0,225
0,0888	0,180	0,216	0,270
0,0989	0,200	0,240	–

4. O MODELO NUMÉRICO

A simulação numérica dos experimentos foi realizada utilizando-se o código comercial de fluido-dinâmica computacional CFX 13.0 [ANSYS, 2010], em uma geometria simplificada. Foram feitas tentativas de simplificação da geometria mostrada na Fig. 3.4. Finalmente, chegou-se ao domínio de solução mostrado em detalhes na Fig. 4.1. O modelo computacional foi gerado com dois domínios distintos: um sólido, correspondendo à parede do tubo, e o outro fluido, correspondendo à água em seu interior e no interior do vaso de pressão. Foi adotado um plano de simetria vertical, ao longo do comprimento do tubo, para reduzir pela metade o tamanho da malha, minimizando o tempo de processamento. As paredes internas na região do vaso de pressão foram consideradas adiabáticas assim como as paredes externas do tubo. As condições de escoamento de entrada e saída foram definidas, respectivamente, na extremidade inferior do tubo e na extremidade superior do vaso.

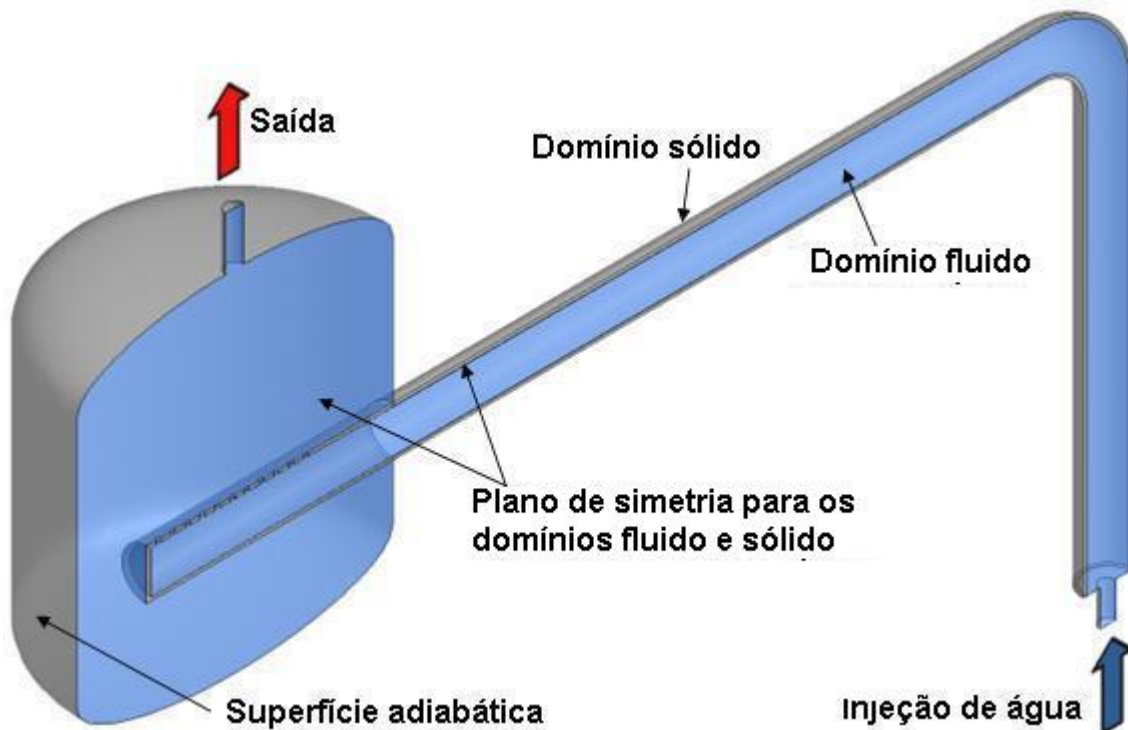


Figura 4.1. Modelo do domínio computacional e condições de contorno.

Uma importante simplificação da geometria simulada foi a exclusão dos flanges e de parte dos detalhes da região inferior, onde ocorre a injeção. Simulações realizadas com e sem esses mesmos detalhes mostraram que tais simplificações não têm uma influência significativa sobre os resultados. A Figura 4.2 mostra duas malhas utilizadas nas simulações que permitiram chegar a essa conclusão. A malha à direita inclui os flanges e alguns dos detalhes da região inferior, removidos na malha à esquerda.

A malha mostrada na Fig. 4.3 foi utilizada na tentativa de se excluir o vaso de pressão da simulação. Nesse caso, as condições de contorno definidas para a parede do tubo foram mantidas no trecho do mesmo que penetra no interior do vaso. As condições de escoamento de saída foram definidas nos onze orifícios localizados na região superior do tubo e no trecho no interior do vaso. A vazão de saída foi dividida igualmente entre os orifícios. Entretanto, esta simplificação mostrou afetar significativamente os resultados, não tendo sido utilizada no modelo final, apesar de gerar uma malha bastante reduzida em número de volumes finitos.

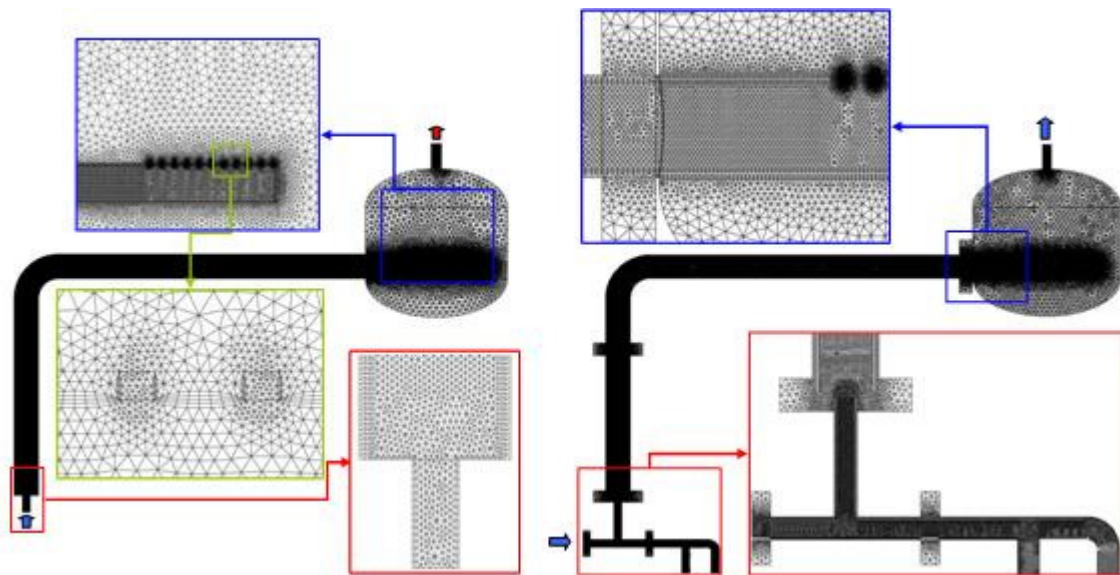


Figura 4. 2. Detalhes de duas malhas, simplificada (à esquerda) e completa (à direita), utilizadas nas simulações que permitiram chegar à malha simplificada.

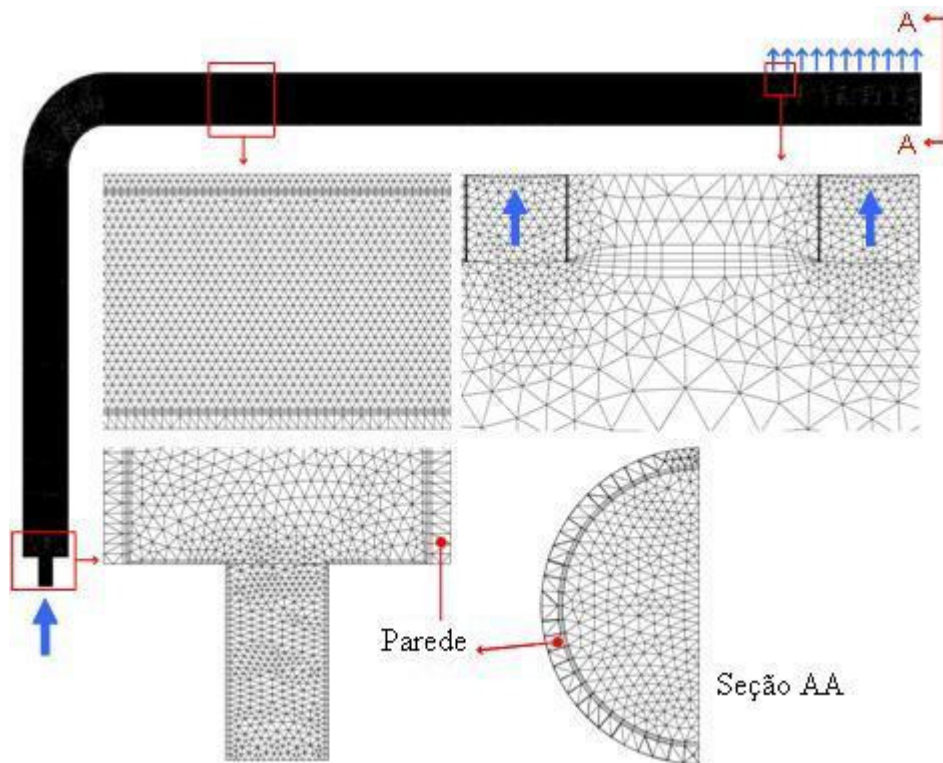


Figura 4.3. Malha utilizada na tentativa de se excluir o vaso de pressão do domínio de solução.

Foram feitas algumas simplificações no que se refere às condições iniciais para a simulação numérica dos experimentos de estratificação térmica: a pressão do sistema, a vazão e a temperatura de injeção de água fria foram tratadas como constantes, tendo sido definidos para cada experimento como a média dos valores medidos durante o período de tempo simulado; e, a temperatura inicial do sistema foi considerada homogênea e igual à média das temperaturas medidas com a totalidade dos termopares de fluido (internos vizinhos à parede e aqueles posicionados nas sondas verticais). As propriedades da água, tais como densidade, viscosidade e expansividade térmica, foram ajustadas por regressão em função da temperatura, a partir de dados extraídos da Tabela IAPWS-IF97, International Steam Tables - Properties of Water and Steam based on the Industrial Formulation IAPWS-IF97 (IAPWS, 2007), para a faixa de simulação (25 °C a 221 °C).

Foi gerada uma malha tetraédrica não estruturada, com elementos prismáticos nas vizinhanças da parede para o modelo simplificado, apresentado à esquerda na Fig. 4.2.

Refinamentos progressivos da grade foram aplicados para dimensionamento (das arestas) dos elementos da tubulação. A razão entre a altura da última camada prismática e da primeira tetraédrica foi mantida igual a 0,5. Foram construídas três camadas sólidas de volumes prismáticos estruturados próximo da superfície nos domínios sólidos e líquidos. O fator de crescimento entre as camadas prismáticas foi mantido constante com um valor de 1,2. Foram aplicadas malhas localizadas com arestas de 5 mm tanto no bocal de entrada do tubo vertical quanto no bocal de saída do vaso. Nos furos de saída do tubo horizontal foram utilizadas arestas de 2 mm para todas as malhas. Os elementos do interior do vaso puderam expandir livremente, com um fator de crescimento de 1,2. A Figura 4.4 apresenta em detalhes a malha final, adotada nas simulações numéricas, com 2.137.647 elementos no domínio fluido e 533.321 elementos no domínio sólido.

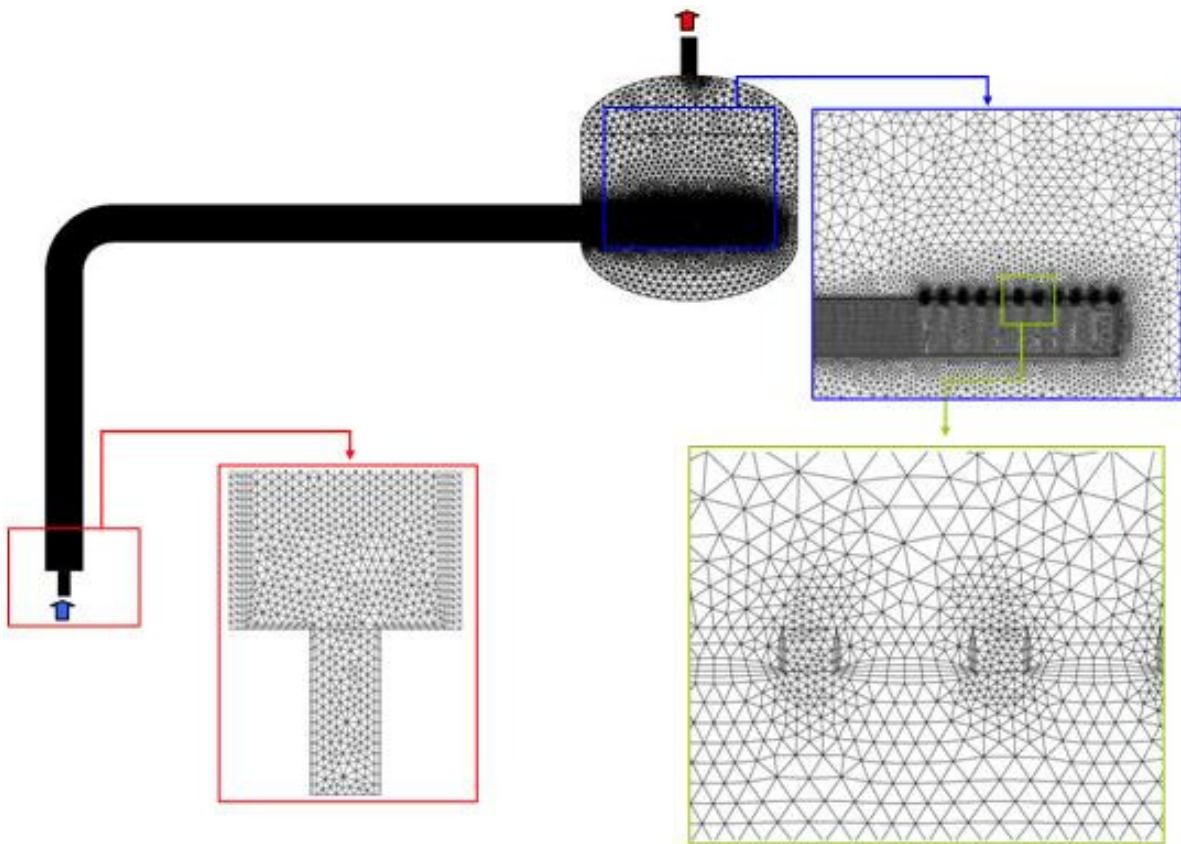


Figura 4.4. Malha utilizada nas simulações numéricas, com detalhes de refinamento no ponto de injeção de água fria e nos orifícios de saída do tubo horizontal para o vaso de pressão.

Foram solucionadas as equações de Navier-Stokes com média de Reynolds (RANS), as duas equações do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$, com funções de parede escaláveis, o modelo de empuxo completo e o modelo de transferência de calor energia total, com o termo referente ao trabalho exercido pelas forças viscosas. As simulações foram realizadas utilizando-se de processamento paralelo, com até seis estações de trabalho, cada estação com dois processadores de quatro núcleos e 24 GB de memória RAM. Todas as simulações foram realizadas utilizando o esquema numérico de alta resolução para a discretização das equações de conservação e dos termos do modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$ e o esquema implícito de Euler de segunda ordem para os termos transientes.

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1. A Matriz de Testes Realizada

A matriz de testes planejada inclui um total de 30 experimentos, cobrindo uma faixa de número de Froude de 0,02 a 0,27, sendo 12 experimentos realizados com a temperatura da água quente a 219 °C, 9 experimentos a 180 °C e 9 experimentos a 140 °C. Entretanto, foram realizados experimentos em número maior que o previsto na matriz de testes original, muito embora não tenha sido possível a realização dos experimentos previstos com a temperatura da água quente a 140 °C (Seção 3.4). Os experimentos com a água quente a 140 °C deveriam ser realizados com o sistema à pressão de 3,5 bar manométrica, uma vez que a temperatura da água quente corresponde à temperatura de saturação. Porém, o sistema de controle e alívio de pressão (válvula V8 da Fig. 3.3 e tubulação à jusante) não foi capaz de manter a pressão nesse nível satisfatoriamente estável. Oscilações de pressão geram oscilações amplificadas na vazão de injeção, inviabilizando os experimentos.

A matriz de testes original previa, ainda, experimentos com número de Froude de até no máximo 0,270. A matriz de testes efetivamente realizada contém um experimento com número de Froude de 0,345 e outro de 0,436. A razão disso é que se previa que, a partir de $Fr = 0,2$, a turbulência resultante já seria suficiente para provocar mistura entre as duas camadas de fluido, impedindo o processo de estratificação térmica monofásica. Porém, a mistura não ocorreu mesmo para $Fr = 0,436$. Experimentos com número de Froude maior não foram realizados por problemas técnicos, descritos na Seção 5.2.

O número de experimentos realizados foi superior ao número de experimentos previstos devido à forma em que os experimentos são executados: o sistema é aquecido e pressurizado por vapor suprido pela caldeira, ao mesmo tempo em que a vazão de água fria é ajustada através de uma tubulação de desvio, até que os valores previstos para todos os parâmetros tenham sido devidamente ajustados. Feito isto, a vazão é redirecionada para injeção na seção de testes. Diferenças na perda de carga entre as tubulações de desvio e de injeção resultam na variação da vazão ajustada. Essa variação não é totalmente previsível, ainda que, após a realização de um experimento, este seja reproduzível. Foram realizados experimentos com a temperatura da água quente nos valores previstos de 219 °C e 180 °C, obtidos com a pressão do sistema ajustada para as pressões manométricas previstas de 22,0 bar (tendo sido obtidos 21,0 a 21,4 bar) e 10,5 bar

(tendo sido obtidos 9,1 a 10,2 bar), respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta a matriz de testes efetivamente realizada.

Tabela 5.1 - Matriz de testes efetivamente realizada.

Experimentos com a temperatura da água quente a aproximadamente $T_H \approx 219^\circ\text{C}$				Experimentos com a temperatura da água quente a aproximadamente $T_H \approx 180^\circ\text{C}$			
Experi- mento	Nº de Froude	Vazão [kg/s]	Pressão [bar]	Experi- mento	Nº de Froude	Vazão [kg/s]	Pressão [bar]
2019	0,019	0,099	21,0	1039	0,039	0,172	10,1
2026	0,026	0,130	21,1	1044	0,044	0,193	10,0
2028	0,028	0,139	21,1	1045	0,045	0,194	10,1
2031	0,031	0,158	21,0	1047	0,047	0,205	10,0
2038	0,038	0,195	21,1	1048	0,048	0,213	10,0
2043	0,043	0,223	21,2	1055	0,055	0,245	10,2
2044	0,044	0,223	21,1	1068	0,068	0,291	9,6
2050	0,050	0,254	21,1	1080	0,080	0,352	10,1
2051	0,051	0,260	21,1	1091	0,091	0,398	10,1
2056	0,056	0,283	21,2	1097	0,097	0,427	10,0
2064	0,064	0,328	21,1	1110	0,110	0,491	10,0
2069	0,069	0,351	21,1	1113	0,111	0,496	10,0
2081	0,081	0,420	21,2	1134	0,134	0,583	9,6
2082	0,082	0,422	21,2	1140	0,140	0,610	9,8
2103	0,103	0,539	21,2	1150	0,150	0,662	9,1
2105	0,105	0,548	21,3	1345	0,345	1,540	9,8
2106	0,106	0,544	21,1	1436	0,436	1,904	10,2
2107	0,107	0,551	21,2				
2115	0,115	0,586	21,1				
2131	0,131	0,670	21,2				
2146	0,146	0,758	21,1				
2154	0,154	0,802	21,2				
2158	0,158	0,786	21,1				
2159	0,159	0,824	21,2				
2170	0,170	0,885	21,2				
2204	0,204	1,065	21,2				
2212	0,212	1,095	21,4				

A nomenclatura dos experimentos, conforme apresenta a Tabela 5.1, foi formada por 4 algarismos. O primeiro algarismo indica a pressão de testes: “2” indica que o experimento foi realizado à pressão manométrica de aproximadamente 22 bar; e, “1” indica que o experimento foi realizado à pressão manométrica de aproximadamente 10,5 bar. Os três últimos algarismos correspondem às três primeiras casas decimais do número de Froude.

5.2. Tratamento Inicial dos Dados Experimentais

5.2.1. Definição do Instante Zero

Cada experimento realizado resultou em uma planilha de dados contendo a evolução das diversas medidas de vazão, pressão e temperatura. Inicialmente, o instante zero de cada experimento foi definido como sendo o instante da inversão da válvula de três vias (válvula V4 da Fig. 3.3), quando a vazão de água fria, já ajustada, era desviada para a seção de testes. Posteriormente, o instante zero foi redefinido como o instante em que a água fria atinge os termopares de fluido da Estação de Medição A (Fig. 3.4). Esta estação possui um termopar de fluido posicionado a 3 mm da parede, um termopar de fluido no centro da seção de escoamento e um termopar brasado à parede externa. O instante zero foi definido como o momento em que a média entre as duas temperaturas de fluido da Estação de Medição A atinge um valor 35°C inferior ao que apresentava no instante da inversão da válvula de três vias. O resfriamento desses dois termopares é bastante brusco e praticamente simultâneo. O mesmo não ocorre com o termopar de parede, cujo resfriamento é bem mais suave devido à condução térmica na parede, razão pela qual este termopar foi excluído da média. As planilhas com os resultados experimentais foram todas ajustadas para essa nova condição. Assim, para o Experimento 2159, por exemplo, o novo instante zero ocorreu 23,9 s após a inversão da válvula V4, uma vez que a média entre as duas temperaturas de fluido medidas na Estação de Medição A era de 217°C, no instante da inversão da válvula V4, e 217°C, 23,9 s após. A Figura 5.1 ilustra o procedimento.

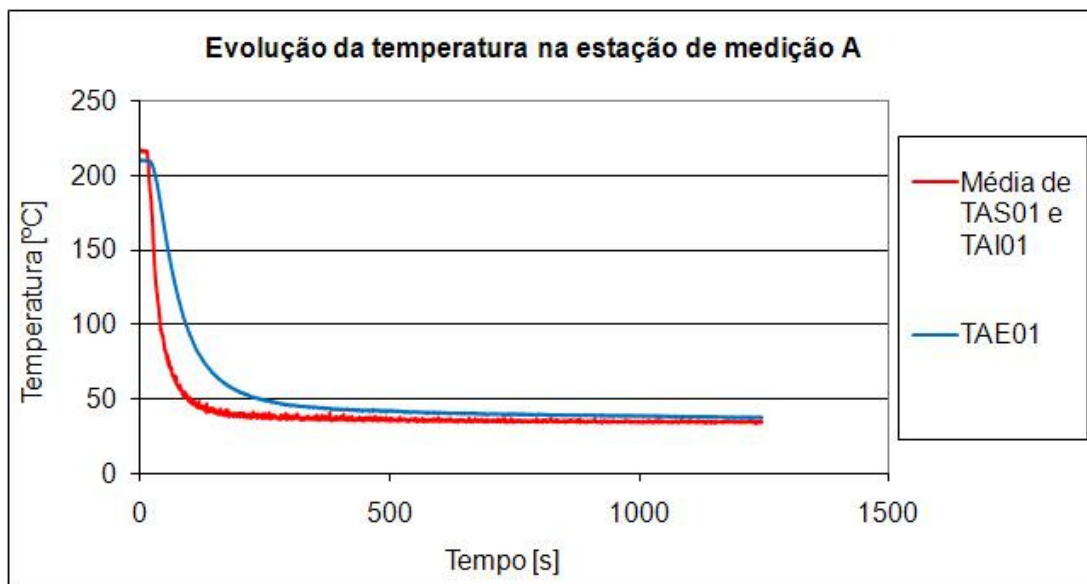


Figura 5.1 – Evolução das temperaturas na Estação de Medição A durante o Experimento 2159, a partir da inversão da válvula V4.

5.2.2. Restrição à Duração dos Experimentos

No início de cada experimento, o vaso de pressão simulador do gerador de vapor era preenchido com água à temperatura de saturação até uma altura pouco superior ao tubo simulador do bocal de injeção. Acima do nível da água, o vaso de pressão estava preenchido com vapor, condição semelhante à de operação do gerador de vapor. Essa grande camada de vapor constituía-se em um fator de estabilização da pressão do sistema. Entretanto, ao longo do experimento, uma vazão de água equivalente à vazão de injeção escoava do tubo simulador do bocal de injeção para o interior do vaso de pressão, elevando o nível de água no interior do mesmo. A partir do momento em que a água preenchia todo o tanque, sem a camada de vapor estabilizadora, a pressão no sistema passava a oscilar intensamente. Além disso, essa oscilação de pressão refletia de forma amplificada na vazão de injeção. Assim, o experimento só foi considerado válido enquanto o vaso de pressão simulador do gerador de vapor ainda possuía uma camada de vapor estabilizando a pressão do sistema. As Figuras 5.2 e 5.3, a seguir apresentam gráficos com a evolução da pressão e da vazão durante o Experimento 2159. Pelos gráficos das duas figuras pode-se notar que, a partir de aproximadamente 650 s, as oscilações na pressão e na vazão levam a altos níveis de incerteza nestes parâmetros. Nesse instante, já havia ocorrido todo o processo de

interesse para a simulação da estratificação térmica. Entretanto, tais oscilações constituíram-se no principal fator que inviabilizaram experimentos com número de Froude acima de 0,436.

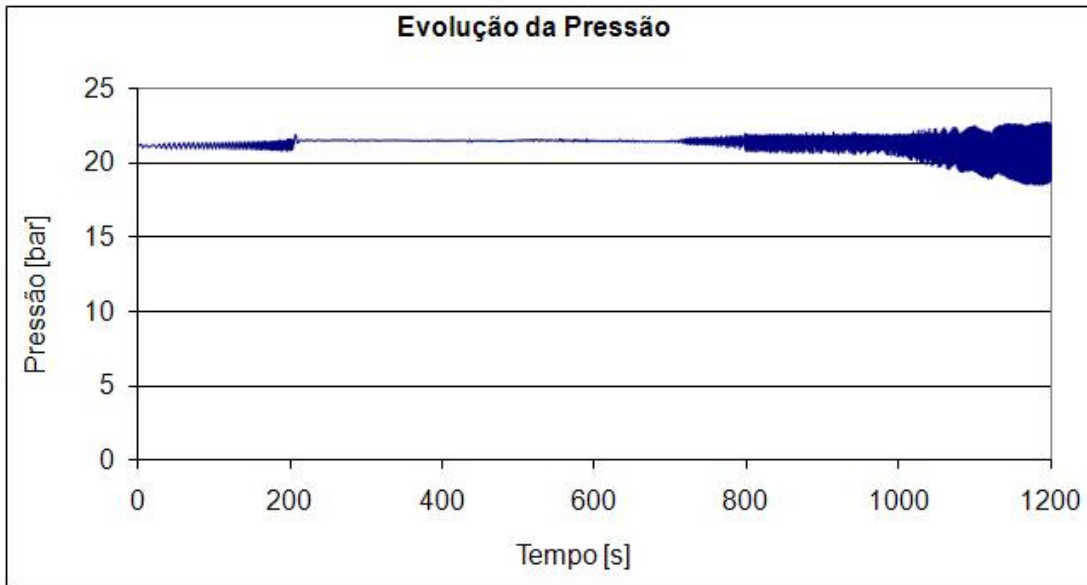


Figura 5.2 – Evolução da pressão durante o Experimento 2159.

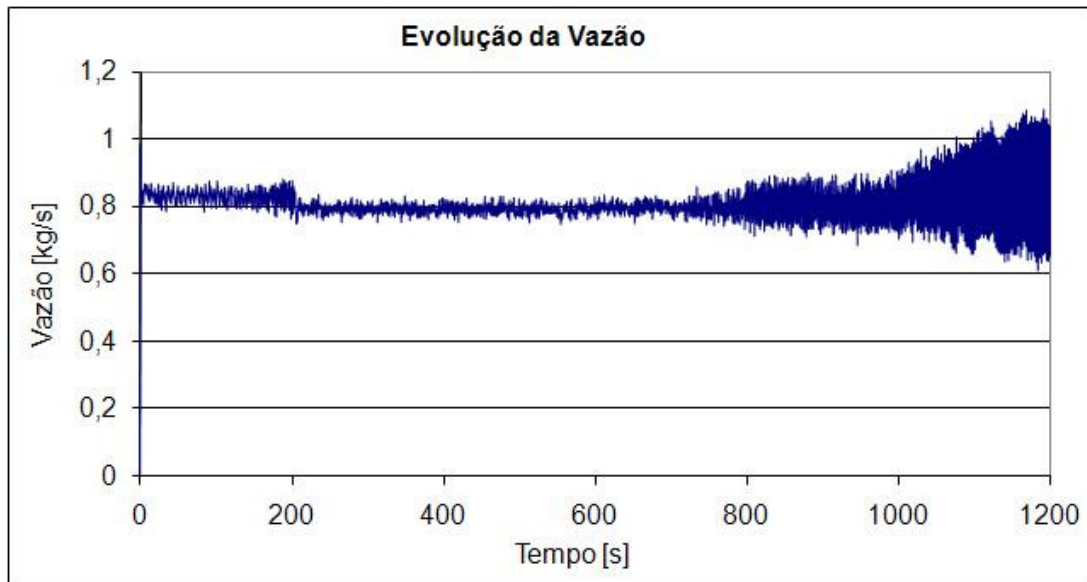


Figura 5.3 – Evolução da vazão durante o Experimento 2159.

5.2.3. Resultados das Medidas de Temperatura

O objetivo principal dos experimentos é caracterizar a estratificação térmica monofásica no fluido, a partir da distribuição de temperatura no mesmo, e a variação de temperatura resultante nas paredes do tubo. Assim, os dados resultantes são em sua maioria medidas de temperatura, obtidas com os termopares de fluido e de parede. As Figuras 5.4, 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, os nomes dos diversos termopares das Estações de Medição 1, 2 e 3, com as cotas dos termopares de sonda.

Cada experimento teve uma duração de pelo menos 300 s. Como visto na Seção 3.3.3, foram coletados dados de 103 canais de medida a uma frequência de 3 Hz, o que resultou em um total de mais de 90.000 dados por experimento, condição característica de experimentos termofluidodinâmicos transientes. A apresentação de resultados em forma de tabelas seria bastante inconveniente. Assim, decidiu-se por apresentar os resultados de seis experimentos diversos, em forma de gráficos com a evolução da temperatura durante os experimentos. Resultados em forma de planilhas Excel serão disponibilizados pelo autor, como foi feito com os resultados do Experimento 2146, para os participantes do *Tema Especial de Termo-Hidráulica (THSP1)*, do *17th Meeting on Nuclear Reactor Physics and Thermal Hydraulics (XVII ENFIR)*, durante a *International Nuclear Atlantic Conference (INAC 2011)*, realizado em Belo Horizonte de 24 a 28 de outubro de 2011, em que se propôs a simulação de dois experimentos, utilizando códigos de CFD (REZENDE et al., 2011). Além da participação do grupo do CDTN/UNICAMP, um grupo do IPEN, São Paulo, também apresentou resultados de simulação numérica dos experimentos (ANDRADE et al., 2011).

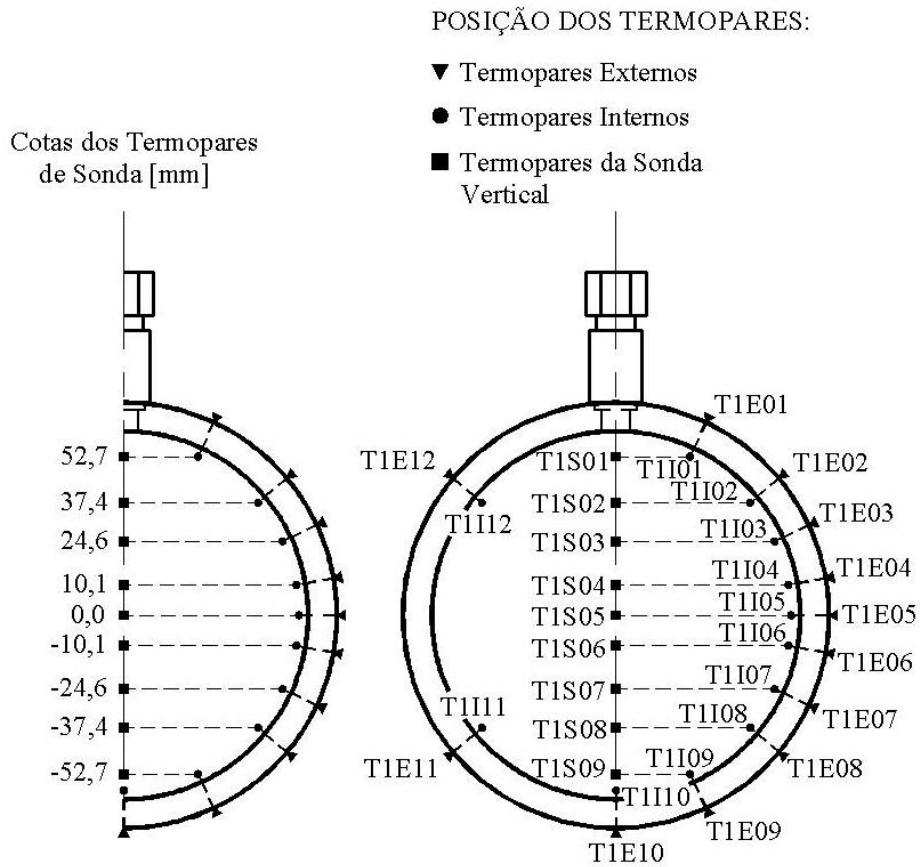


Figura 5.4 – Posição dos termopares da Estação de Medição 1.

POSIÇÃO DOS TERMOPARES:

- ▼ Termopares Externos
- Termopares Internos
- Termopares da Sonda Vertical

Cotas dos Termopares de Sonda [mm]

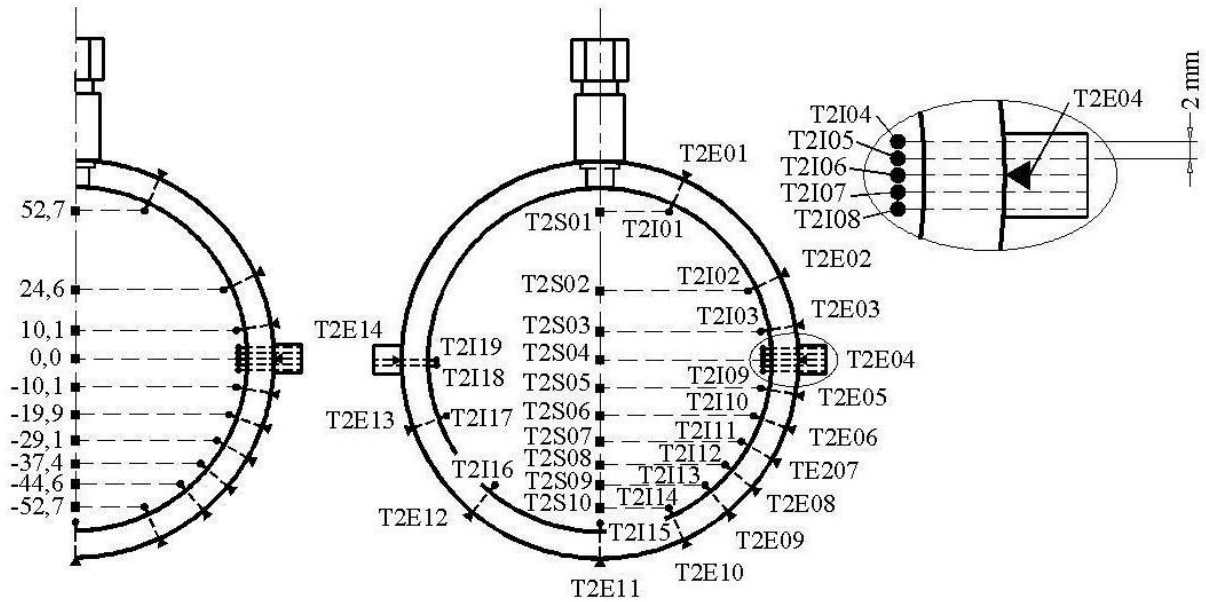


Figura 5.5 – Posição dos termopares da Estação de Medição 2.

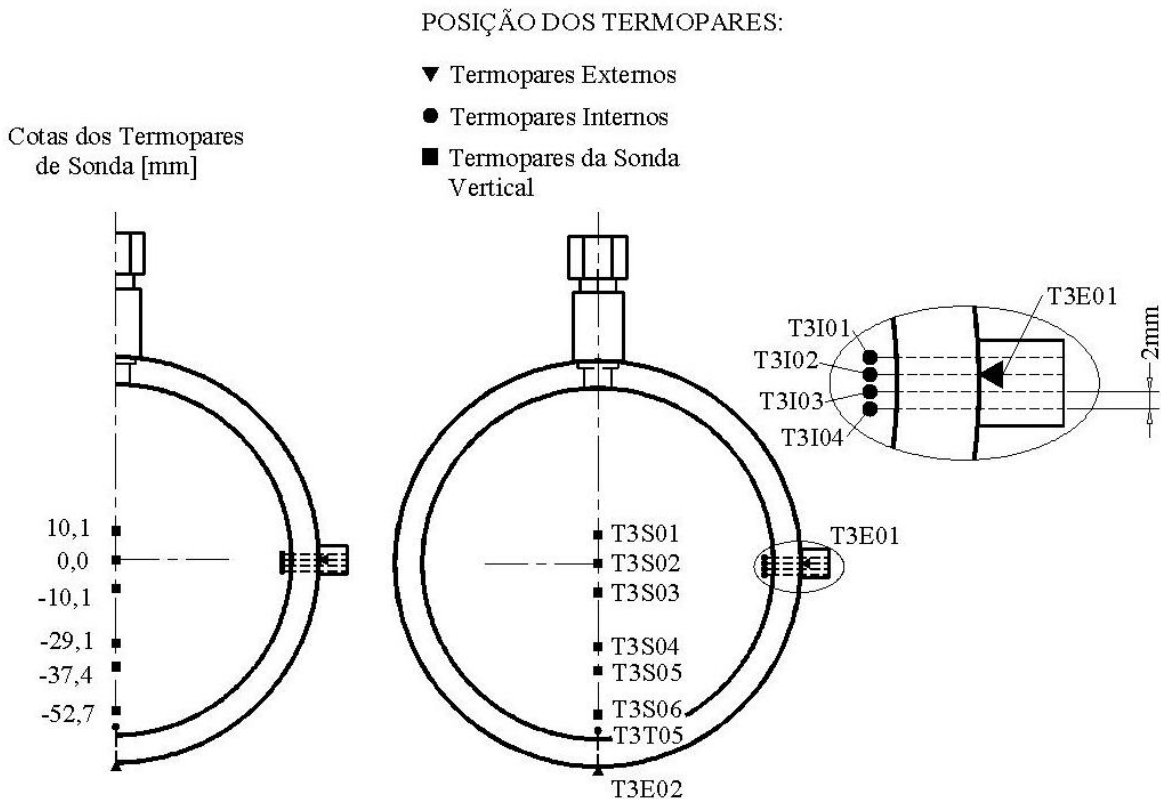


Figura 5.6 – Posição dos termopares da Estação de Medição 3.

5.2.4. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2159

As Figuras 5.7 a 5.15 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 2159. Todos os resultados são apresentados até o instante 300 s, uma vez que nesse instante as condições de estratificação térmica já haviam se dissipado. O Experimento 2159 foi realizado à pressão manométrica de 21,2 bar, com uma vazão de injeção média de 0,824 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,159, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. Este valor de número de Froude, relativamente alto, apresentou elevados gradientes térmicos e oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente. Os resultados dos termopares T1E01 e T1E03 não aparecem na Fig. 5.7, porque os mesmos falharam durante o experimento. O mesmo aconteceu aos termopares T1I08, ausente na Fig. 5.8, T2E03, ausente na Fig. 5.10, e T2S01, ausente na Fig. 5.12.

As Figuras 5.7 a 5.9 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1, localizada relativamente próxima à curva do tubo simulador do bocal de injeção (500 mm). A Figura 5.7 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. Ainda assim, a sequência de resfriamento é coerente com o esperado, com os termopares das cotas inferiores sendo resfriados primeiro, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo. Pode-se observar um comportamento anômalo dos termopares T1E04 e T1E06, entre os instantes 65 s e 90 s. Esse comportamento não foi explicado e não foi observado em outros experimentos.

Quanto aos termopares de fluido desta mesma Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Fig. 5.8 e 5.9, eles apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cota intermediária. Os termopares das cotas inferiores, tanto os posicionados próximos à parede do tubo (T1I07 e T1I10), quanto os posicionados na sonda vertical (T1S07, T1S08 e T1S09), apresentaram curvas de resfriamento sobrepostas.

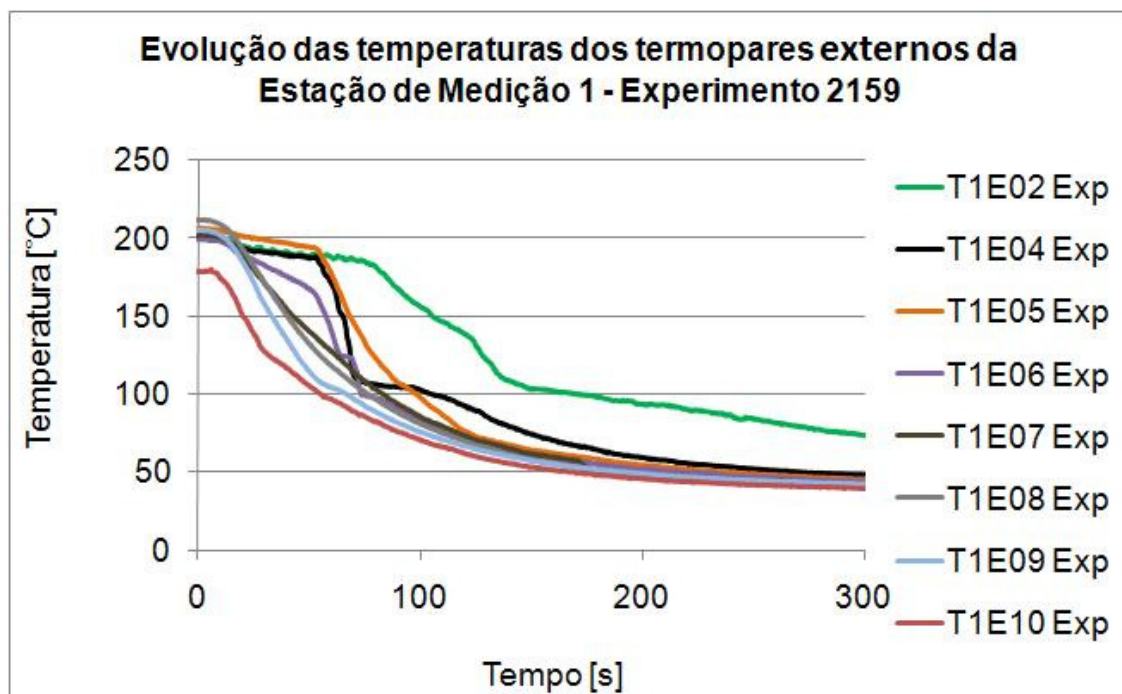


Figura 5.7 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.

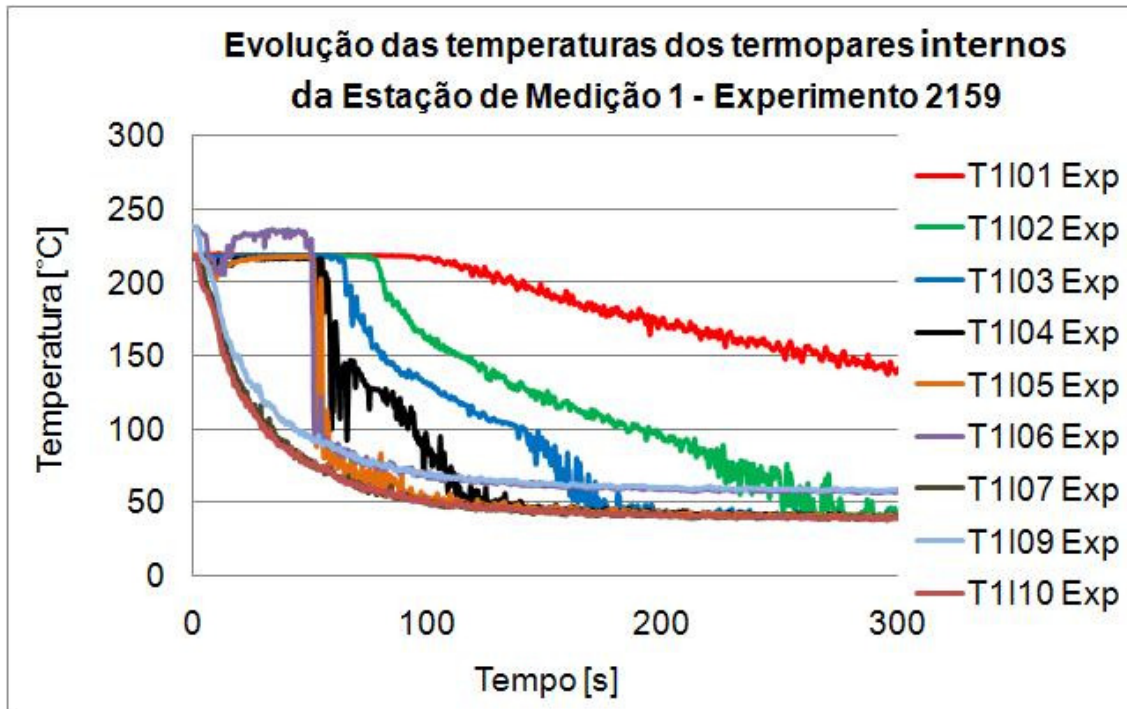


Figura 5.8 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.

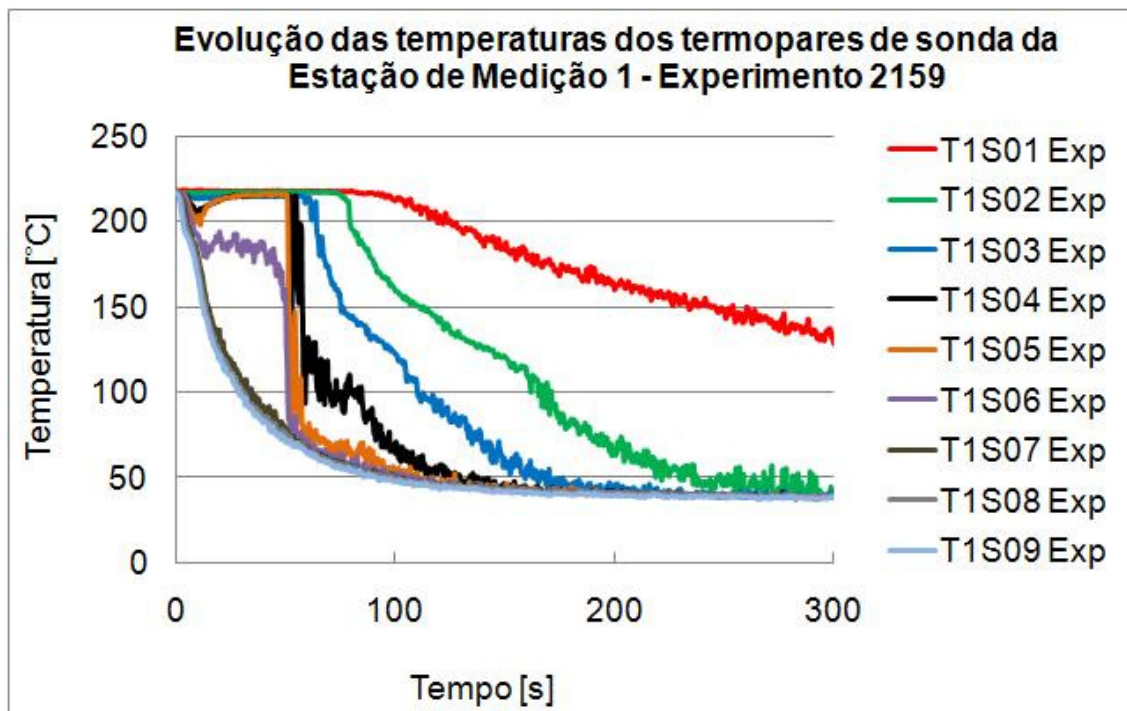


Figura 5.9 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.

A diferença observada no termopar T1I09 pode ser explicada por imprecisão da curva de calibração. Para os termopares internos e externos foi considerada uma reta ajustada a partir da tabela ASTM-E-230, fornecida pelo fabricante dos termopares, conforme Anexo A. Esse resultado leva à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura entre as cotas – 24,6 mm, correspondente aos termopares T1I07 e T1S07, e – 10,1 mm, correspondente aos termopares T1I06 e T1S06. O resfriamento bastante brusco dos termopares internos T1I04, T1I05 e T1I06, e dos termopares de sonda T1S04, T1S05 e T1S06, todos posicionados entre as cotas – 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda frente de água fria, escoando com a interface inferior, com a primeira camada de água fria, entre as cotas – 24,6 mm e – 10,1 mm e com a interface superior entre as cotas + 10,1 mm e + 24,6 mm, correspondente aos termopares T1I03 e T1S03. O resfriamento dos termopares superiores (T1I01 e T1S01) ocorreu após o resfriamento dos demais, bastante defasado no tempo, e de forma mais suave, sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

As Figuras 5.10 a 5.12 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2, localizada a 1200 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.10 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como na Figura 5.7. Aqui, os termopares inferiores, do T2E05 ao T2E11, apresentaram resultados bastante próximos, com a estratificação térmica já bem caracterizada na parede externa do tubo, uma vez que os termopares a partir da cota zero, cota correspondente ao termopar T2E04, foram resfriados de forma bem mais lenta que os termopares inferiores. O termopar superior, T2E01, apresentou um processo de resfriamento totalmente deslocado dos demais.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.11 e 5.12. Os termopares das cotas inferiores, tanto os posicionados próximos à parede do tubo (T2I12, T2I13, T2I14 e T2I15), quanto os posicionados na sonda vertical (T2S08, T2S09 e T2S10), apresentaram curvas de resfriamento sobrepostas, com os termopares T2I10, T2I11, T2S06 e T2S07 sendo resfriados logo em seguida, caracterizando uma frente de água fria de perfil busco até a cota – 37,4 mm, mas que atinge até a cota – 19,9 mm.

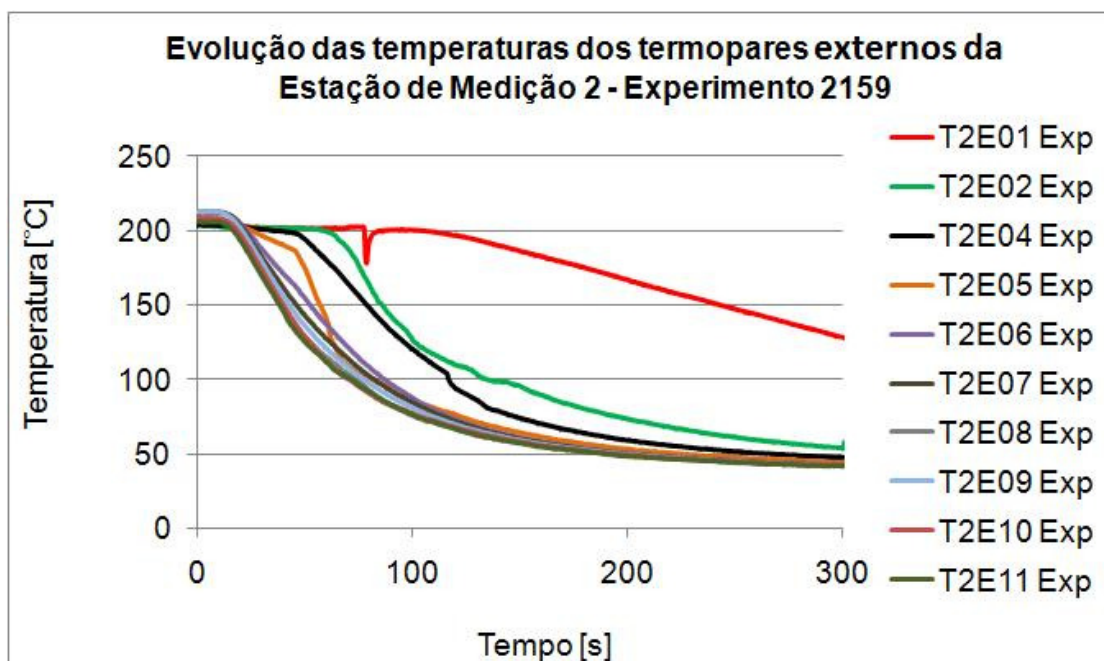


Figura 5.10 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2159.

Pode-se concluir, ainda, que na região da Estação de Medição 2, a camada de água fria avançou com uma altura entre as cotas $-19,9$ mm, cota dos termopares T2I10 e T2S06, e $-10,1$ mm, cota dos termopares T2I09 e T2S05. O resfriamento bastante brusco dos termopares internos T2I03, T2I04, T2I05, T2I06, T2I07, T2I08 e T2I09 e dos termopares de sonda T2S03, T2S04 e T2S05, todos posicionados entre as cotas $-10,1$ mm e $+10,1$ mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda frente de água fria, escoando com interface inferior entre as cotas $-19,9$ mm e $-10,1$ mm e com interface superior entre as cotas $+10,1$ mm e $+24,6$ mm, correspondente aos termopares T2I02 e T2S02. O resfriamento do termopar superior T2I01 ocorreu após o resfriamento dos demais, bastante defasado no tempo, e de forma mais suave, mais uma vez sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente. É bom lembrar que na Estação de Medição 2 não se tem o resultado do termopar T2S01, danificado.

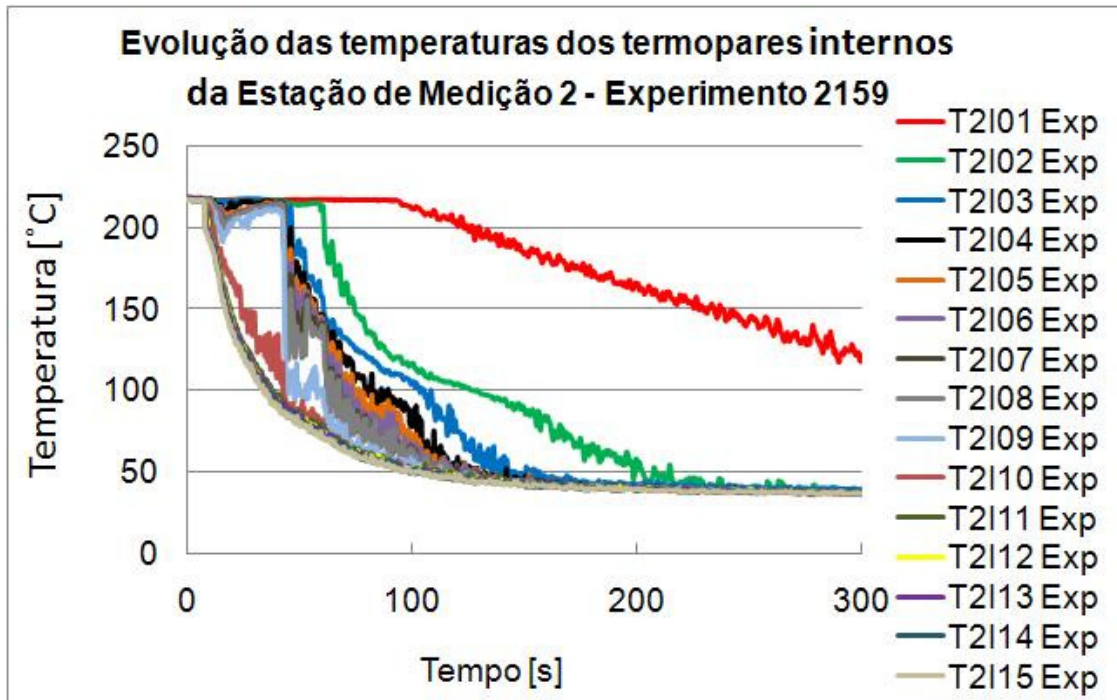


Figura 5.11 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2159.

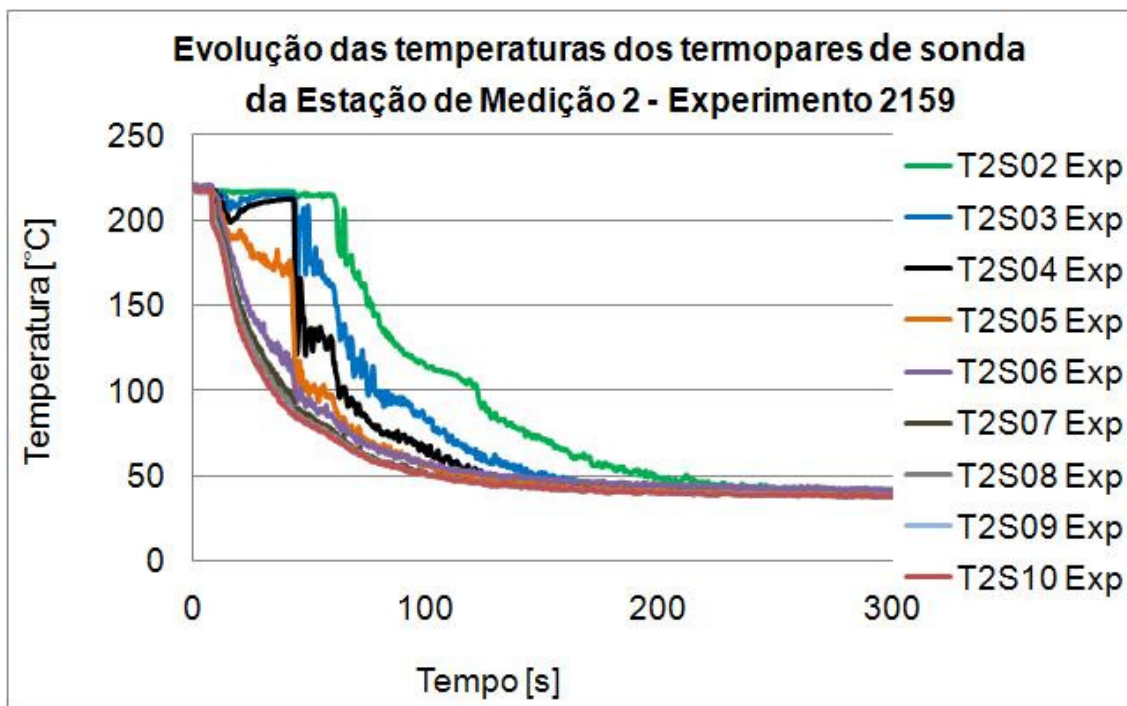


Figura 5.12 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2159.

As Figuras 5.13 a 5.15 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3, localizada a 1800 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.13 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento continua bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como nas Fig. 5.7 e 5.10. Aqui, os termopares T3E01 e T3E02 apresentaram resultados bastante defasados, caracterizando a estratificação térmica na parede externa do tubo.

Também na Estação de Medição 3, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.14 e 5.15. Os termopares das cotas inferiores, tanto o posicionado próximo à parede do tubo (T3I05), quanto os posicionados na sonda vertical (T3S04, T3S05 e T3S06), apresentaram curvas de resfriamento quase sobrepostas, caracterizando uma frente de água fria que ultrapassa a cota – 29,1 mm.

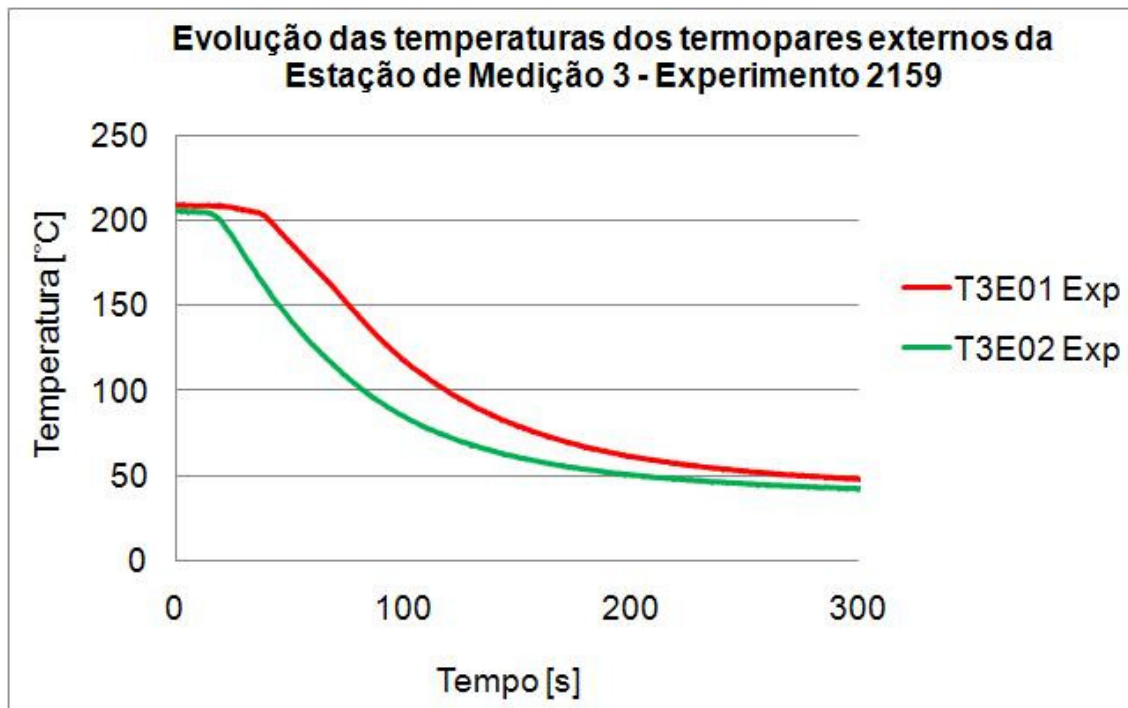


Figura 5.13 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.

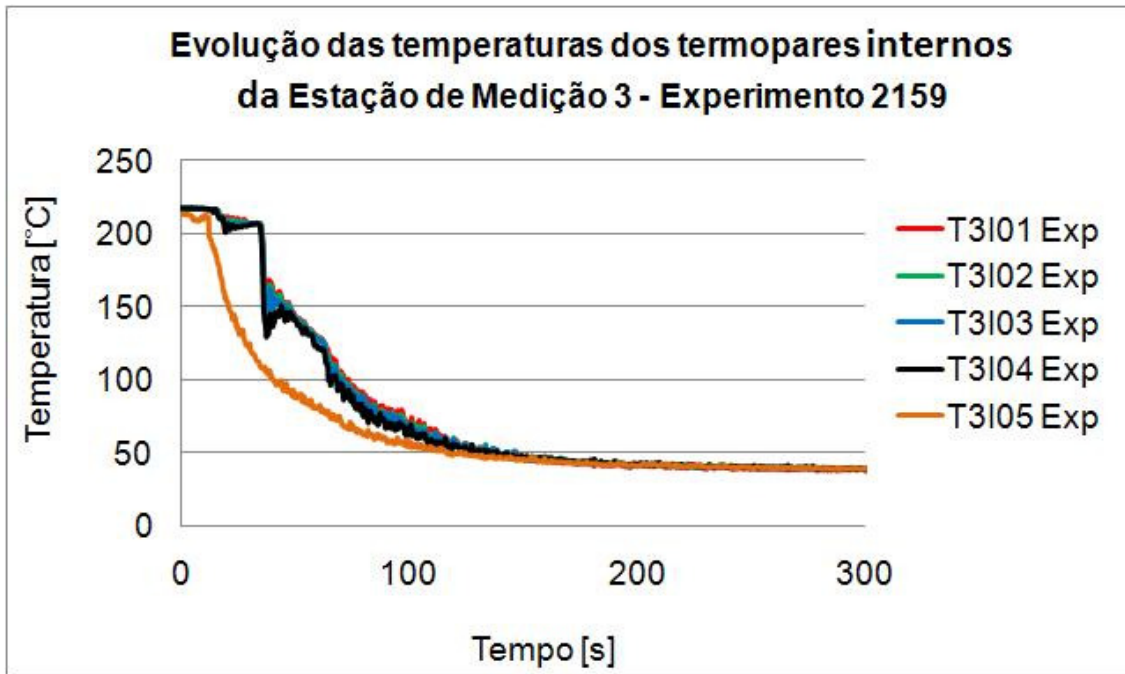


Figura 5.14 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.

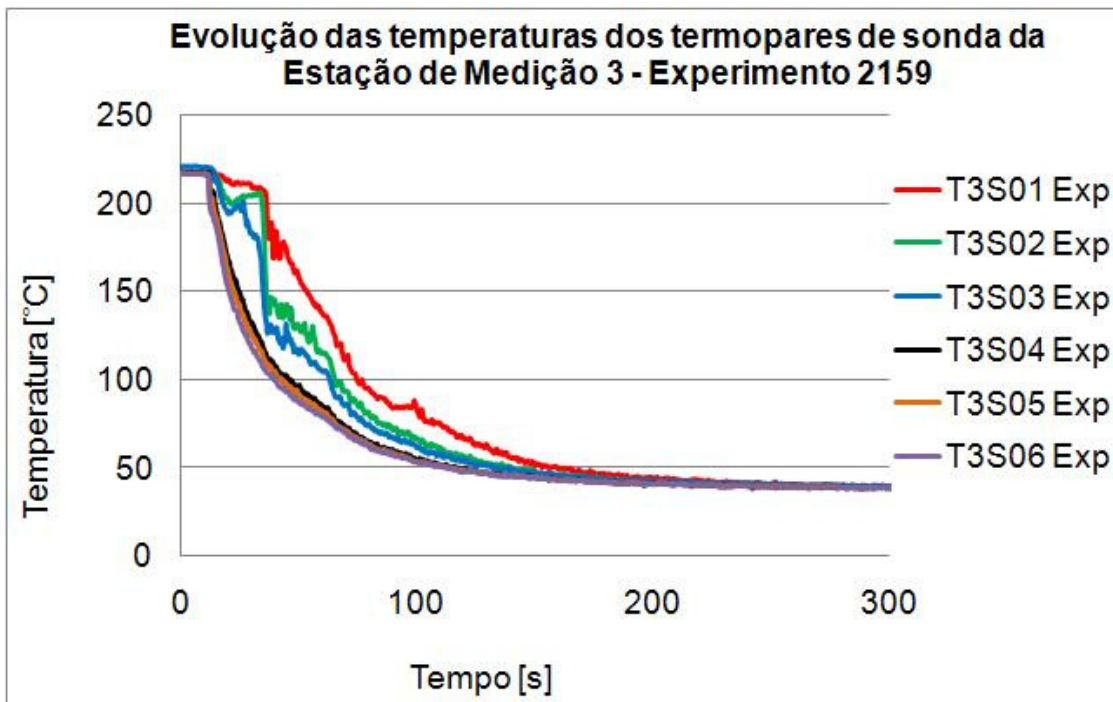


Figura 5.15 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.

O resfriamento brusco dos termopares intermediários, tanto internos T3I01, T3I02, T3I03 e T3I04 quanto os de sonda T3S01, T3S02 e T3S03, todos posicionados entre as cotas - 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda camada de água fria, escoando sobre a primeira com interface inferior entre as cotas - 29,1 mm e - 10,1 mm e com interface superior acima da cota + 10,1 mm.

A Figura 5.16 mostra uma condição inesperada que apareceu nos resultados da maioria dos experimentos: os termopares de fluido (internos e de sonda) das cotas intermediárias foram resfriados no sentido inverso do avanço da frente de água fria. A Figura 5.16 mostra esse fenômeno apresentando as curva de evolução da temperatura dos termopares de fluido de cota zero, ou seja, posicionados a meia altura do tubo. Pode-se observar que, nesta cota, os termopares da Estação de Medição 3 (T3I02 e T3S02) foram os primeiros a resfriar, seguidos dos termopares da Estação de Medição 2 (T2I06 e T2S04) e, finalmente, dos termopares da Estação de Medição 1 (T1I05 e T1S05). Assim, pôde-se concluir que a segunda camada de água fria propagou em sentido inverso sobre a primeira.

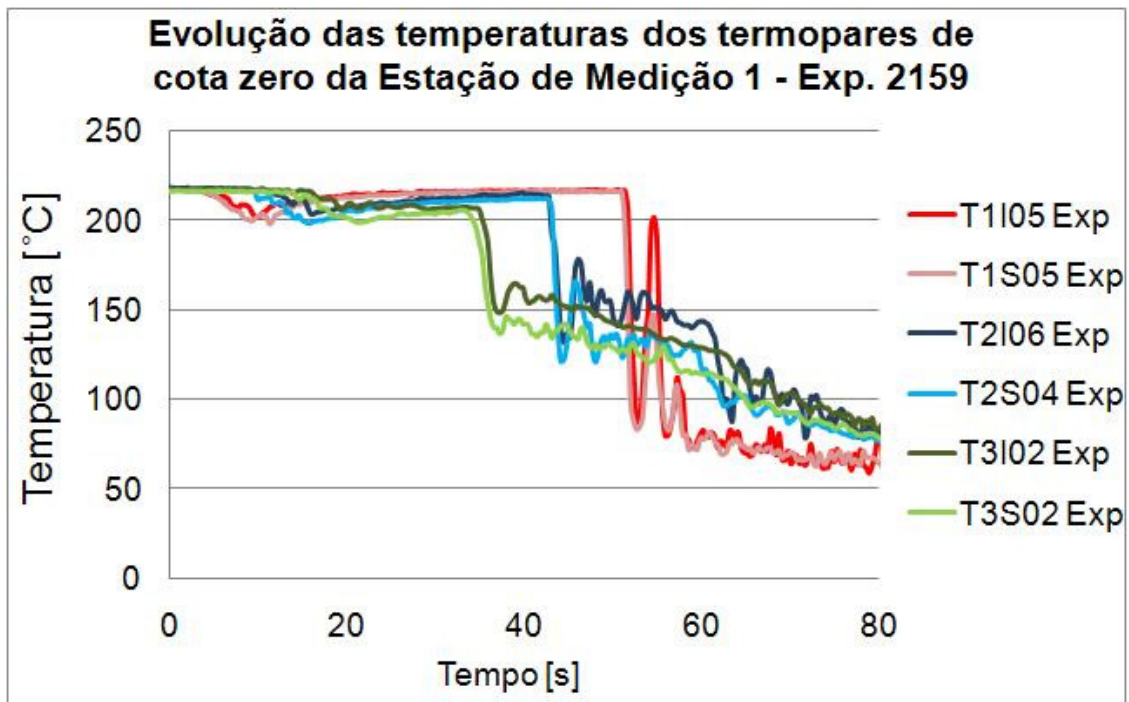


Figura 5.16 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2159.

5.2.5. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2019

O Experimento 2019 foi realizado à pressão manométrica de 21,0 bar, com uma vazão de injeção média de 0,099 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,019, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. Este é um valor de um Número de Froude baixo, que apresentou gradientes térmicos menos elevados e no qual não foram detectadas oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente. As Figuras 5.17 a 5.26 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 2019. Todos os resultados são apresentados até o instante 600 s.

As Figuras 5.17 a 5.19 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1. A Figura 5.17 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à condução de calor na parede. A sequência de resfriamento é coerente com o esperado, com os termopares inferiores sendo resfriados primeiro, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo.

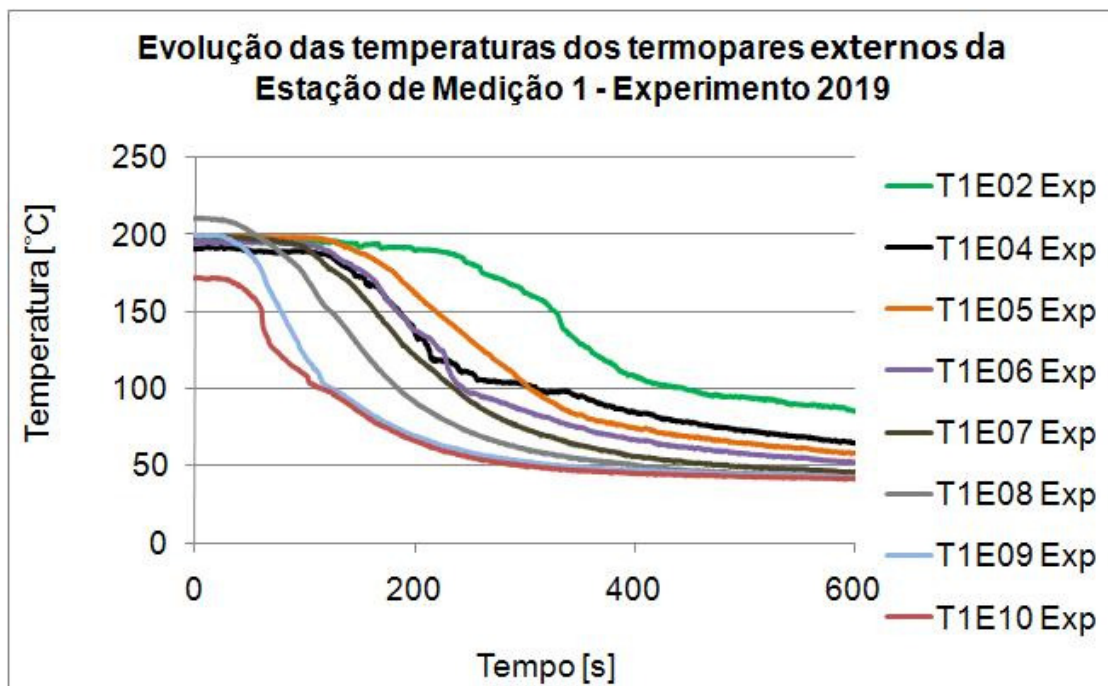


Figura 5.17 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.

Os termopares de fluido da Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Fig. 5.18 e 5.19, apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, conforme esperado, sobretudo os termopares das cotas inferiores, tanto os posicionados próximos à parede do tubo (T1I09 e T1I10), quanto os posicionados na sonda vertical (T1S08 e T1S09). O resultado destes termopares, muito deslocados dos demais, leva à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura entre as cotas - 37,4 mm, correspondente ao termopar T1S08, e - 24,6 mm, correspondente aos termopares T1I07 e T1S07, portanto, uma camada menor que a observada no Experimento 2159. Diferentemente do que ocorreu no Experimento 2159, não se percebe indícios de uma segunda frente de água fria, propagando em sentido inverso sobre a primeira.

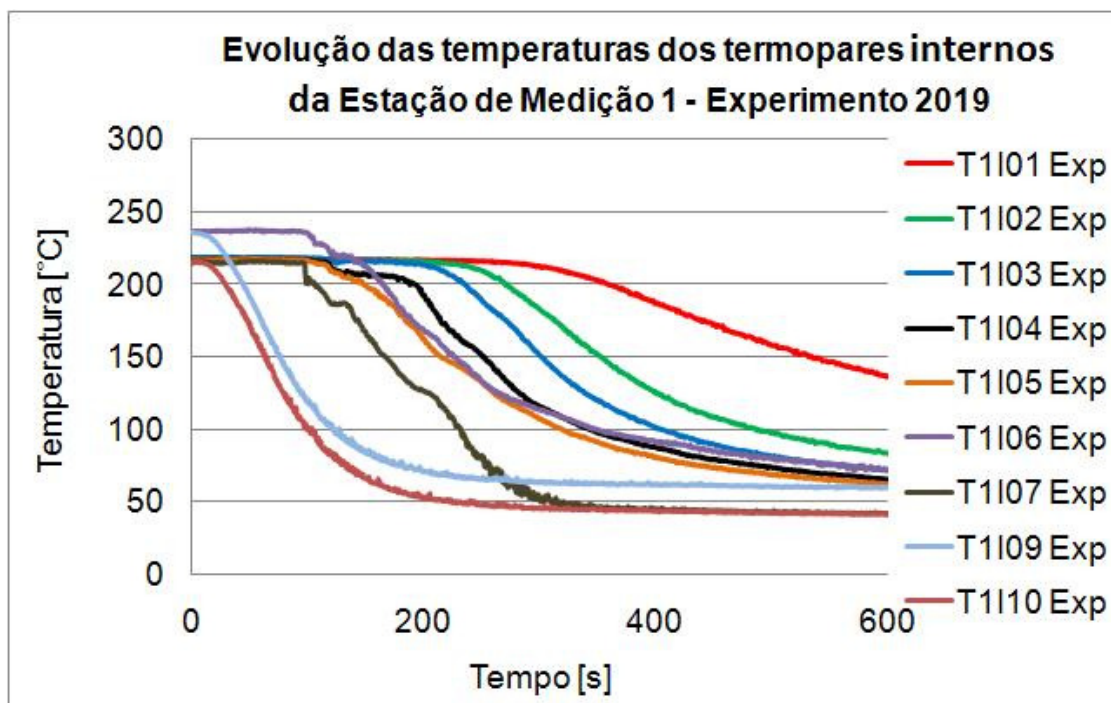


Figura 5.18 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.

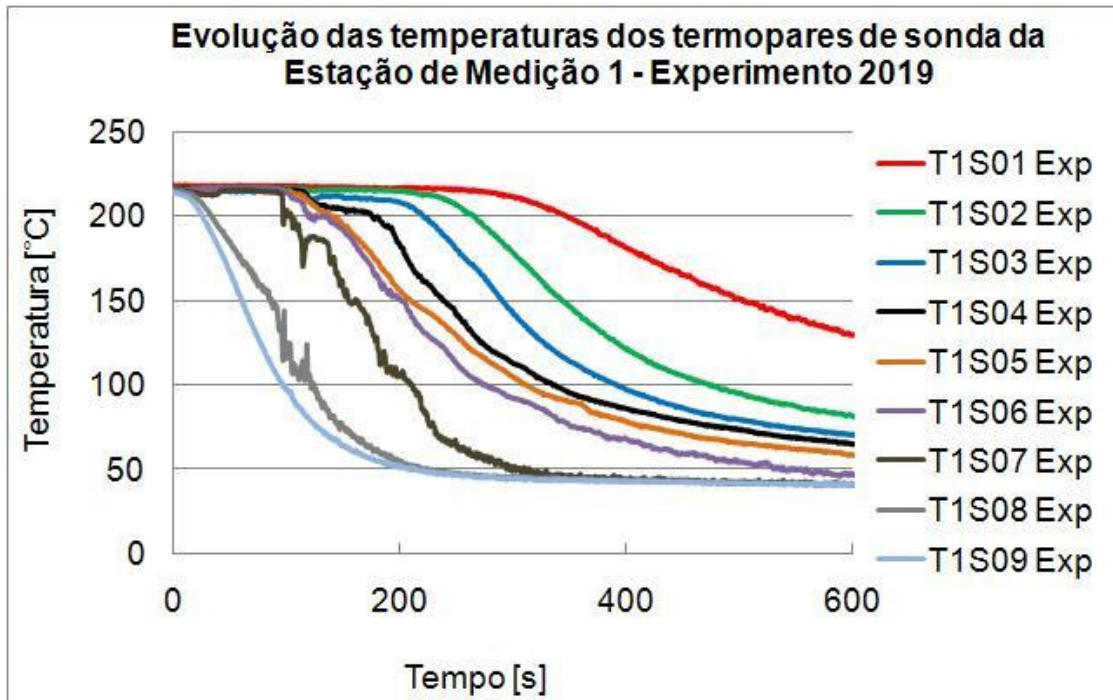


Figura 5.19 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2019.

As Figuras 5.20 a 5.22 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2. A Figura 5.20 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é, novamente, bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. Os termopares apresentaram resfriamento na sequência esperada, do T2E11 ao T2E01, com o termopar superior, T2E01, se resfriando de forma totalmente defasada dos demais.

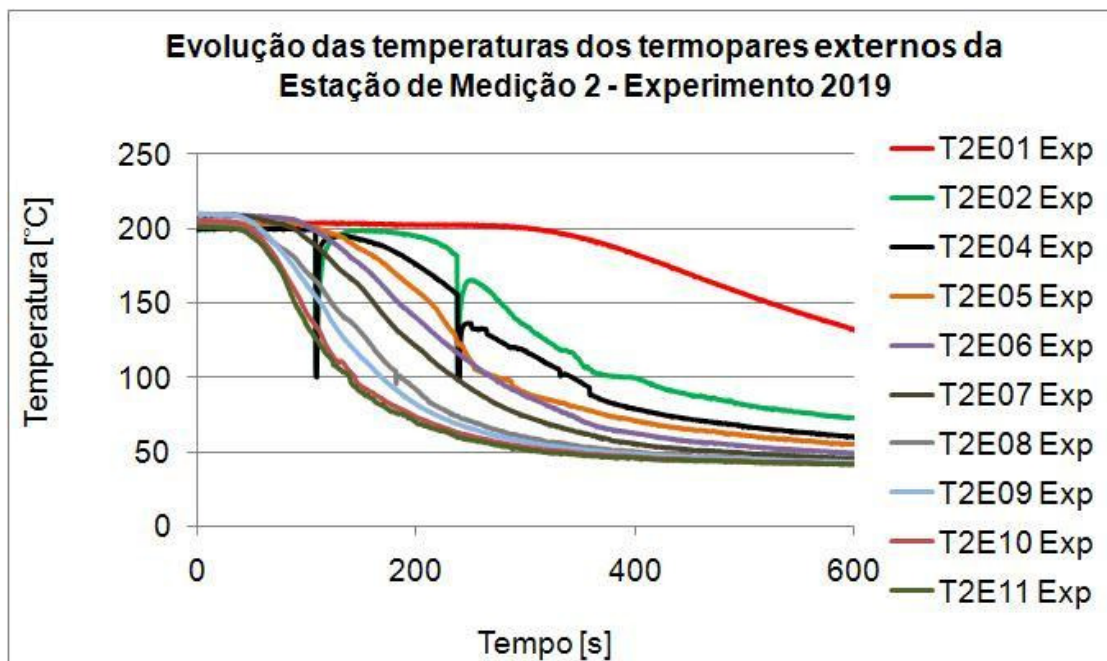


Figura 5.20 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas inferiores, como pode ser observado nas Fig. 5.21 e 5.22. O rápido resfriamento dos termopares internos T2I13, T2I14 e T2I15, e dos termopares de sonda T2S09 e T2S10, assim como oscilações nos termopares T2I12 e T2S8, leva a supor que a camada de água fria avançou com uma altura próxima à cota dos dois últimos, ou seja, - 37,4 mm. Novamente, não se percebe indícios de uma segunda frente de água fria.

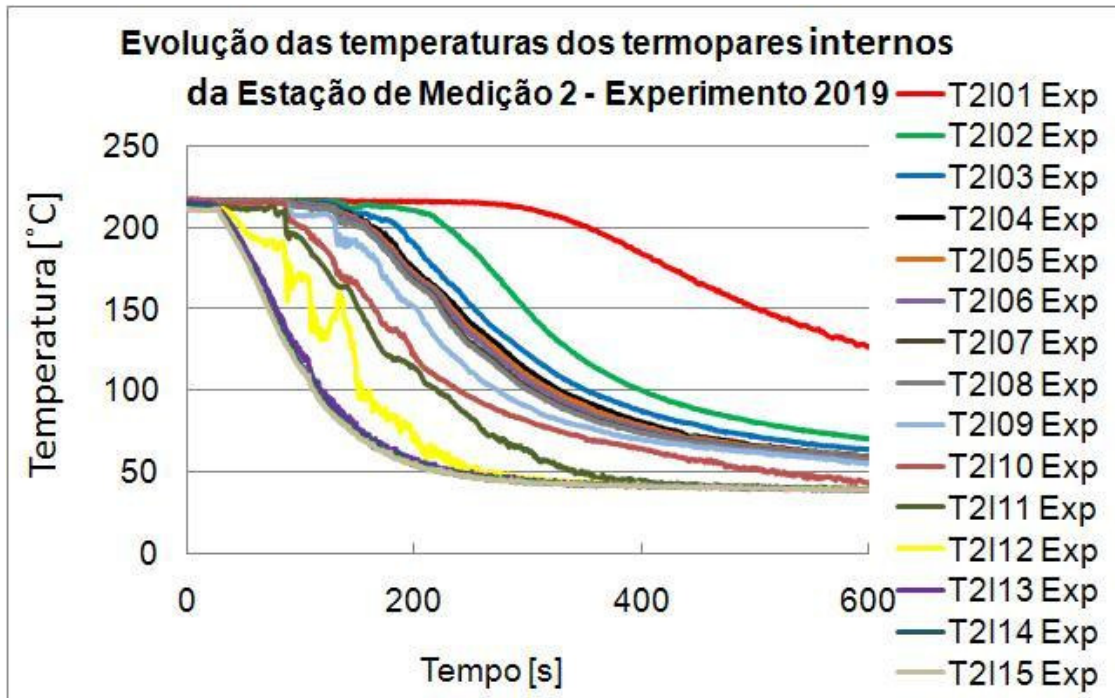


Figura 5.21 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.

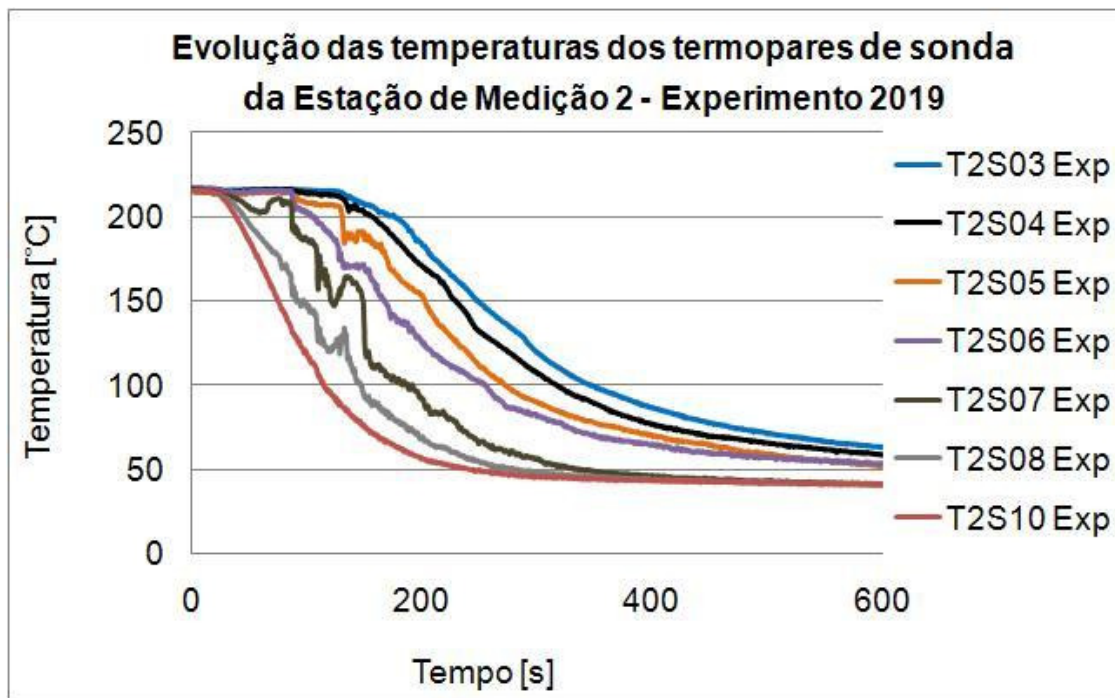


Figura 5.22 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2019.

As Figuras 5.23 a 5.25 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3. A Figura 5.23 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, com o processo de resfriamento bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. Os dois termopares, T3E01 e T3E02, apresentaram resultados bastante defasados.

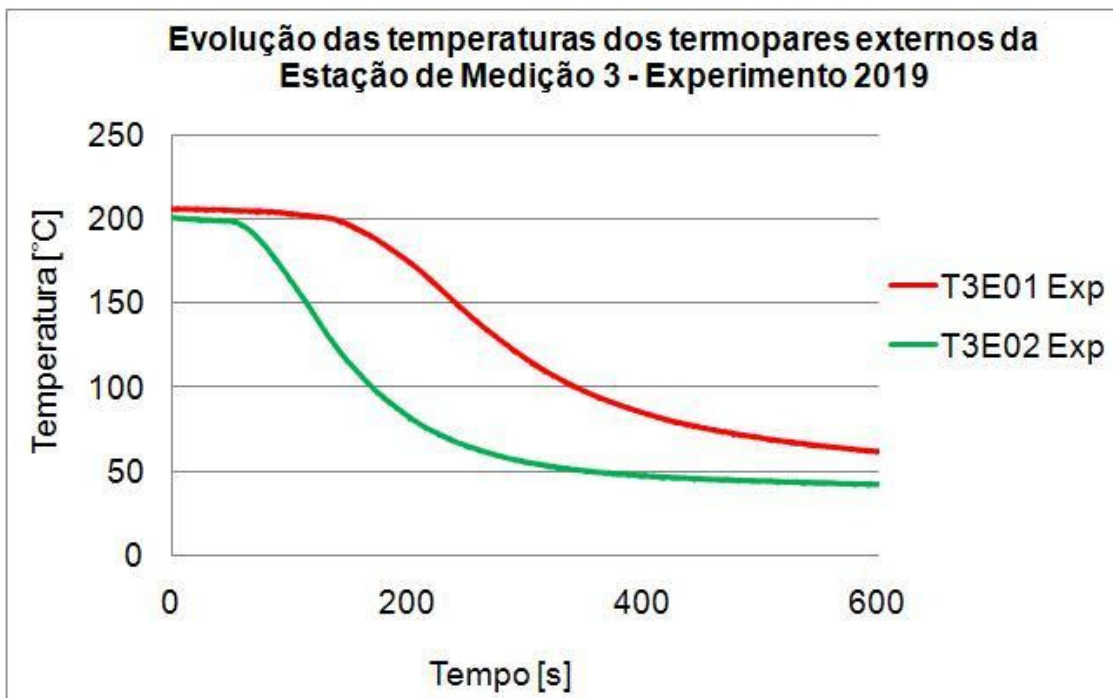


Figura 5.23 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.

Os termopares de fluido da Estação de Medição 3 apresentaram, também, um processo de resfriamento mais brusco, como pode ser observado nas Fig. 5.24 e 5.25. Os termopares ao longo do diâmetro vertical resfriaram na sequência lógica, ascendente, começando pelo T3I05 e seguindo do T3S06 ao T3S01. A sequência contínua de resfriamento destes termopares não permitiu que se chegasse a uma conclusão quanto à altura da interface entre a camada quente e a camada fria.

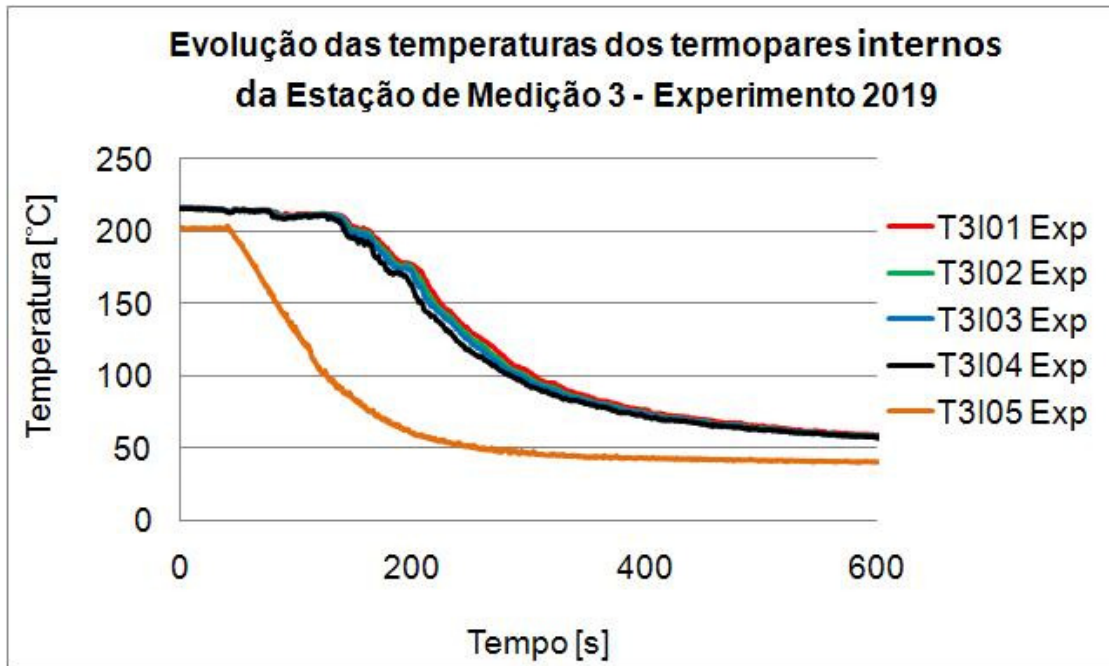


Figura 5.24 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.

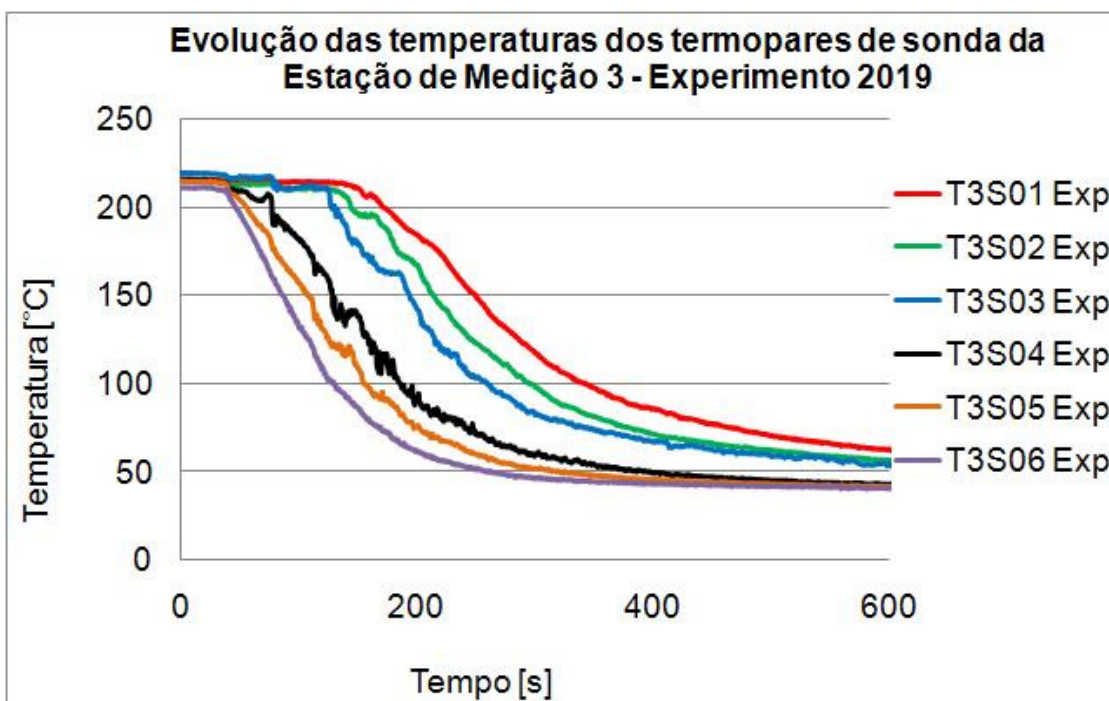


Figura 5.25 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2019.

A Figura 5.26, com a evolução das temperaturas dos termopares de cota zero, foi apresentada apenas para ilustrar a inexistência de evidências de uma segunda camada de água fria escoando em sentido inverso. Nada nesse sentido foi observado em qualquer outra cota.

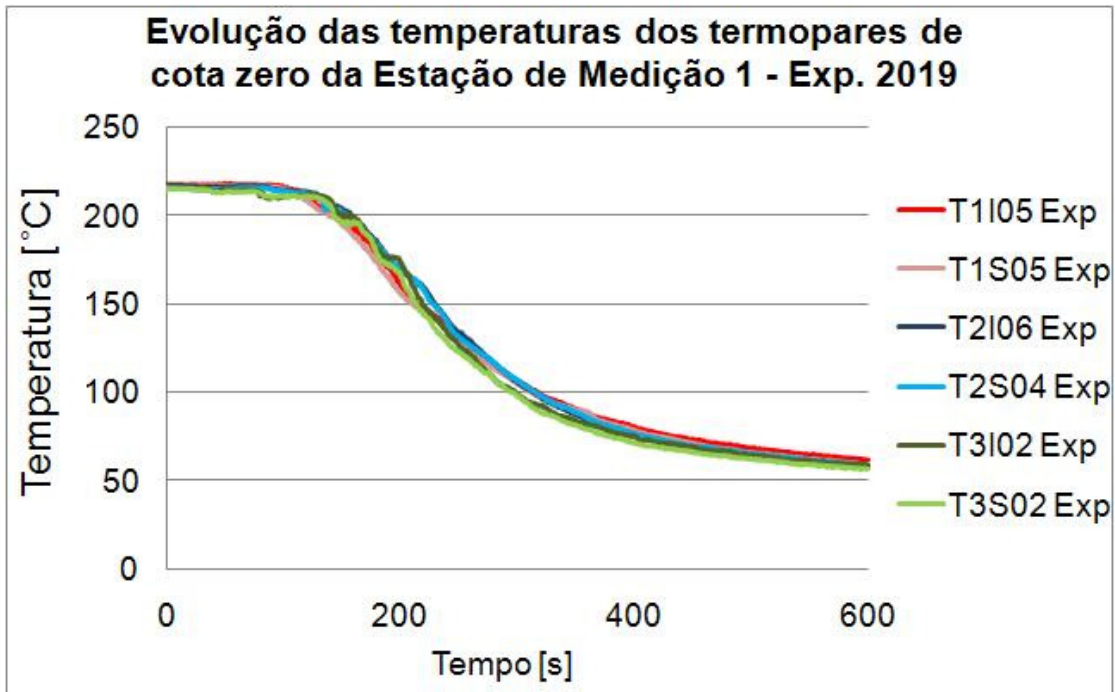


Figura 5.26 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero durante o Experimento 2019.

5.2.6. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2069

As Figuras 5.27 a 5.35 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 2069. Todos os resultados são apresentados até o instante 300 s. O Experimento 2069 foi realizado à pressão manométrica de 21,1 bar, com uma vazão de injeção média de 0,351 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,069, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. Este é um valor de número de Froude intermediário, que apresentou gradientes térmicos elevados e oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente.

As Figuras 5.27 a 5.29 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1. A Figura 5.27 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave. A sequência de resfriamento é coerente com o esperado, com os termopares das cotas inferiores sendo resfriados primeiro, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo.

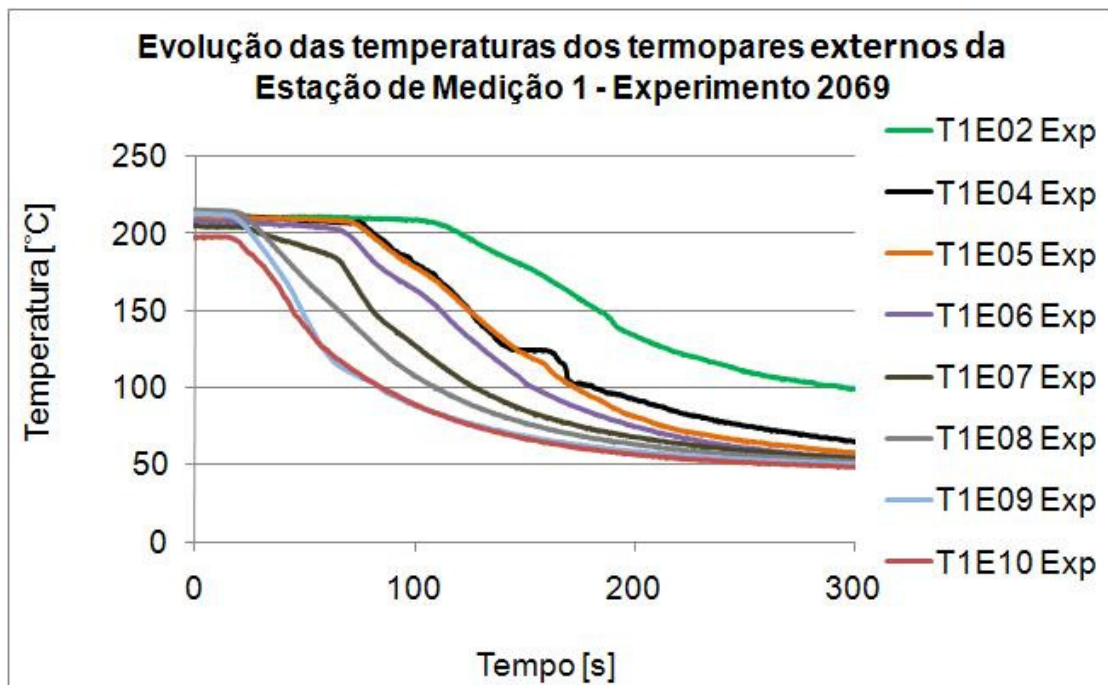


Figura 5.27 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.

Quanto aos termopares de fluido desta mesma Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Fig. 5.28 e 5.29, eles apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares T1I07 e T1S07, ambos na cota – 24,6 mm. Os termopares das cotas inferiores (T1I10, de parede, e T1S08 e T1S09, de sonda) foram resfriados anteriormente, mas, próximo ao instante em que teve início destes, os termopares T1I07 e T1S07 apresentaram um pré-resfriamento parcial, voltando a se aquecer. Isso sugere que junto à frente de avanço da

camada de água fria, a mesma apresentou uma onda que atingiu uma cota superior à do restante da camada de água fria.

A partir de T1I07 e T1S07, todos os termopares foram resfriados numa sequência ascendente, bastante lógica. Entretanto, os termopares internos T1I02, T1I03, T1I04, T1I05 e T1I06 e os termopares de sonda T1S02, T1S03, T1S04, T1S05 e T1S06 apresentaram processos de resfriamento nitidamente em duas etapas, caracterizando o avanço de duas camadas sucessivas de água fria. O resfriamento dos termopares superiores (T1I01 e T1S01) ocorreu após o resfriamento dos demais, bastante defasado no tempo, e de forma mais suave, sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

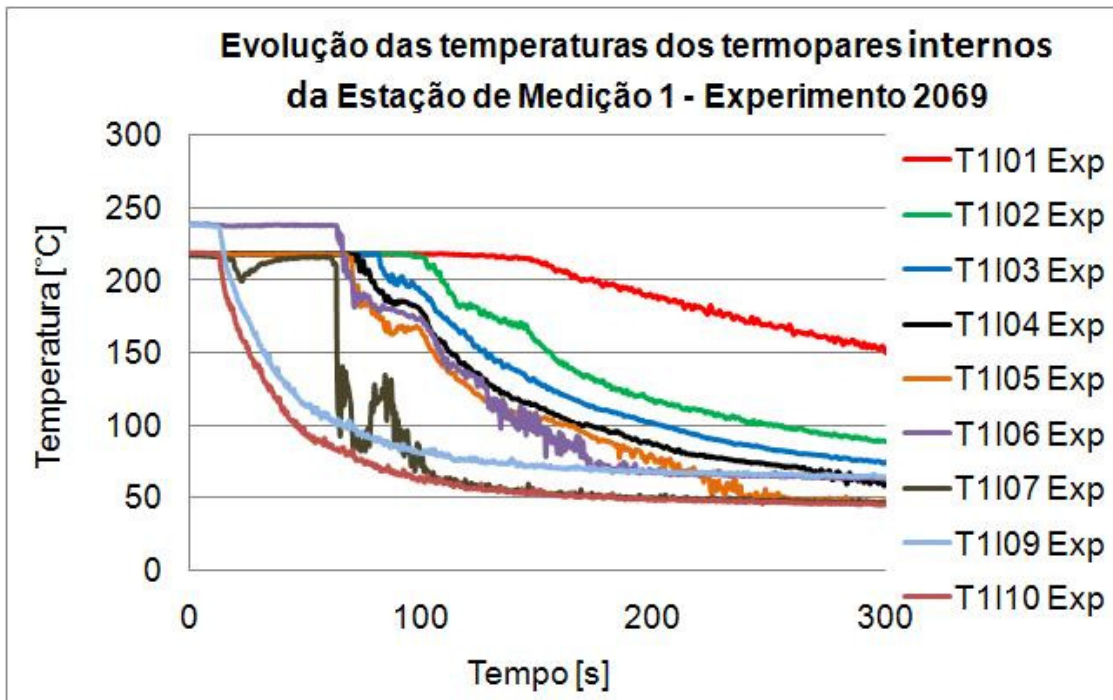


Figura 5.28 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.

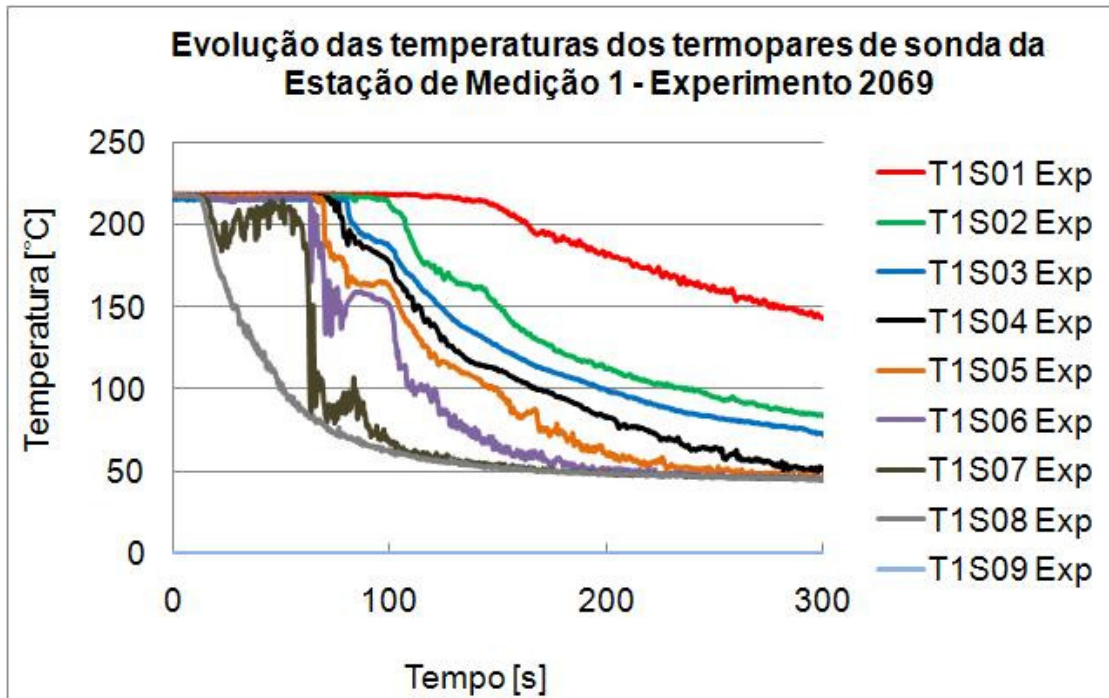


Figura 5.29 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2069.

As Figuras 5.30 a 5.32 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2, localizada a 1200 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.30 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como na Fig. 5.27, para a Estação de Medição 1. O termopar superior, T2E01, apresentou um processo de resfriamento totalmente deslocado dos demais.

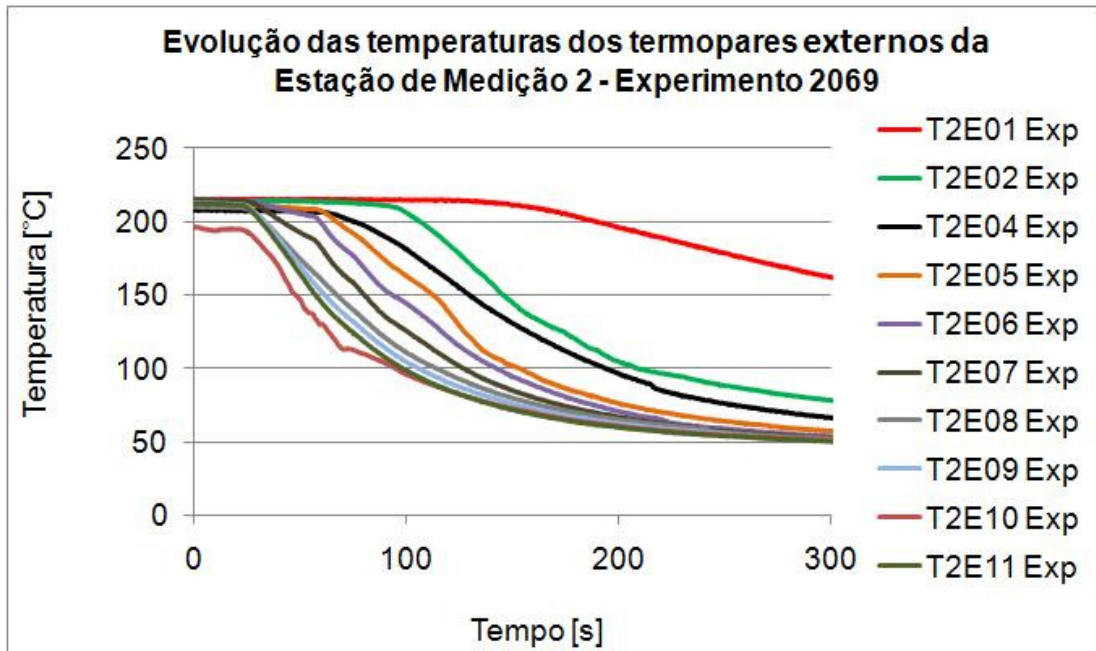


Figura 5.30 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.31 e 5.32. Os termopares das cotas inferiores, tanto os de parede (T2I12, T2I13, T2I14 e T2I15), quanto de sonda (T2S08, T2S09 e T2S10), apresentaram curvas de resfriamento bastante próximas, caracterizando o avanço de uma frente de água fria que ultrapassa a cota – 37,4 mm. Os termopares T2I10, T2I11, T2S06 e T2S07 foram resfriados logo em seguida, de forma muito brusca, caracterizando uma segunda frente de água fria. Esses quatro termopares apresentaram um pré-resfriamento parcial e temporário, que pode ser devido a uma onda mais alta junto à frente de avanço da camada de água fria. A cota dos termopares T2I11 e T2S07 é – 29,1 mm, a qual já estaria na região da segunda frente de molhamento, que pode ter envolvido todos os termopares posicionados acima dessa cota, exceto os termopares superiores T2I01 e T2S01, localizados na cota 52,7 mm. Não se tem o registro do termopar T2S01, danificado, mas o resfriamento do termopar T2I01 ocorreu após o resfriamento dos demais, de forma mais suave e bastante defasado no tempo, novamente sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

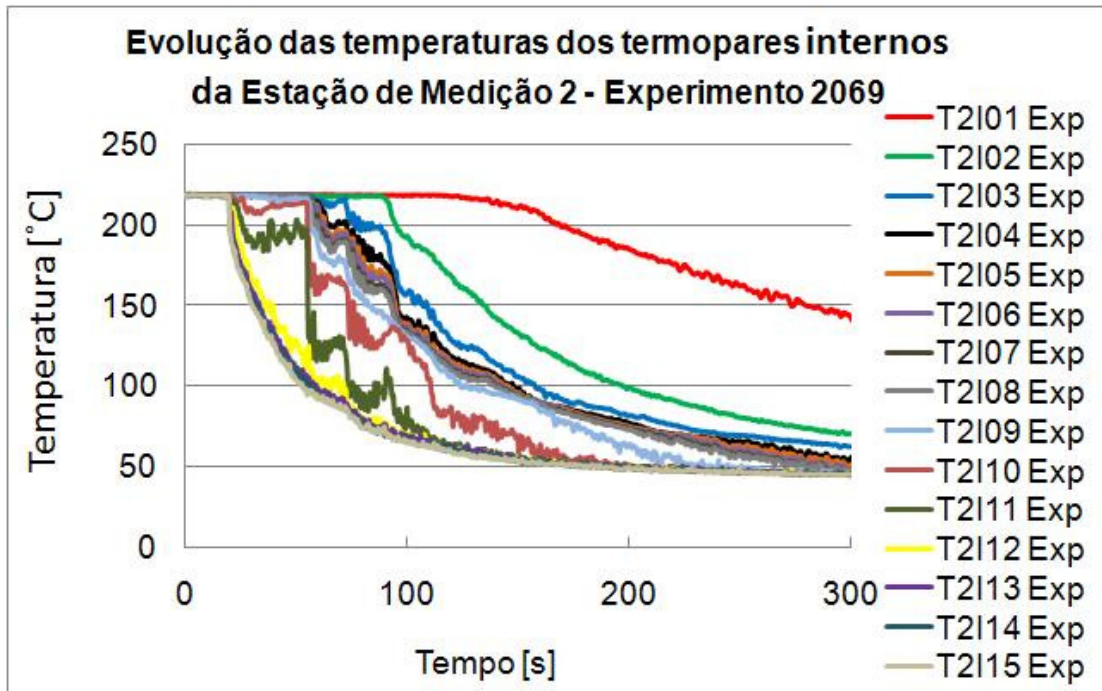


Figura 5.31 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.

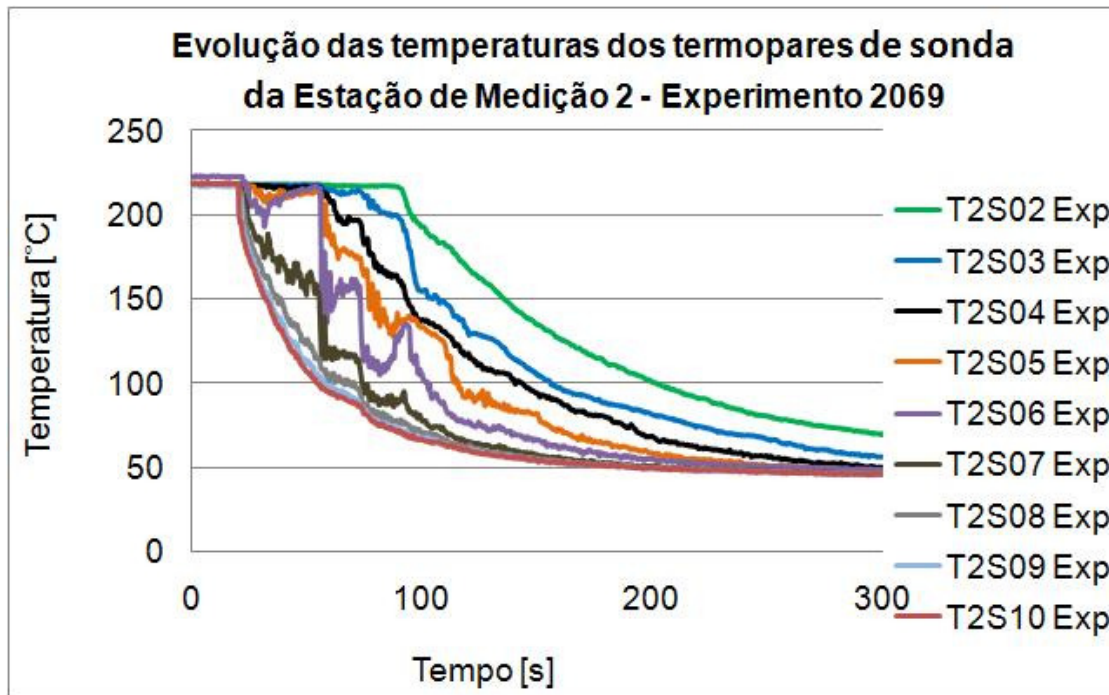


Figura 5.32 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2069.

As Figuras 5.33 a 5.35 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3. A Figura 5.33 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento continua bastante suave, devido à condução de calor na parede do tubo, como nas Fig. 5.27 e 5.30. Aqui, os termopares T3E01 e T3E02 apresentaram resultados bastante defasados, caracterizando a estratificação térmica na parede externa do tubo.

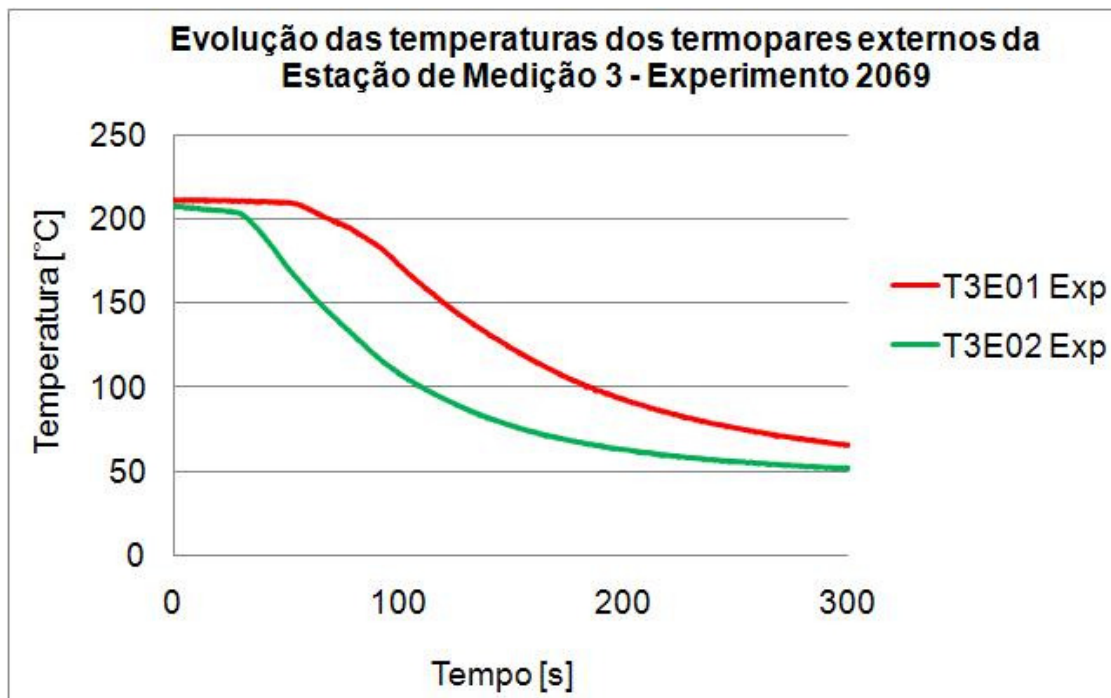


Figura 5.33 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.

Também na Estação de Medição 3, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.34 e 5.35. Os termopares das cotas inferiores, tanto o de parede do tubo (T3I05), quanto os de sonda (T3S04, T3S05 e T3S06), apresentaram curvas de resfriamento que caracterizam uma primeira frente de água fria que ultrapassa a cota – 29,1 mm, de T3S04. O resfriamento brusco dos termopares intermediários, termopares internos T3I01, T3I02, T3I03 e

T3I04 e termopares de sonda T3S01, T3S02 e T3S03, todos posicionados entre as cotas - 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda frente de água fria, escoando com interface inferior entre as cotas - 29,1 mm e - 10,1 mm e com interface superior acima da cota + 10,1 mm. A curva do termopar T3I03 apresentou uma inconsistência com os demais, tornando inválido seu resultado quantitativo, mas mostrando-se aceitável de um ponto de vista qualitativo, pela comparação do formato da curva com o das curvas dos termopares vizinhos, T3I01, T3I02, e T3I04.

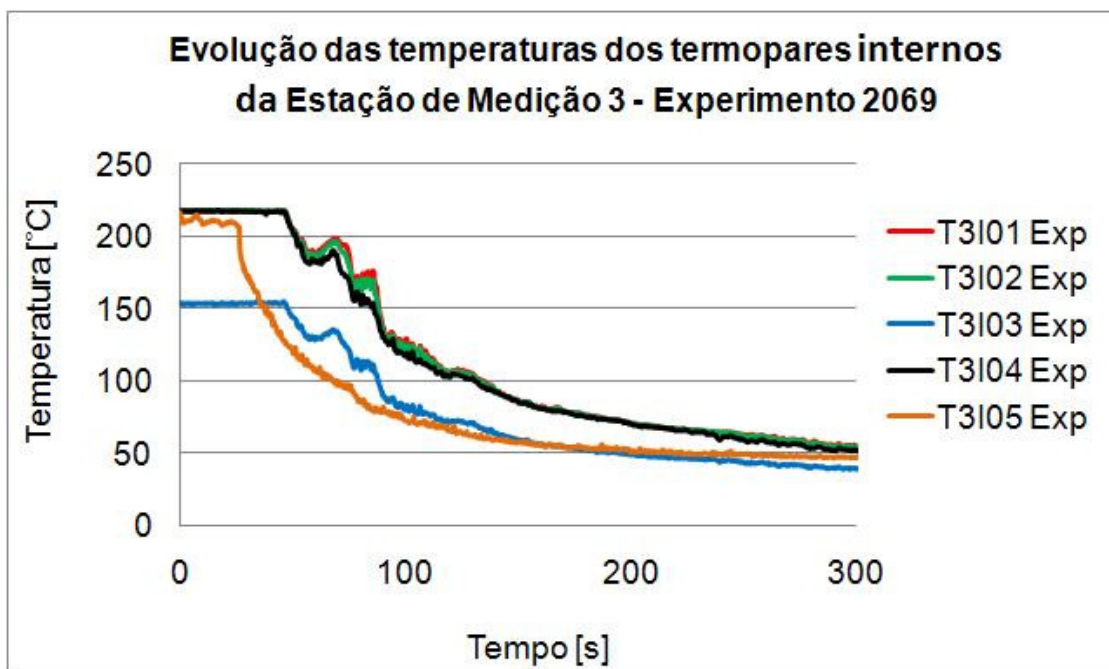


Figura 5.34 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.

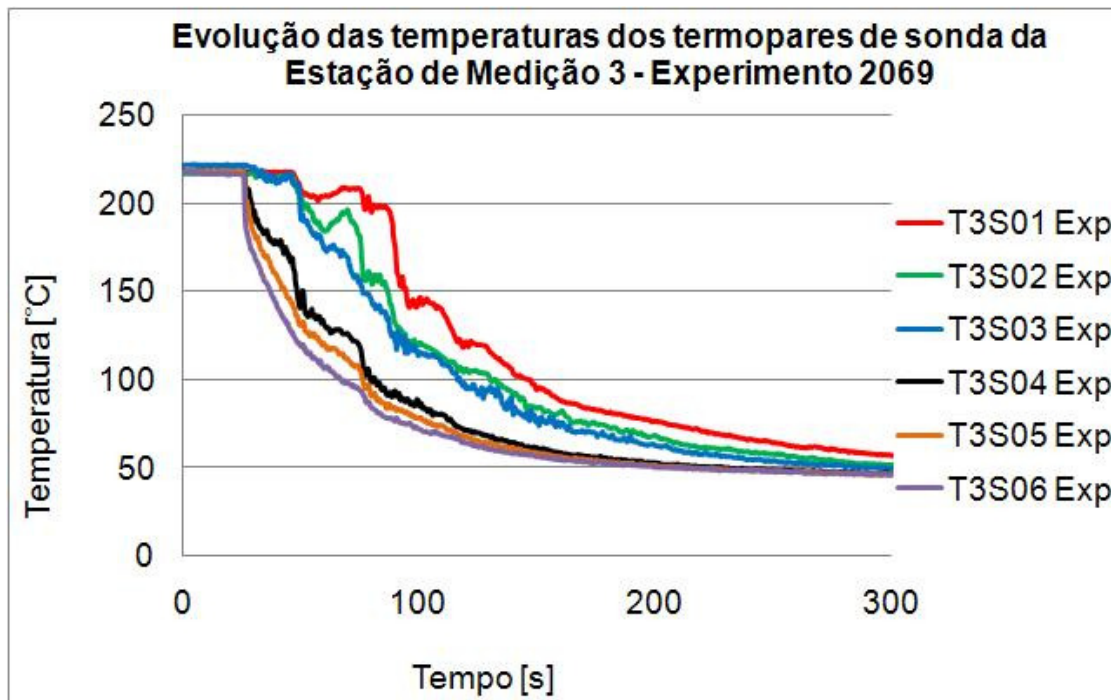


Figura 5.35 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.

A Figura 5.36 mostra as curva de evolução da temperatura dos termopares de fluido de cota zero, ou seja, posicionados a meia altura do tubo. Pode-se observar que, nesta cota, os termopares da Estação de Medição 3 (T3I02 e T3S02) foram os primeiros a resfriar, seguidos dos termopares da Estação de Medição 2 (T2I06 e T2S04) e, finalmente, dos termopares da Estação de Medição 1 (T1I05 e T1S05). Assim, pôde-se concluir que, também no Experimento 2069, uma segunda camada de água fria propagava em sentido inverso sobre a primeira. A Figura 5.36 apresentou resultados apenas até o instante 150 s, para melhor clareza, uma vez que nesse instante o fenômeno que se deseja mostrar já havia ocorrido.

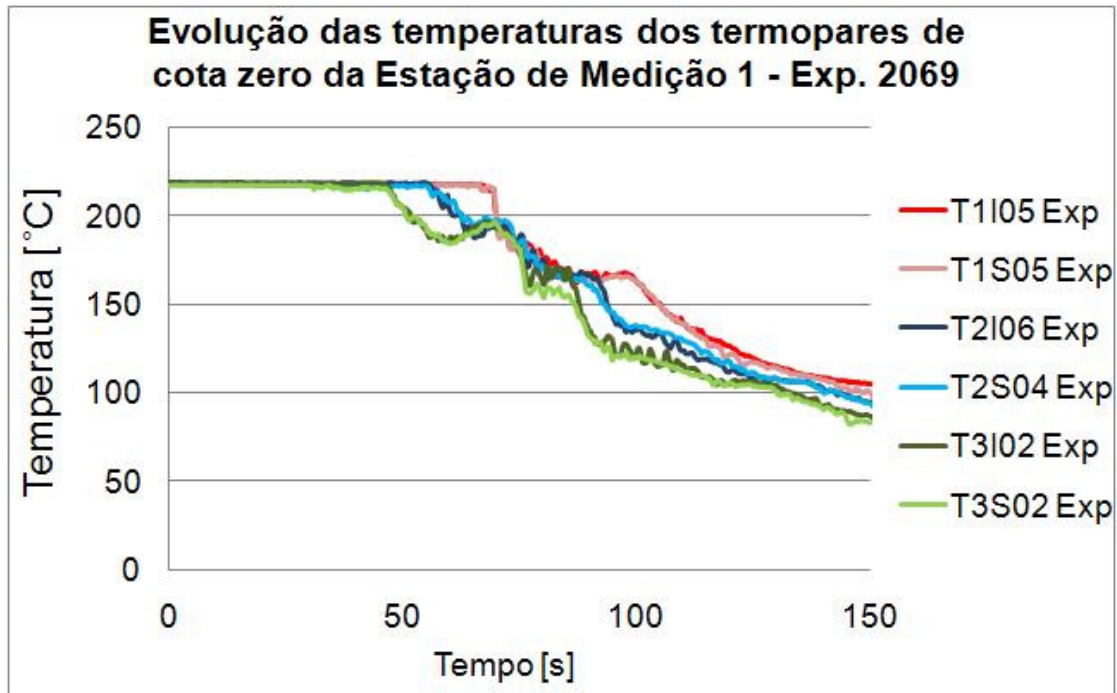


Figura 5.36 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2069.

5.2.7. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 2212

As Figuras 5.37 a 5.45 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 2212. Todos os resultados são apresentados até o instante 160 s, quando as condições de estratificação térmica já haviam se dissipado. O Experimento 2212 foi realizado à pressão manométrica de 21,4 bar, com uma vazão de injeção média de 1,095 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,212, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. É o maior número de Froude entre os testes com temperatura da água quente de cerca de 219 °C e pressão manométrica de cerca de a 21 bar. O experimento apresentou elevados gradientes térmicos e oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente.

As Figuras 5.37 a 5.39 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1, localizada a 500 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.37 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de

resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. Ainda assim, a sequência de resfriamento foi coerente com o esperado, com os termopares das cotas inferiores sendo resfriados primeiro, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo.

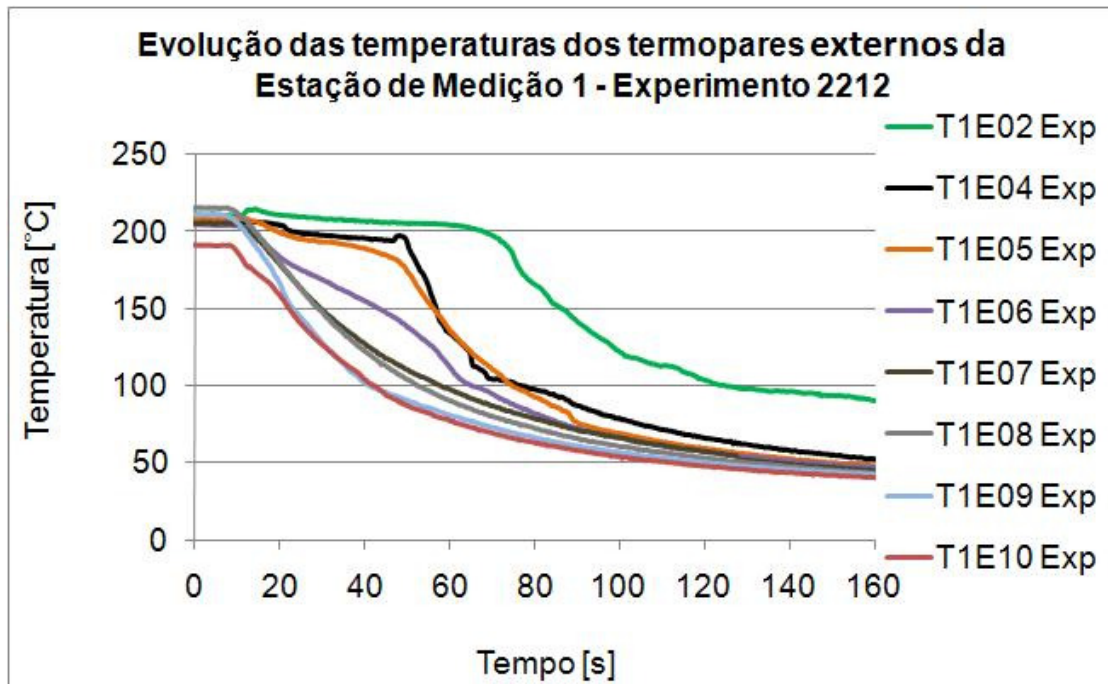


Figura 5.37 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.

Quanto aos termopares de fluido da Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Fig. 5.38 e 5.39, seu processo de resfriamento foi mais brusco, sobretudo nas cotas intermediárias. Os termopares das cotas inferiores, tanto os internos (T1I07 e T1I10), quanto os de sonda (T1S07, T1S08 e T1S09), apresentaram curvas de resfriamento sobrepostas. A diferença no termopar T1I09 pode ser explicada por imprecisão da curva de calibração. Para os termopares internos e externos foi considerada uma reta ajustada a partir da tabela ASTM-E-230, fornecida pelo fabricante dos termopares, conforme Anexo A. Esse resultado leva à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura entre as cotas – 24,6 mm, correspondente aos

termopares T1I07 e T1S07, e $- 10,1$ mm, correspondente aos termopares T1I06 e T1S06. Os termopares T1I04, T1I05, T1I06, T1S04, T1S05 e T1S06 apresentaram um pré-resfriamento parcial, voltando a se aquecer. Isso sugere que junto à frente de avanço da camada de água fria, esta apresentou uma onda que atingiu uma cota superior à do restante da camada de água fria. Como o termopar T1S03 chegou a ser ligeiramente sensibilizado pela passagem dessa onda, é provável que a mesma tenha atingido a cota $+ 24,6$ mm.

O posterior e definitivo resfriamento dos termopares internos T1I03, T1I04, T1I05 e T1I06 e dos termopares de sonda T1S03, T1S04, T1S05 e T1S06 foi bastante brusco, levando à conclusão de que os mesmos foram atingidos pela passagem de uma segunda camada de água fria. Estes termopares estão posicionados $- 10,1$ mm e $+ 24,6$ mm, indicando que a segunda camada de água fria atingiu um nível acima dessa última cota e abaixo de $+ 37,4$ mm, que é a cota dos termopares T1I02 e T1S02. O resfriamento destes dois termopares e dos termopares superiores (T1I01 e T1S01) ocorreu de forma mais suave e muito defasado no tempo, sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

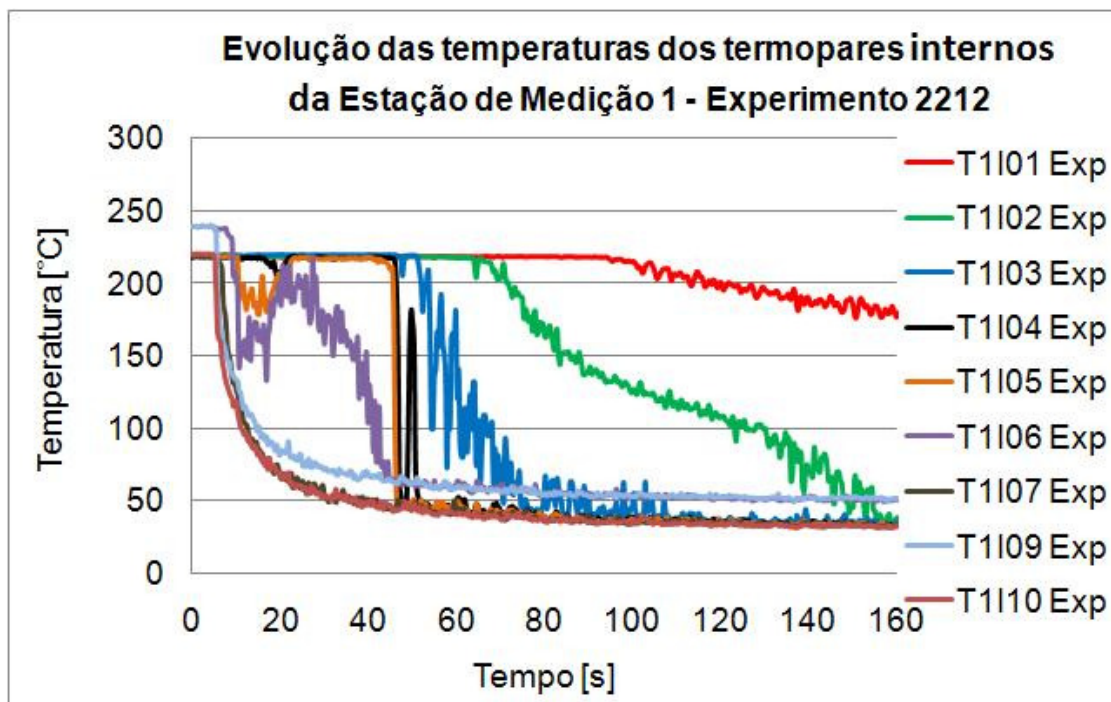


Figura 5.38 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.

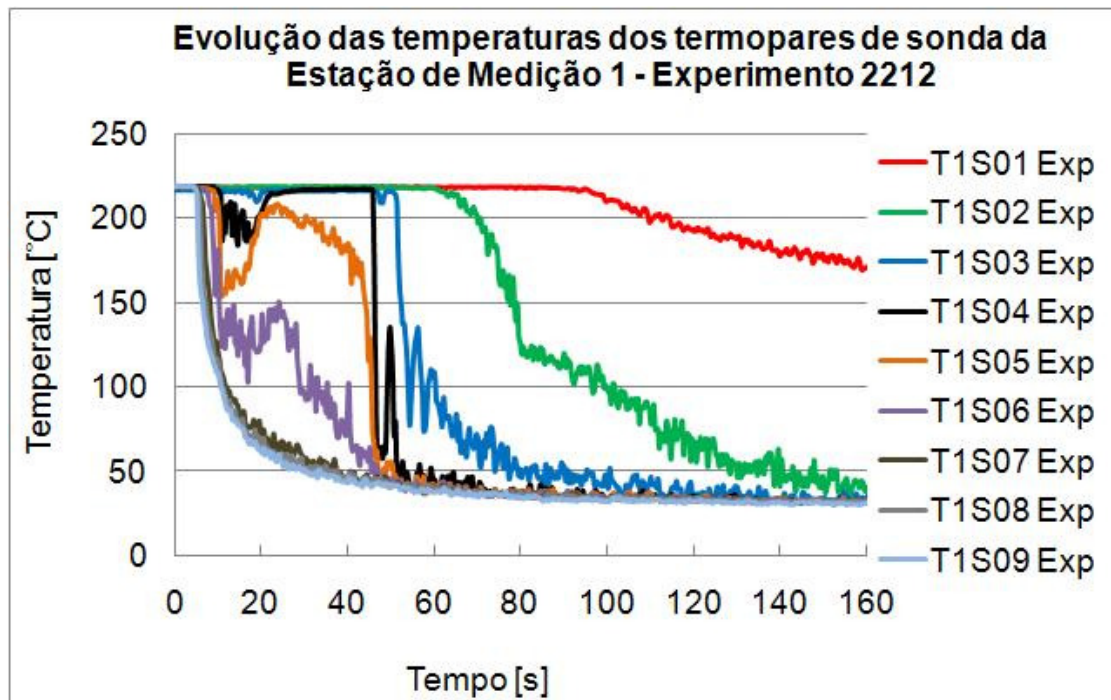


Figura 5.39 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2212.

As Figuras 5.40 a 5.42 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2, localizada a 1200 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.40 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como na Fig. 5.37. Os termopares foram todos resfriados em sequência ascendente, com o termopar superior, T2E01, apresentando um processo de resfriamento totalmente deslocado dos demais.

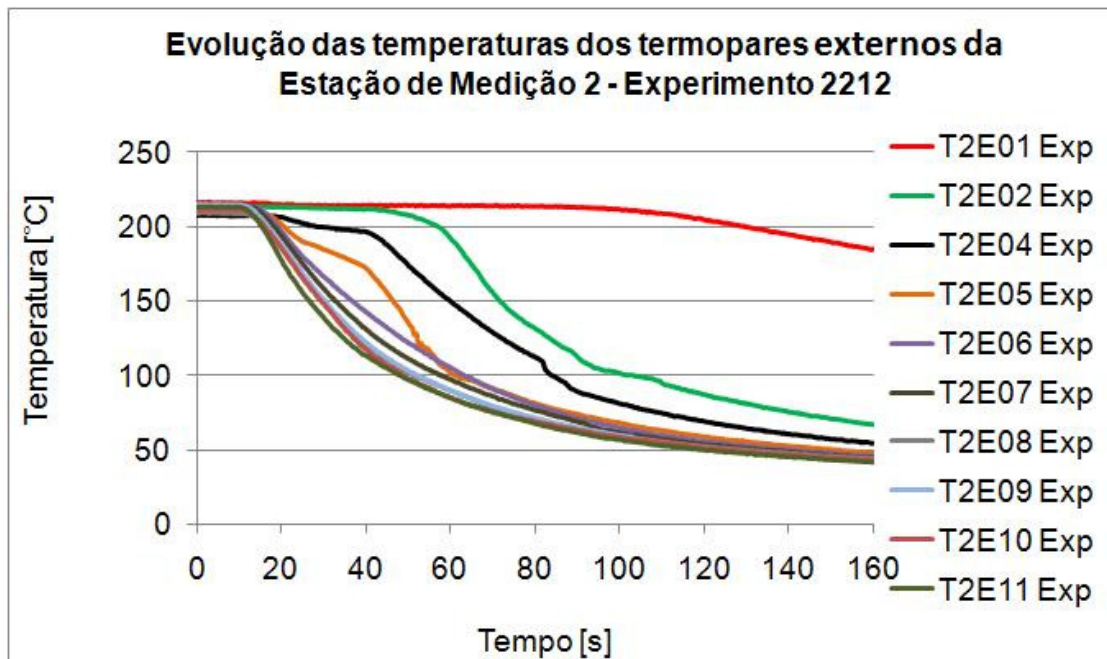


Figura 5.40 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.41 e 5.42. Os termopares das cotas inferiores, tanto os internos (T2I11, T2I12, T2I13, T2I14 e T2I15), quanto os de sonda (T2S07, T2S08, T2S09 e T2S10), apresentaram curvas de resfriamento sobrepostas, levando à conclusão de que foram atingidos simultaneamente por uma frente de água fria de perfil busco. Como os termopares T2I03, T2I03, T2I04, T2I05, T2I06, T2I07, T2I08, T2I09, T2S03, T2S04 e T2S05 apresentaram resfriamentos bruscos e quase simultâneos, conclui-se que foram atingidos pelo avanço da segunda camada de água fria. Entretanto, todos estes últimos termopares apresentaram um pré-resfriamento parcial, voltando a se aquecer, o que sugere que junto à frente de avanço da camada de água fria, a mesma apresentou uma onda que atingiu uma cota superior à do restante da camada de água fria. Os termopares T2I10 e T2S06, ambos posicionados na cota – 19,9 mm, apresentaram comportamentos que sugerem que os mesmos estivessem entre as duas camadas de água fria: um re-aquecimento incompleto, iniciado junto com os termopares intermediários, seguido de um novo resfriamento, não muito brusco.

O resfriamento do termopar superior T2I01 ocorreu após o resfriamento dos demais, bastante defasado no tempo, e de forma mais suave, mais uma vez sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente. Finalmente, o termopar T2I02 apresentou comportamento entre o dos termopares intermediários e o do termopar T2I01. É bom lembrar que na Estação de Medição 2 não se tem o resultado dos termopares T2S01 e T2S02, que foram danificados.

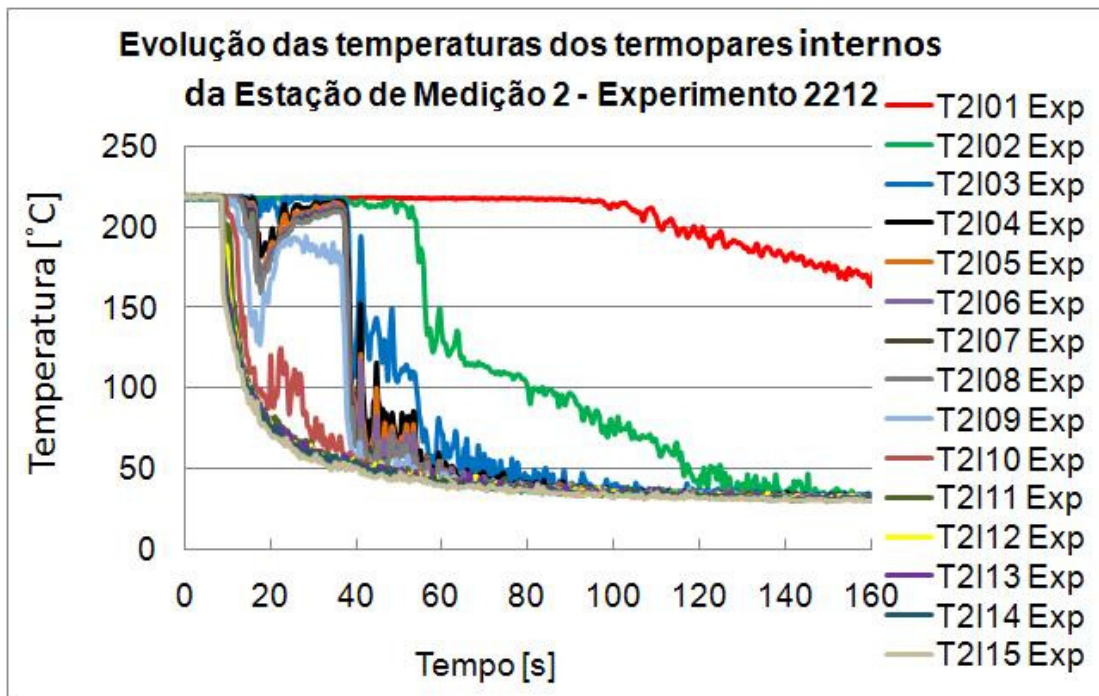


Figura 5.41 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.

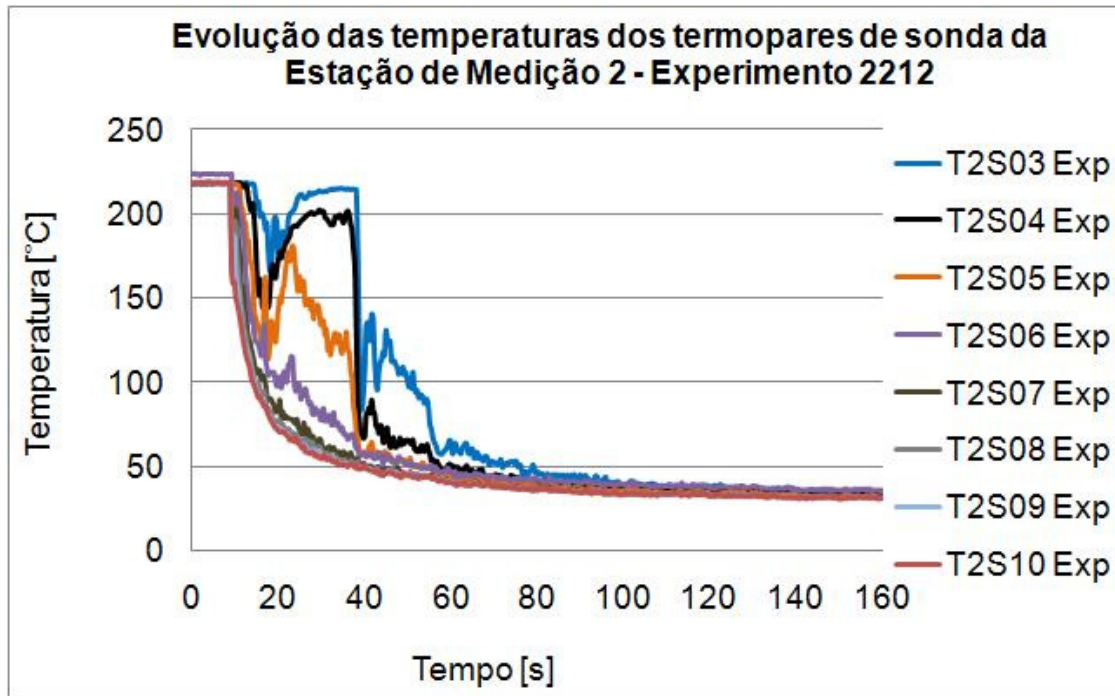


Figura 5.42 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 2212.

As Figuras 5.43 a 5.45 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3, localizada a 1800 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.43 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento continua bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como nas Fig. 5.37 e 5.40. Os termopares T3E01 e T3E02 apresentaram resultados defasados, caracterizando a estratificação térmica na parede externa do tubo.

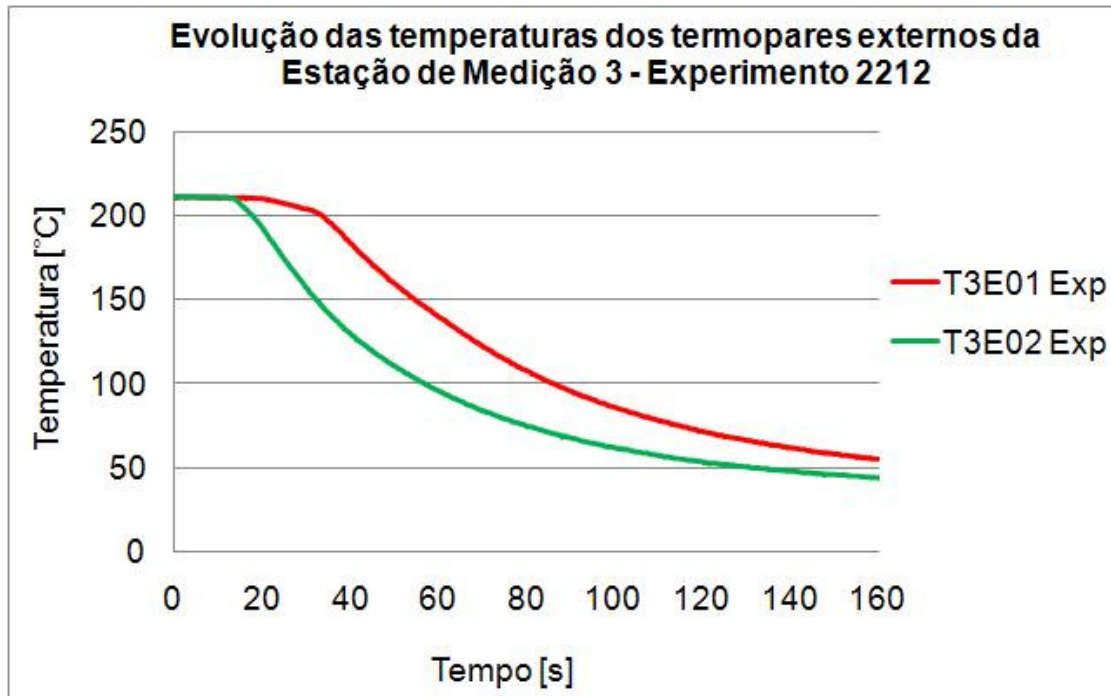


Figura 5.43 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.

Também na Estação de Medição 3, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.44 e 5.45. Os termopares das cotas inferiores, tanto o posicionado próximo à parede do tubo (T3I05), quanto os posicionados na sonda vertical (T3S04, T3S05 e T3S06), apresentaram curvas de resfriamento quase sobrepostas, caracterizando uma frente de água fria que ultrapassa a cota - 29,1 mm. O resfriamento brusco dos termopares intermediários, tanto internos, T3I01, T3I02, T3I03 e T3I04, quanto de sonda, T3S01, T3S02 e T3S03, todos posicionados entre as cotas - 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda frente de água fria, escoando com interface inferior entre as cotas - 29,1 mm e - 10,1 mm e com interface superior acima da cota + 10,1 mm. Novamente, a curva do termopar T3I03, apresentou uma inconsistência com os demais, tornando inválido seu resultado quantitativo, mas mostrando-se aceitável de um ponto de vista qualitativo, pela comparação do formato da curva com o das curvas dos termopares vizinhos, T3I01, T3I02, e T3I04.

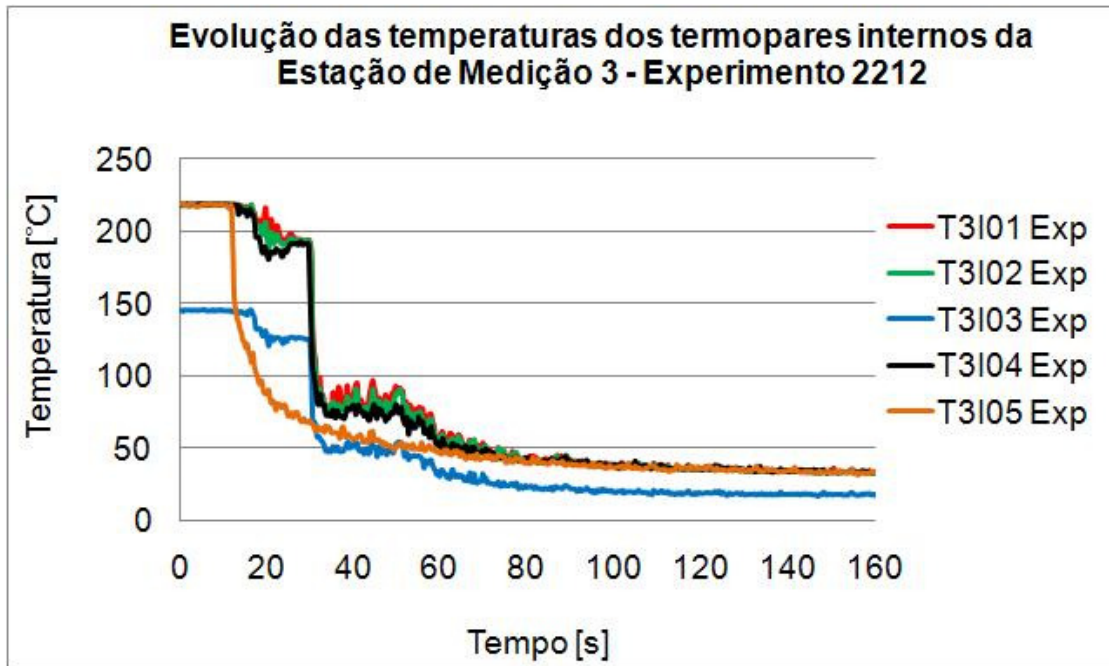


Figura 5.44 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.

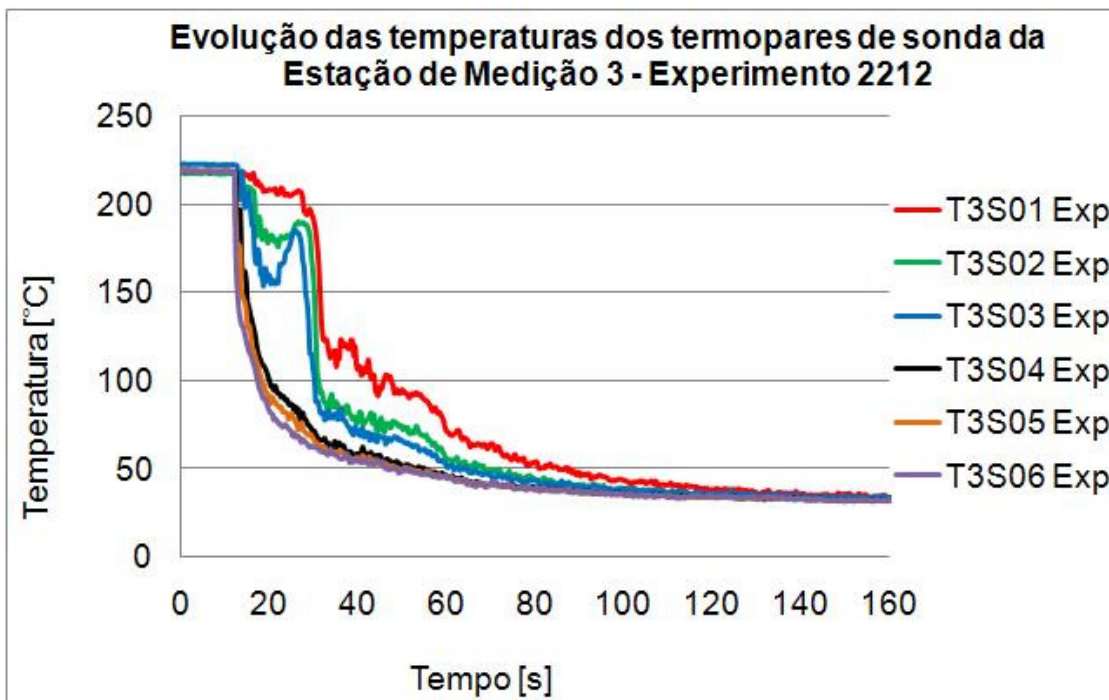


Figura 5.45 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.

A Figura 5.46 mostra as curva de evolução da temperatura dos termopares de fluido de cota zero, ou seja, posicionados a meia altura do tubo. Mais uma vez, pode-se observar que, nesta cota, os termopares da Estação de Medição 3 (T3I02 e T3S02) foram os primeiros a resfriar, seguidos dos termopares da Estação de Medição 2 (T2I06 e T2S04) e, finalmente, dos termopares da Estação de Medição 1 (T1I05 e T1S05). Pôde-se concluir, assim, que no Experimento 2212, a segunda camada de água fria, também, propagava em sentido inverso sobre a primeira.

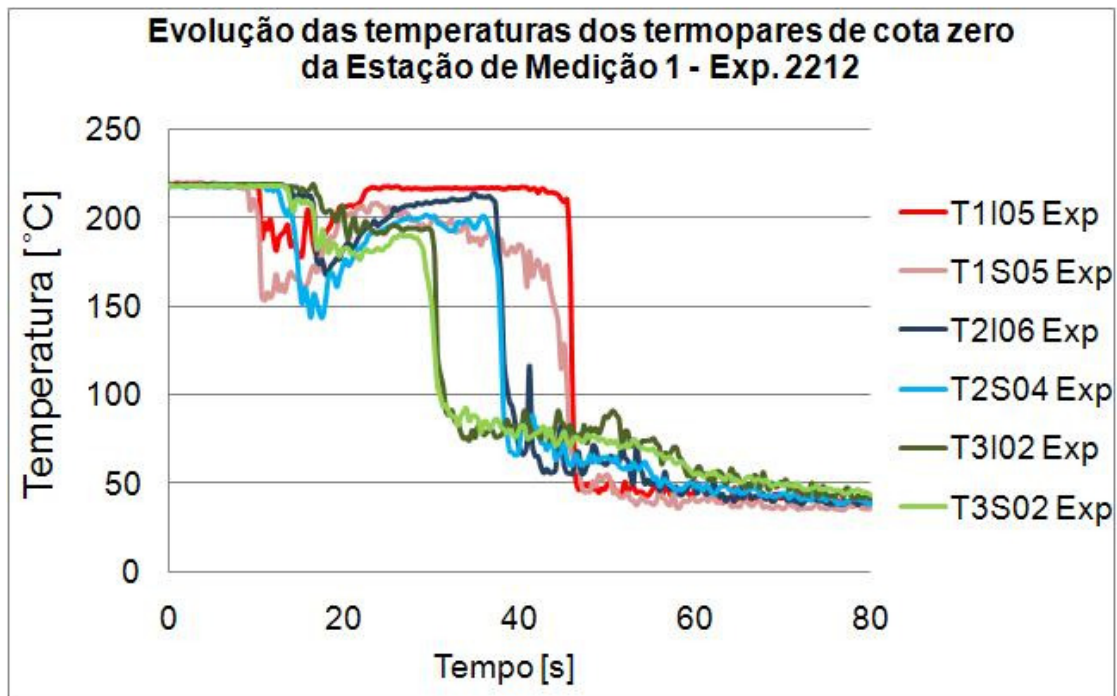


Figura 5.46 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 2212.

5.2.8. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 1110

As Figuras 5.47 a 5.55 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 1110. Todos os resultados são apresentados até o instante 300 s, uma vez que nesse instante as condições de estratificação térmica já haviam se dissipado. O Experimento 1110 foi realizado à pressão manométrica de 10,0 bar, com uma vazão de injeção

média de 0,491 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,110, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. Este é um valor de número de Froude intermediário, que apresentou elevados gradientes térmicos e oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente.

As Figuras 5.47 a 5.49 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1. A Figura 5.47 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido influência da condução de calor. A sequência de resfriamento é coerente com o esperado, com os termopares das cotas inferiores sendo resfriados primeiro, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo.

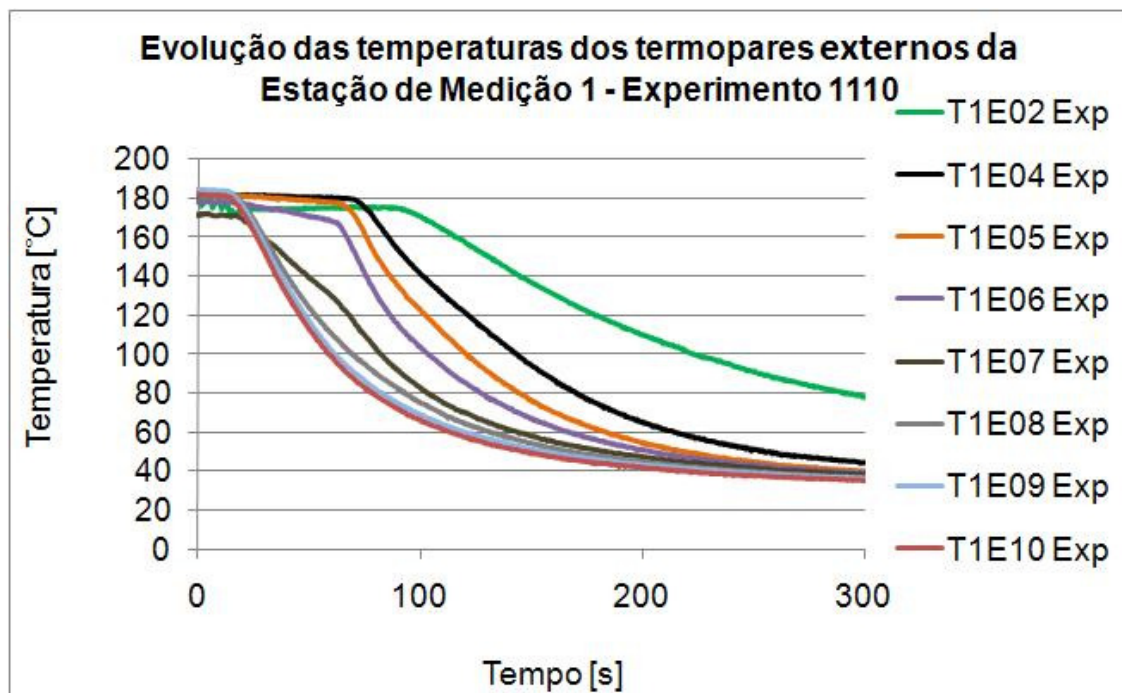


Figura 5.47 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.

Os termopares de fluido da Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Figs. 5.48 e 5.49, apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cota intermediária. Os termopares das cotas inferiores, T1I07, T1I10, T1S07 e

T1S08, foram os primeiros a serem resfriados, levando à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura entre as cotas - 24,6 mm, correspondente aos termopares T1I07 e T1S07, e - 10,1 mm, correspondente aos termopares T1I06 e T1S06. A diferença no termopar T1I09 pode ser explicada por imprecisão da curva de calibração. Para os termopares internos e externos foi considerada uma reta ajustada a partir da tabela ASTM-E-230, fornecida pelo fabricante dos termopares, conforme Anexo A. O resfriamento bastante brusco dos termopares intermediários, particularmente dos termopares T1I04, T1I05, T1I06, T1S04, T1S05 e T1S06, todos posicionados entre as cotas - 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda camada de água fria. Os termopares T1I02, T1I03, T1S02 e T1S03 parecem ter sido atingidos posteriormente por esta segunda camada de água fria, que deve ter apresentado uma frente de avanço com perfil vertical na região dos primeiros termopares e mais inclinado na região dos últimos. O resfriamento dos termopares superiores (T1I01 e T1S01) ocorreu de forma mais suave, em seguida aos demais, de forma bastante defasada, sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

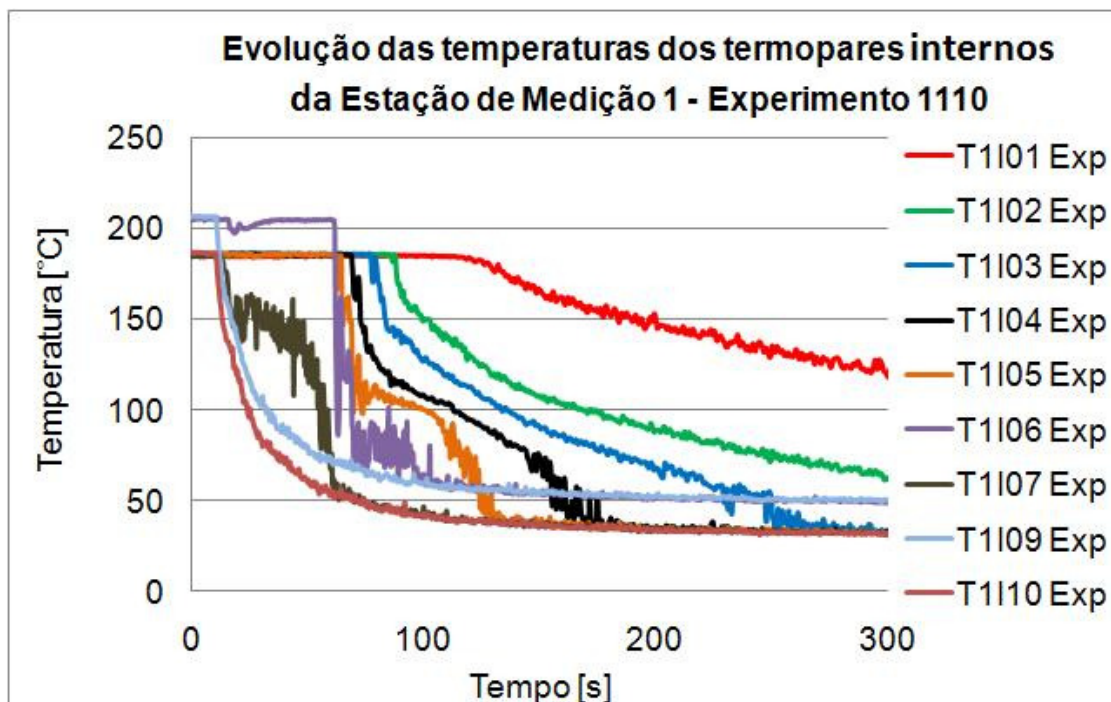


Figura 5.48 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.

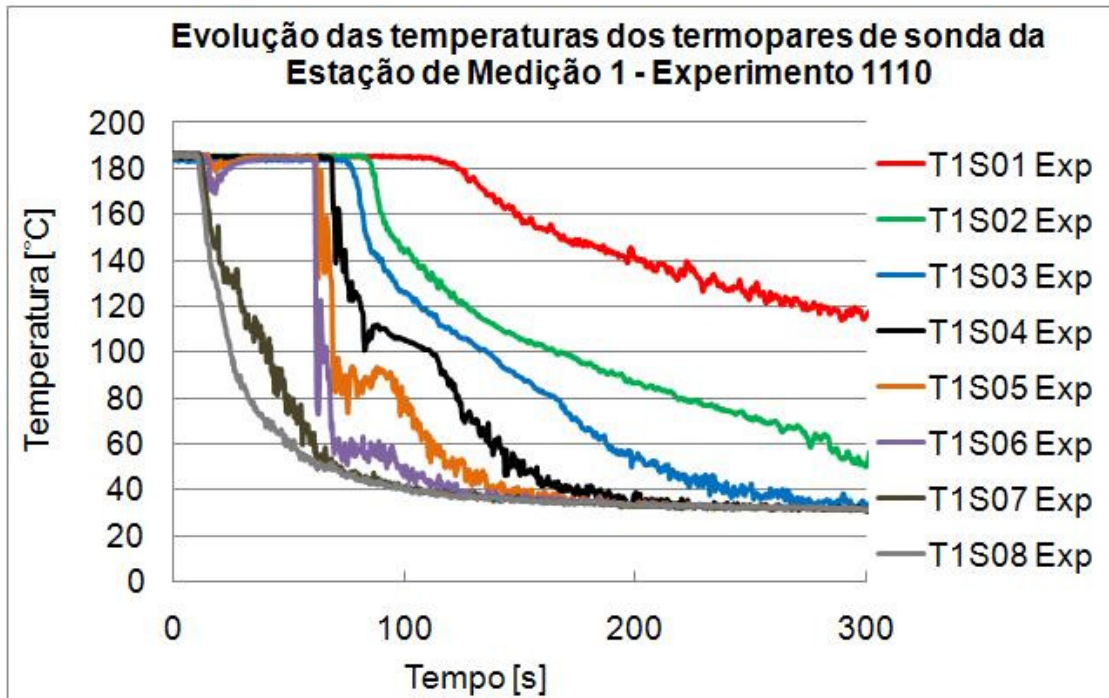


Figura 5.49 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1110.

As Figuras 5.10 a 5.12 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2. A Figura 5.50 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde, como na Fig. 5.47, o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. O termopar superior, T2E01, apresentou um processo de resfriamento totalmente deslocado dos demais.

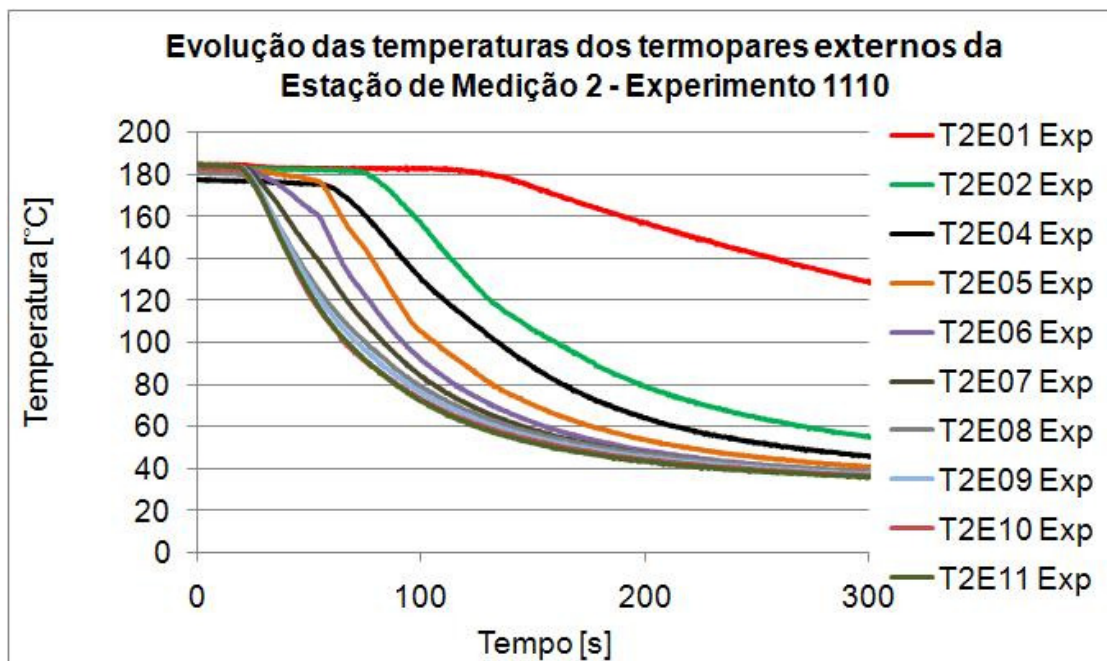


Figura 5.50 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Fig. 5.51 e 5.52. Os termopares das cotas inferiores, tanto os posicionados próximos à parede do tubo (T2I11, T2I12, T2I13, T2I14 e T2I15), quanto os posicionados na sonda vertical (T2S07, T2S08, T2S09 e T2S10), apresentaram curvas de resfriamento bastante próximas, tendo sido os primeiros a se resfriarem. Assim, ficou caracterizado o avanço de uma camada de água fria com uma altura entre as cotas – 29,1 mm, cota dos termopares T2I11 e T2S07, e – 19,9 mm, cota dos termopares T2I10 e T2S06.

O resfriamento bastante brusco dos termopares intermediários, particularmente dos termopares T2I03, T2I04, T2I05, T2I06, T2I07, T2I08, T2I09 e T2I10, internos, e termopares T2S03, T2S04, T2S05 e T2S06, de sonda, caracteriza a passagem de uma segunda camada de água fria, escoando sobre a primeira e atingindo uma cota acima + 10,1 mm. Os termopares T2I02 e T2S02 parecem ter sido atingidos posteriormente por esta segunda camada de água fria, que deve ter apresentado uma frente de avanço de perfil vertical, na região dos primeiros termopares, e de perfil mais inclinado acima da cota + 10,1 mm. O resfriamento do termopar

superior (T1I01) ocorreu de forma mais suave, após o resfriamento dos demais, e bastante defasado no tempo, sugerindo a formação de um bolsão de água quente, na região superior do tubo, que se dissipou lentamente.

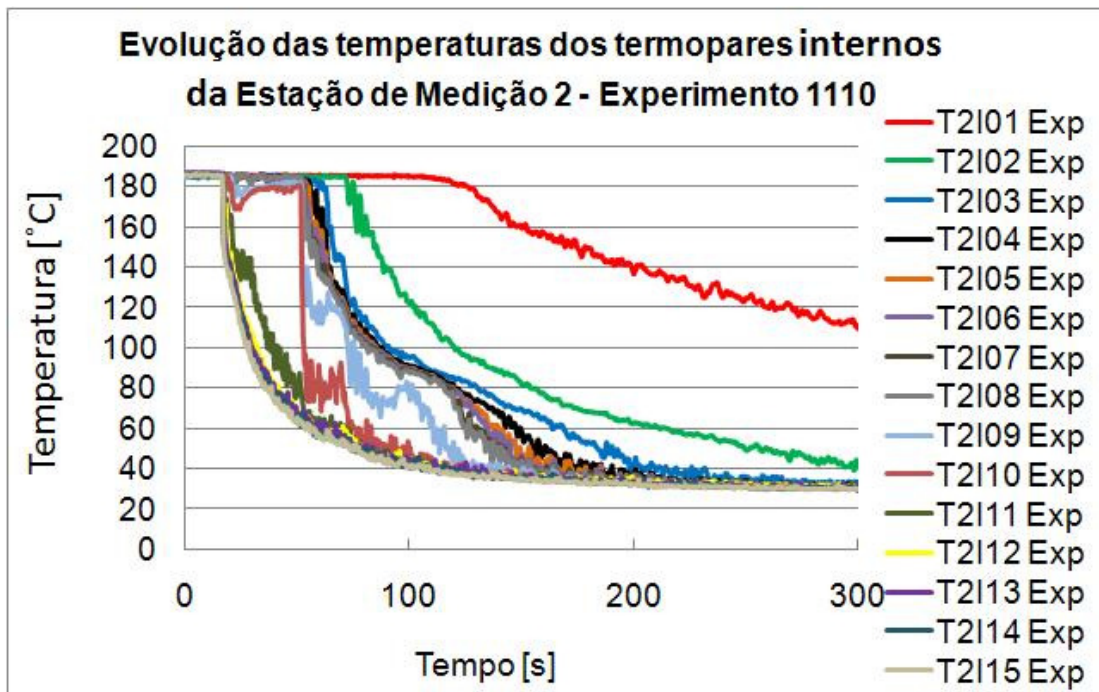


Figura 5.51 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.

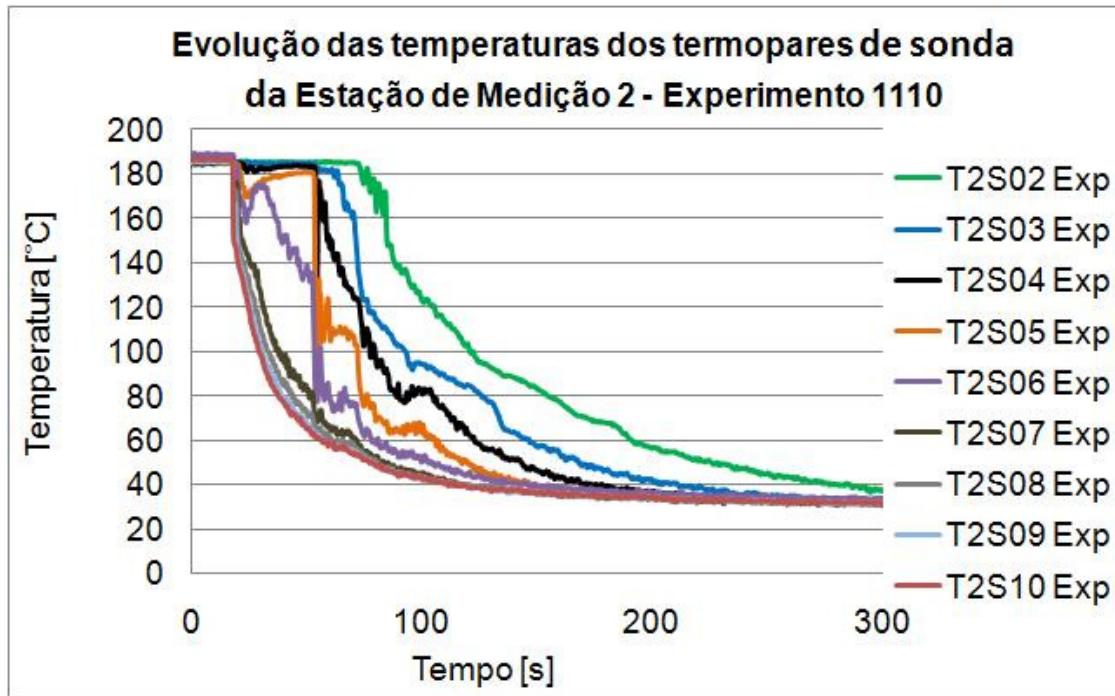


Figura 5.52 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1110.

As Figuras 5.53 a 5.55 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3. A Figura 5.53 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento continua bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede, como nas Fig. 5.47 e 5.50. Aqui, os termopares T3E01 e T3E02 apresentaram resultados bastante defasados, caracterizando a estratificação térmica na parede externa do tubo.

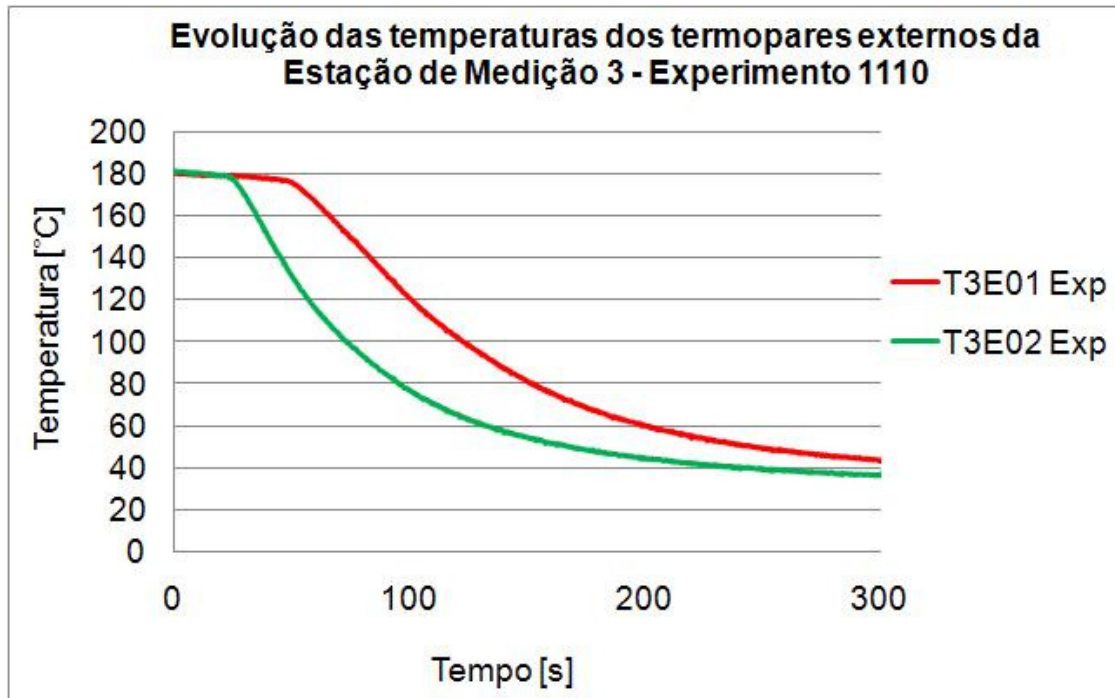


Figura 5.53 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.

Também na Estação de Medição 3, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os termopares de cotas intermediárias, como pode ser observado nas Figs. 5.54 e 5.55. Os termopares das cotas inferiores, tanto o posicionado próximo à parede do tubo (T3I05), quanto os posicionados na sonda vertical (T3S04, T3S05 e T3S06), apresentaram curvas de resfriamento próximas, caracterizando uma frente de água fria que ultrapassa a cota - 29,1 mm. O resfriamento brusco dos termopares intermediários, internos T3I01, T3I02, T3I03 e T3I04 e dos termopares de sonda T3S01, T3S02 e T3S03, todos posicionados entre as cotas - 10,1 mm e + 10,1 mm, leva à conclusão de que os mesmos foram atingidos por uma segunda camada de água fria, escoando sobre a primeira. Mais uma vez, a curva do termopar T3I03, apresentou uma inconsistência com os demais, tornando inválido seu resultado quantitativo, mas mostrando-se aceitável de um ponto de vista qualitativo, pela comparação do formato da curva com o das curvas dos termopares vizinhos, T3I01, T3I02 e T3I04.

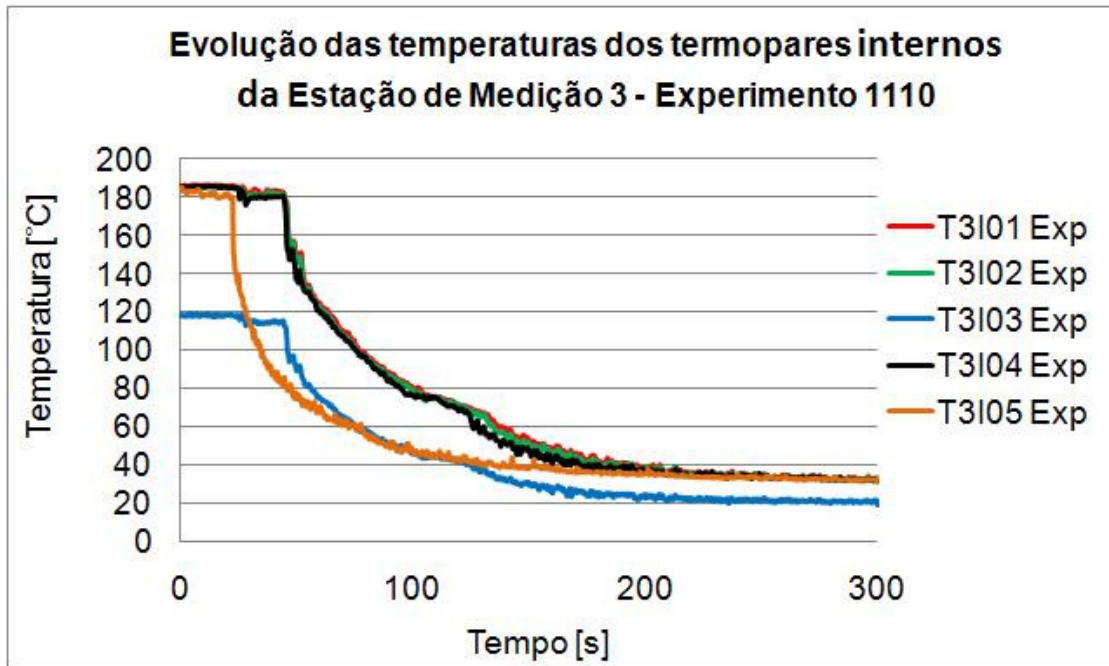


Figura 5.54 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.

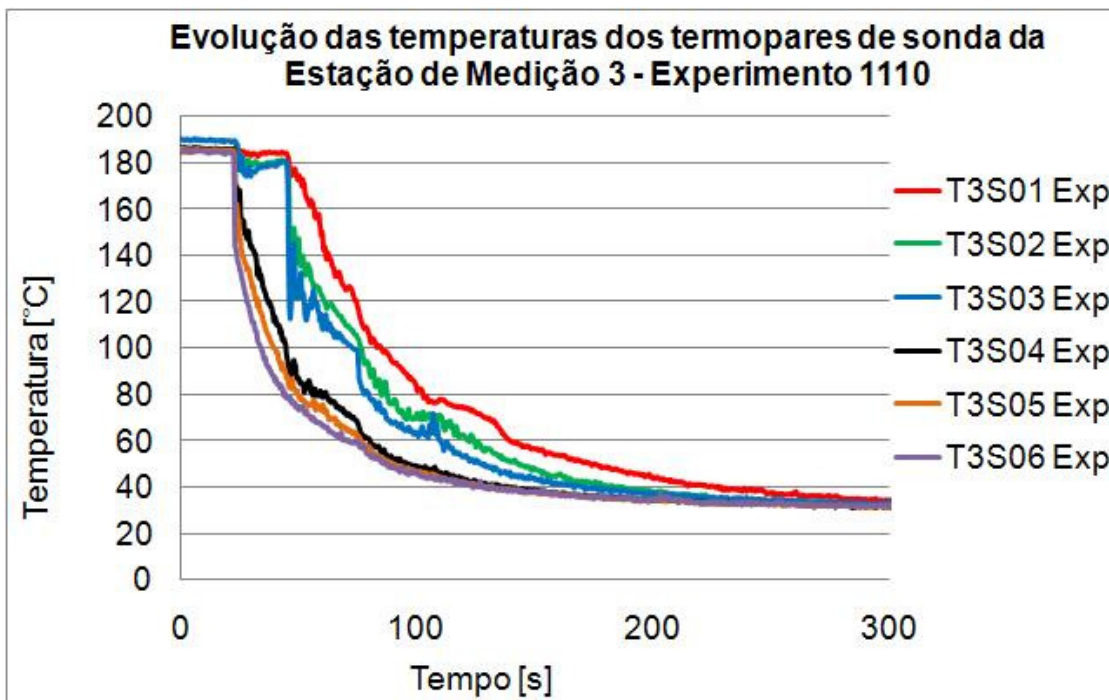


Figura 5.55 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.

A Figura 5.56 mostra as curvas de evolução da temperatura dos termopares de fluido de cota zero, ou seja, posicionados a meia altura do tubo. Novamente, pode-se observar que, nesta cota, os termopares da Estação de Medição 3 (T3I02 e T3S02) foram os primeiros a resfriar, seguidos dos termopares da Estação de Medição 2 (T2I06 e T2S04) e, finalmente, dos termopares da Estação de Medição 1 (T1I05 e T1S05). Pôde-se concluir que no Experimento 1110 a segunda camada de água fria mais uma vez propagava em sentido inverso sobre a primeira.

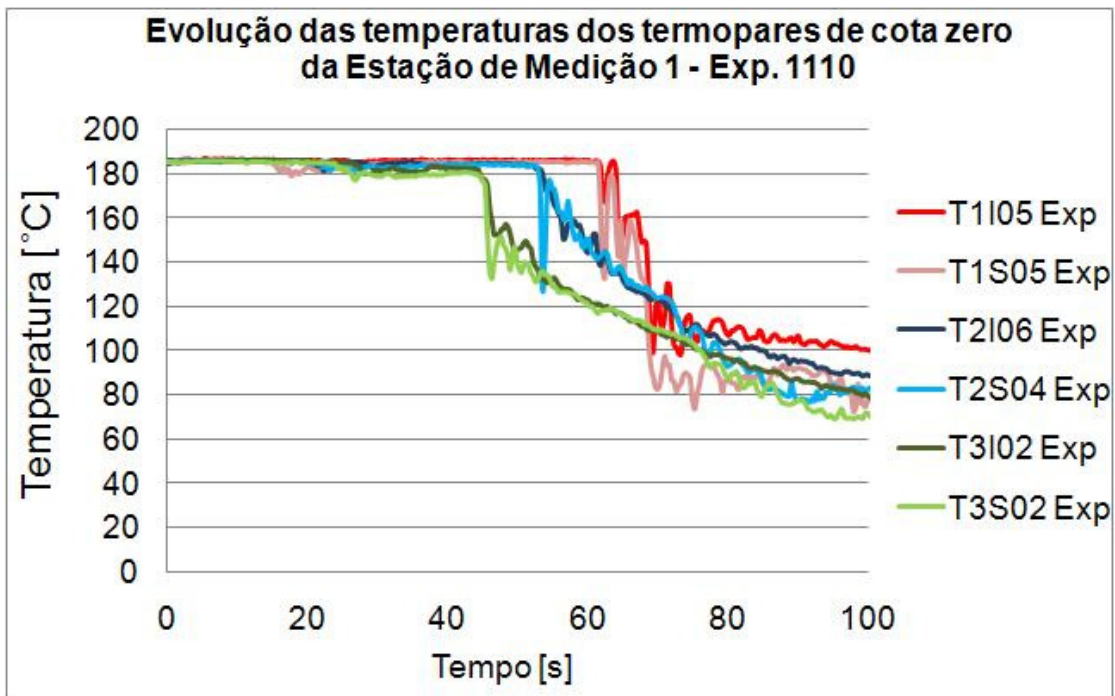


Figura 5.56 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1110.

5.2.9. Resultados das Medidas de Temperatura do Experimento 1436

As Figuras 5.57 a 5.65 apresentam os resultados com a evolução das medidas de temperatura durante o Experimento 1436. Todos os resultados são apresentados até o instante 140 s, uma vez que nesse instante as condições de estratificação térmica já haviam se dissipado. O Experimento 1436 foi realizado à pressão manométrica de 10,2 bar, com uma vazão de injeção

média de 1,904 kg/s, e apresentou um número de Froude de 0,436, conforme pode ser observado na Matriz de Testes apresentada na Tabela 5.1. É o experimento com número de Froude mais alto entre todos os experimentos realizados e apresentou elevados gradientes térmicos, mas não apresentou oscilações bem caracterizadas da interface entre a água fria e a água quente.

As Figuras 5.57 a 5.59 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 1, localizada a 500 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.57 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo. A sequência de resfriamento dos termopares é em ordem ascendente, coerente com o esperado, uma vez que a frente de água fria escoou pela região inferior do tubo. O resfriamento do termopar superior, T1E02, ocorre muito após o resfriamento dos demais, caracterizando a estratificação térmica na parede do tubo simulador do bocal de injeção do gerador de vapor.

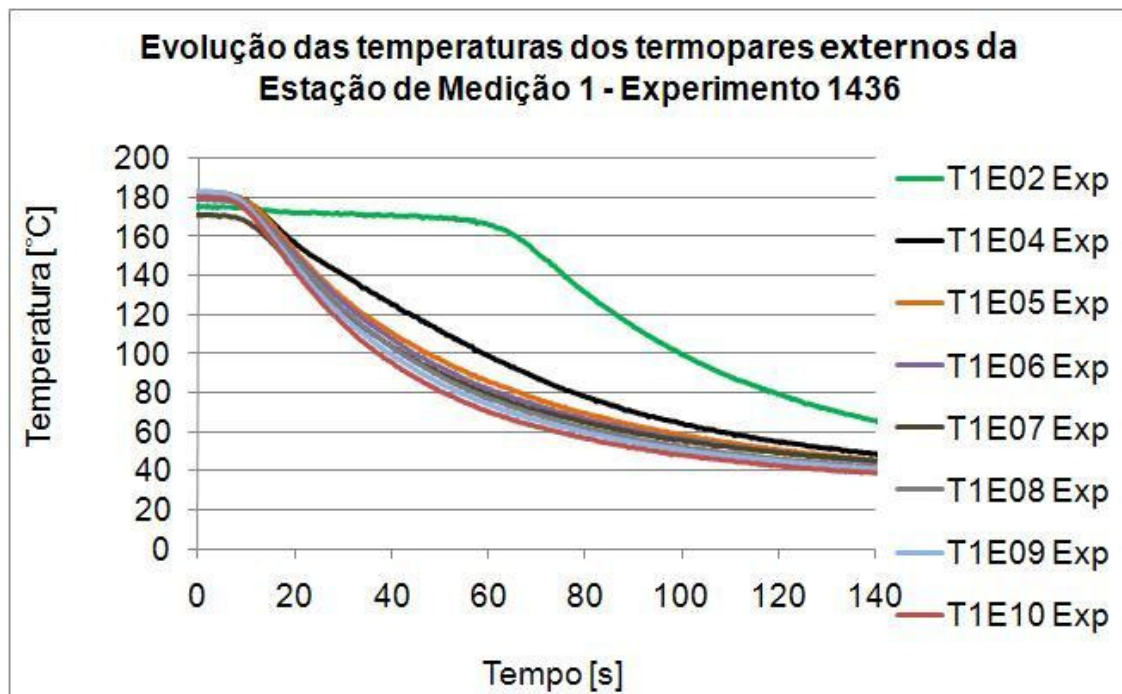


Figura 5.57 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.

Já os termopares de fluido da Estação de Medição 1, cujos resultados são apresentados nas Fig. 5.58 e 5.59, apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os inferiores, situados até a cota + 10,1 mm. Estes termopares, tanto os internos, posicionados próximos à parede do tubo, T1I04, T1I05, T1I06, T1I07, T1I08, T1I09 e T1I10, quanto os posicionados na sonda vertical, T1S04, T1S05, T1S06, T1S07, T1S08 e T1S09, apresentaram curvas de temperatura com os respectivos resfriamentos ocorrendo quase simultaneamente. Juntamente com isto, o princípio de um processo de recuperação de temperatura apresentado pelos termopares T1I04 e T1S04 leva à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura próxima da cota desses termopares, + 10,1 mm. Os termopares T1I02, T1I03, T1S02 e T1S03 apresentaram curvas de temperatura com pré-resfriamento, seguido da recuperação quase total da temperatura, levando à conclusão de que a camada de água fria apresentou uma onda de avanço cuja altura atingiu a cota + 37,4 mm. O resfriamento definitivo destes termopares e dos termopares superiores (T1I01 e T1S01), em sequência ascendente, caracterizou um processo de preenchimento do tubo pela água fria, e não o avanço de uma segunda camada de água fria.

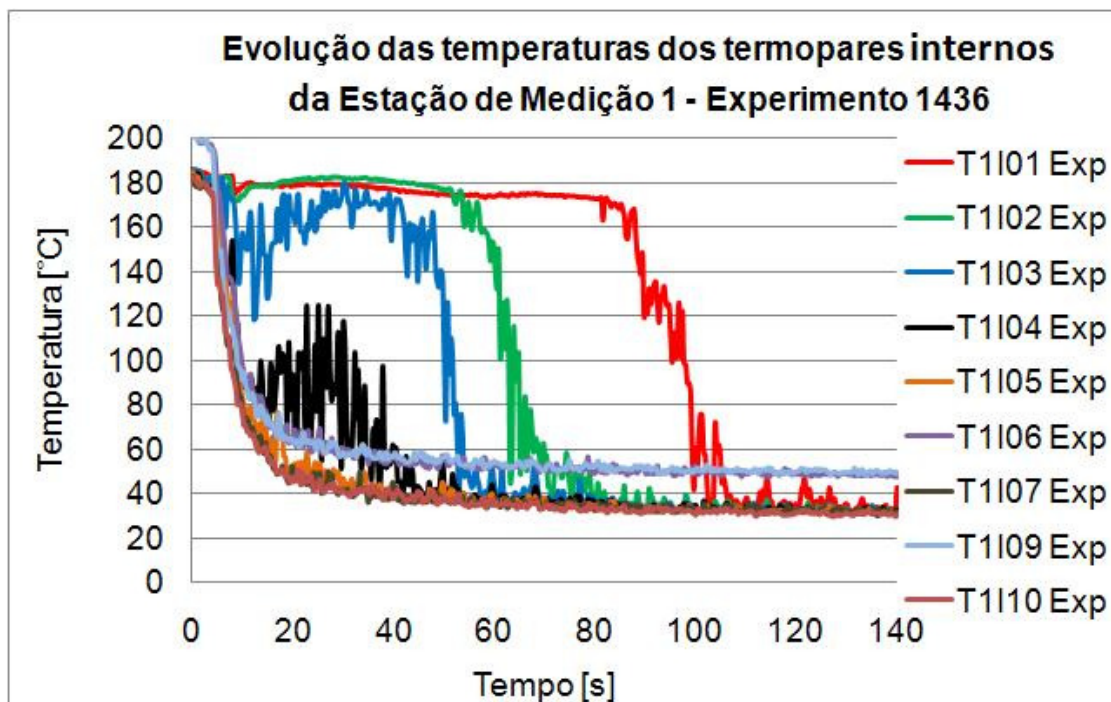


Figura 5.58 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.

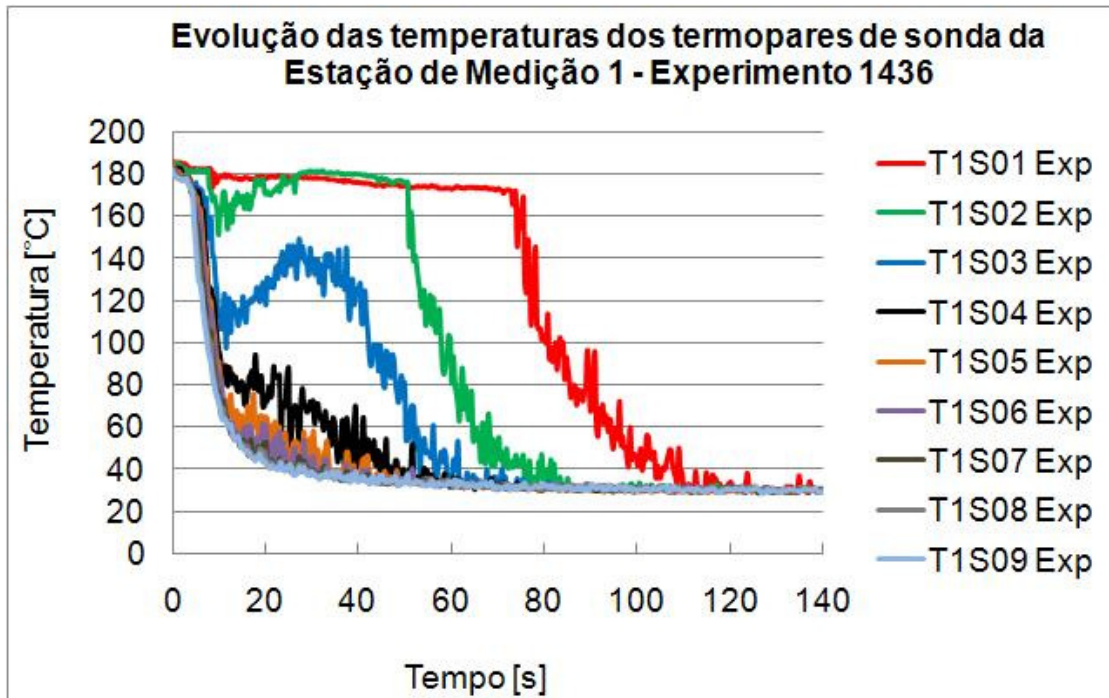


Figura 5.59 – Evolução das temperaturas nos termopares da sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 1436.

As Figuras 5.60 a 5.62 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 2, localizada a 1200 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.60 mostra a evolução das temperaturas medidas na parede externa do tubo, onde o processo de resfriamento é bastante suave, devido à forte influência da condução de calor na parede do tubo, como na Fig. 5.57. Aqui, os termopares inferiores, do T2E11 até o T2E02, foram resfriados em sequência ascendente, mas apresentando curvas de temperatura razoavelmente próximas, sobretudo até o termopar T2E05. Entretanto, o termopar superior, T2E01, apresentou um processo de resfriamento totalmente deslocado dos demais, caracterizando a estratificação térmica na parede externa do tubo.

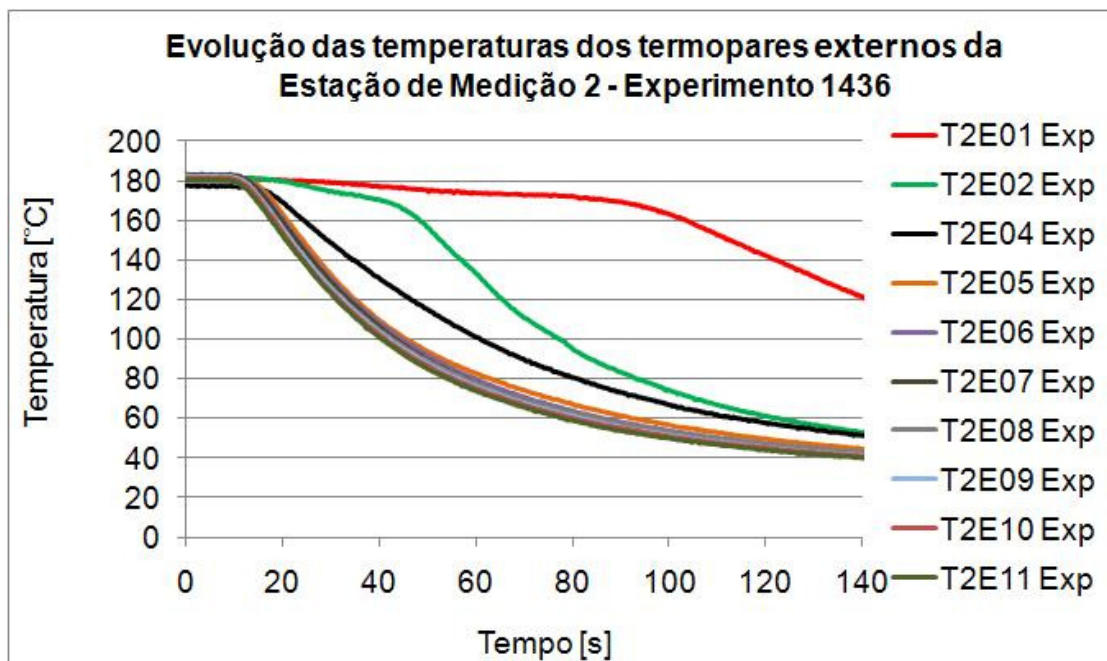


Figura 5.60 – Evolução das temperaturas nos termopares externos (de parede) da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.

Também na Estação de Medição 2, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, sobretudo os inferiores, situados até pouco acima da cota zero, como pode ser observado nas Figs. 5.61 e 5.62. Os termopares das cotas inferiores, tanto os posicionados próximos à parede do tubo (T2I04, T2I05, T2I06, T2I07, T2I08, T2I09, T2I10, T2I11, T2I12, T2I13, T2I14 e T2I15), quanto os posicionados na sonda vertical (T2S04, T2S05, T2S06, T2S07, T2S08, T2S09 e T2S10), apresentaram curvas de temperatura com os respectivos resfriamentos ocorrendo quase simultaneamente, levando à conclusão de que a camada de água fria avançou com uma altura acima da cota zero. Um processo de resfriamento em duas etapas, apresentado pelos termopares T2I03 e T2S03, juntamente com o termopar T1S02, que apresentou uma curva de temperatura com um pré-resfriamento seguido de recuperação parcial da temperatura, leva à conclusão de que a frente de avanço da camada de água fria apresentou uma onda de altura superior à do restante da camada de água fria. O processo de resfriamento definitivo dos termopares T1I01, T1I02, T1I03, T1S02 e T1S03, em sequência ascendente, parece caracterizar um processo de preenchimento do tubo pela água fria, e não o avanço de uma segunda camada de água fria.

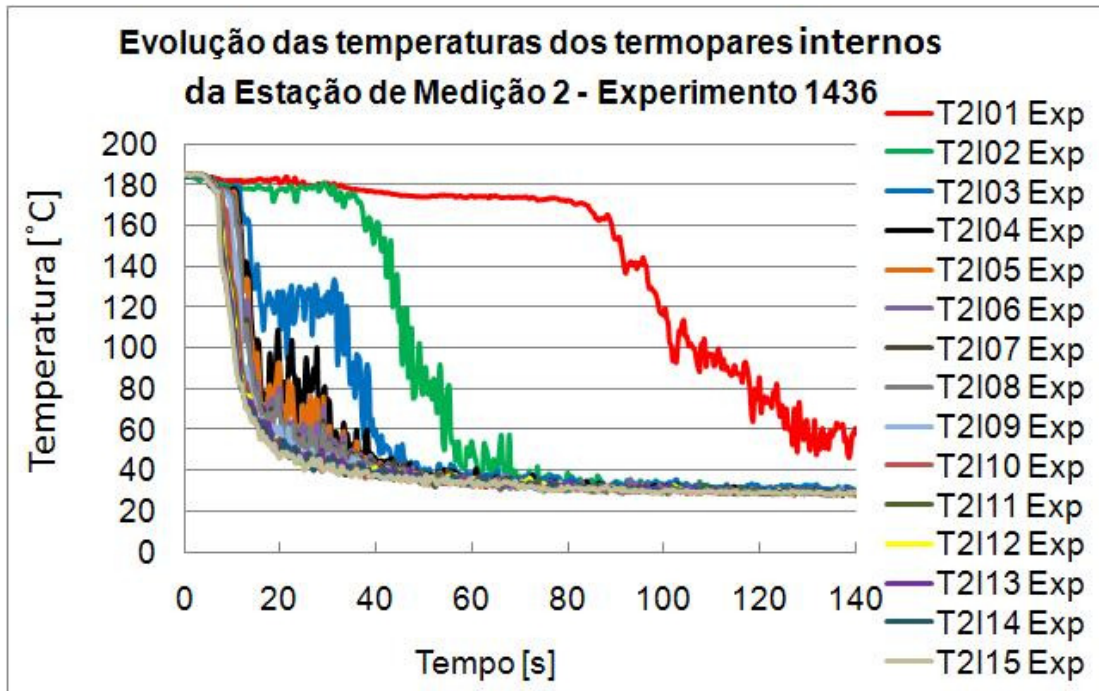


Figura 5.61 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.

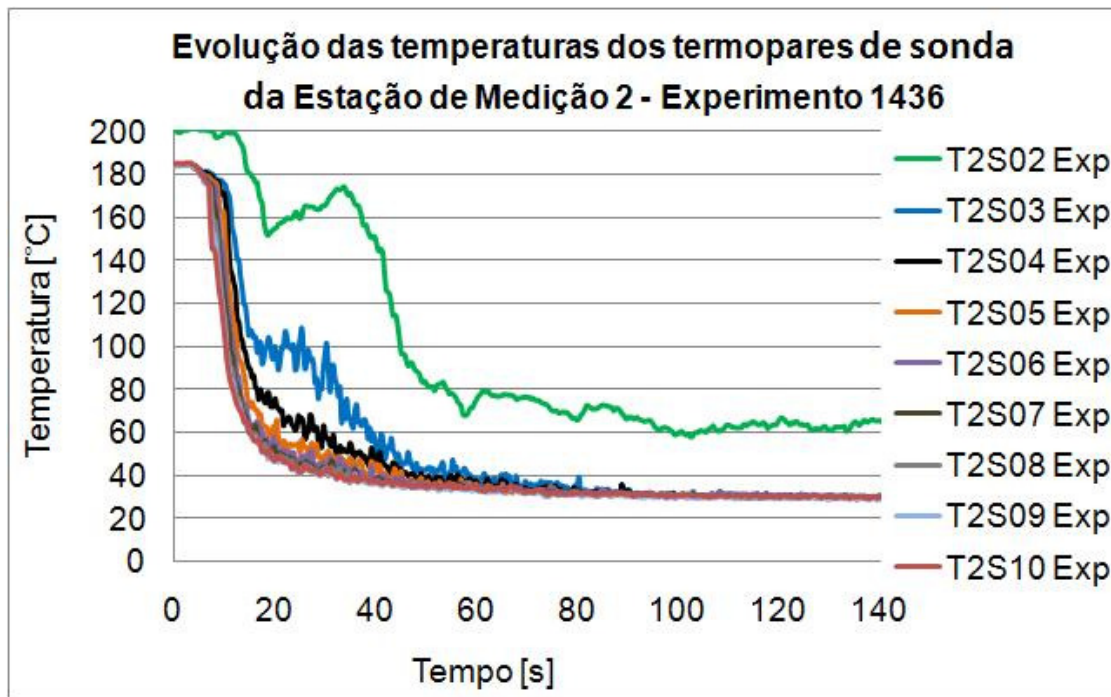


Figura 5.62 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 2 durante o Experimento 1436.

As Figuras 5.63 a 5.65 apresentam resultados de medidas realizadas na Estação de Medição 3, localizada a 1800 mm da curva do tubo simulador do bocal de injeção. A Figura 5.63 mostra a evolução da temperatura medida na parede externa do tubo, pelo termopar T3E02. O termopar T3E01 danificou-se antes da realização do experimento 1436, o que justifica a ausência de resultado referente ao mesmo.

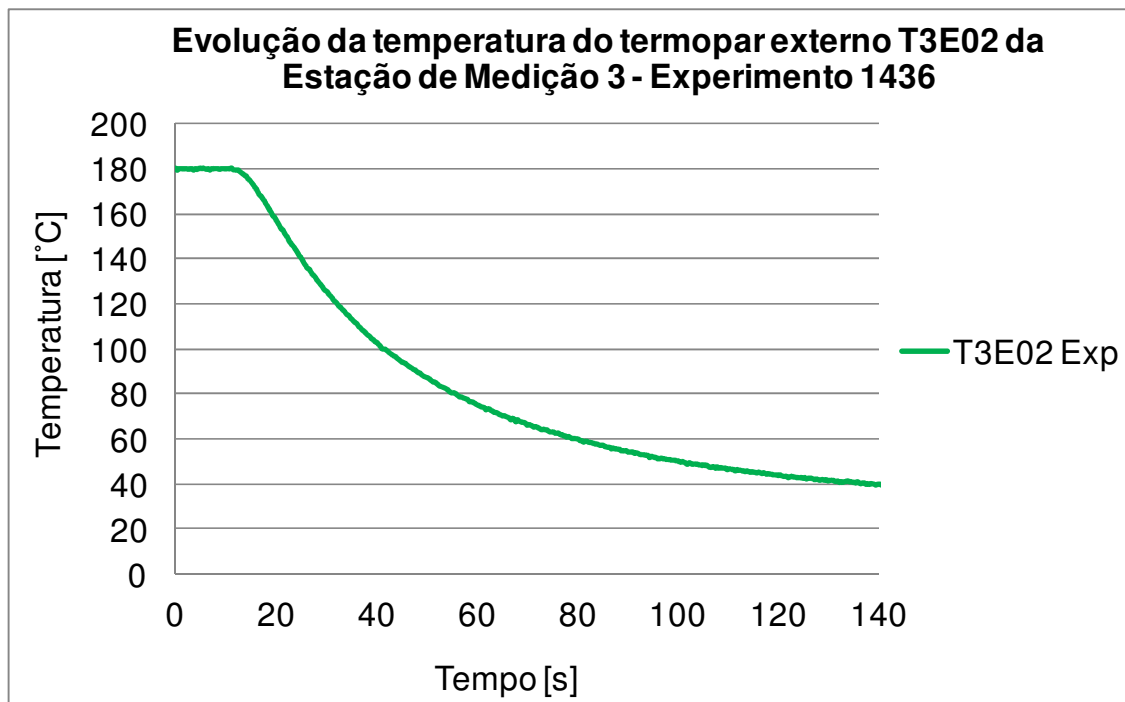


Figura 5.63 – Evolução da temperatura no termopar externo (de parede) T3E02 da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.

Também na Estação de Medição 3, os termopares de fluido apresentaram um processo de resfriamento mais brusco, como pode ser observado nas Figs. 5.64 e 5.65. Todos os termopares de fluido desta estação de medição foram resfriados de forma brusca e quase simultânea, do que se concluiu que a camada de água fria avançou com uma altura superior à cota + 10,1 mm. A Estação de Medição 3 não possui qualquer termopar acima dessa cota.

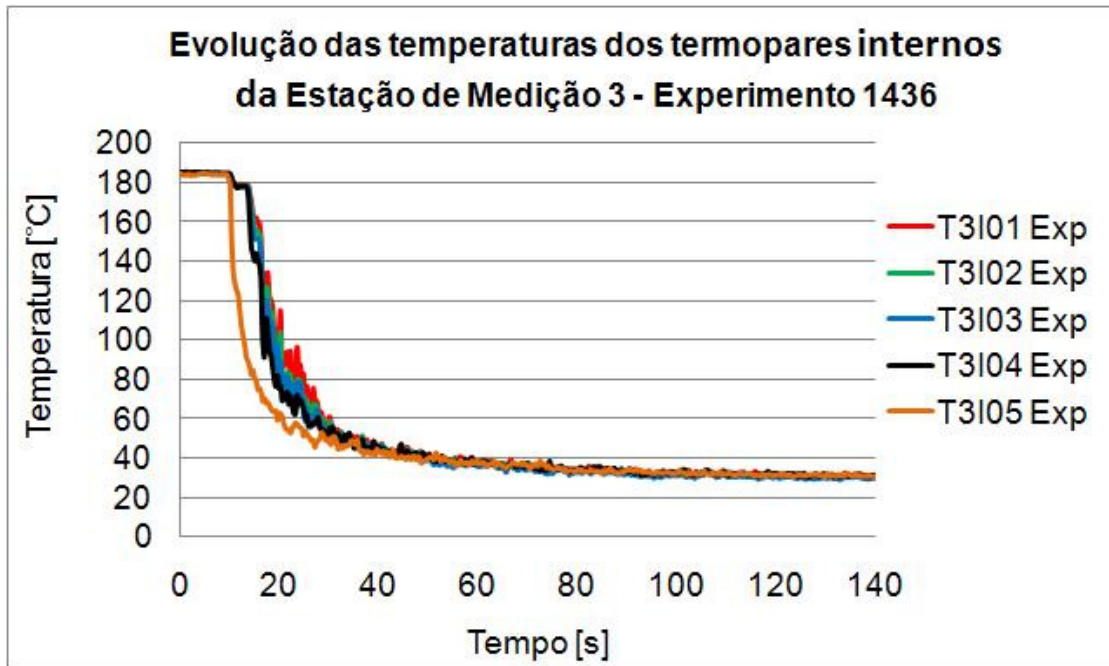


Figura 5.64 – Evolução das temperaturas nos termopares internos da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.

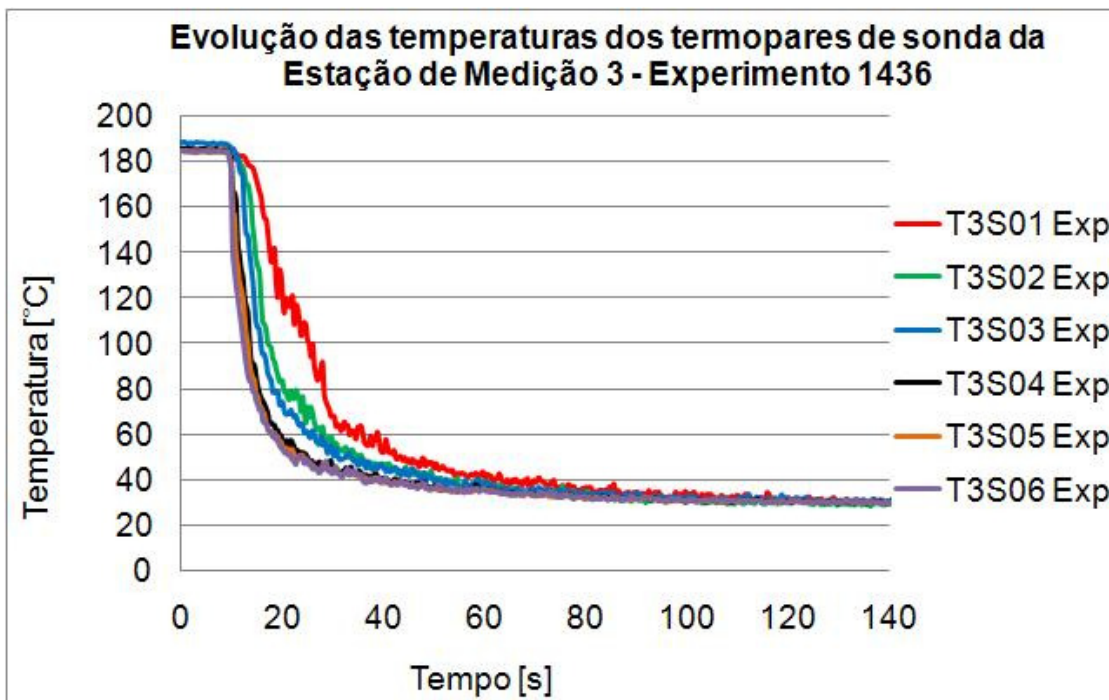


Figura 5.65 – Evolução das temperaturas nos termopares de sonda da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.

A Figura 5.66 apresenta as curva de evolução da temperatura dos termopares de fluido de cota zero, ou seja, posicionados a meia altura do tubo. Pode-se observar que os termopares da Estação de Medição 1 (T1I05 e T1S05) foram os primeiros a serem resfriados, seguidos dos termopares da Estação de Medição 2 (T2I06 e T2S04) e, finalmente, dos termopares da Estação de Medição 3 (T3I02 e T3S02). Assim, não ficou caracterizada a presença de uma segunda camada de água fria propagando em sentido inverso sobre a primeira.

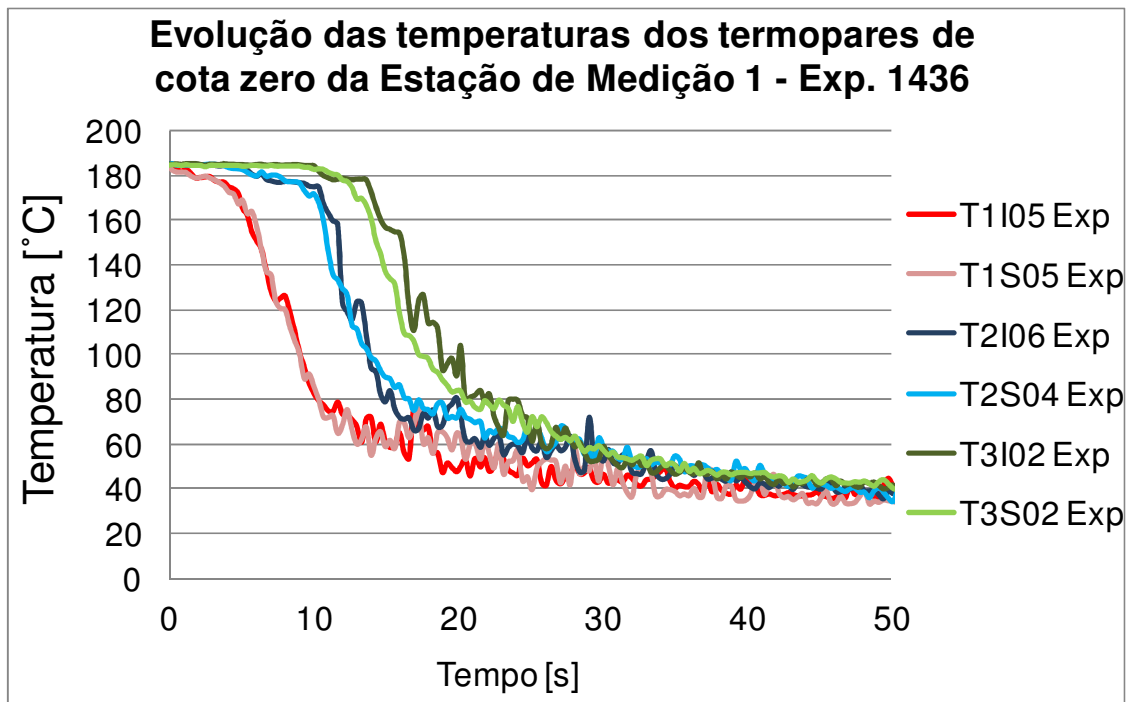


Figura 5.66 – Evolução das temperaturas nos termopares de cota zero da Estação de Medição 3 durante o Experimento 1436.

5.3. Detecção da Oscilação da Interface entre a Água Fria e a Água Quente

Conforme mencionado na Seção 2 e na Seção 3.2.1, um dos mais graves efeitos que podem ocorrer durante o processo de estratificação térmica é a oscilação da interface ("striping"). Esta oscilação foi detectada em alguns dos experimentos. Entendeu-se que a caracterização da mesma se daria quando dois ou mais termopares consecutivos registrassem a mesma oscilação. A

Figura 5.67 mostra os termopares de sonda T1S04 e T1S05 oscilando em conjunto e de forma muito nítida entre os instantes 73 s e 84 s, durante o Experimento 2159. A oscilação registrada pelo termopar T1S04 chegou a mais de 80°C, enquanto que o termopar T1S05 registrou uma oscilação superior a 60 °C, no pico de maior amplitude. Pode-se perceber, ainda, que o termopar T1S06 registrou dois picos de oscilação coincidentes com os dois primeiros picos nos termopares anteriores, mas com amplitude pouco superior a 10 °C. O intervalo entre os picos foi de aproximadamente 2,4 s, correspondendo a uma frequência de 0,4 Hz. Como os termopares T1S04 e T1S06 estão posicionados nas cotas 10,1 e -10,1, respectivamente, a altura da oscilação da interface foi igual ou superior a 20,2 mm. Entre os instantes 84 s e 90 s, os termopares T1S03, T1S04 e T1S05 registraram picos de oscilação coincidentes, porém de menor amplitude. Após 90 s, os termopares T1S04 e T1S05 registraram, ainda, alguma oscilação coincidente.

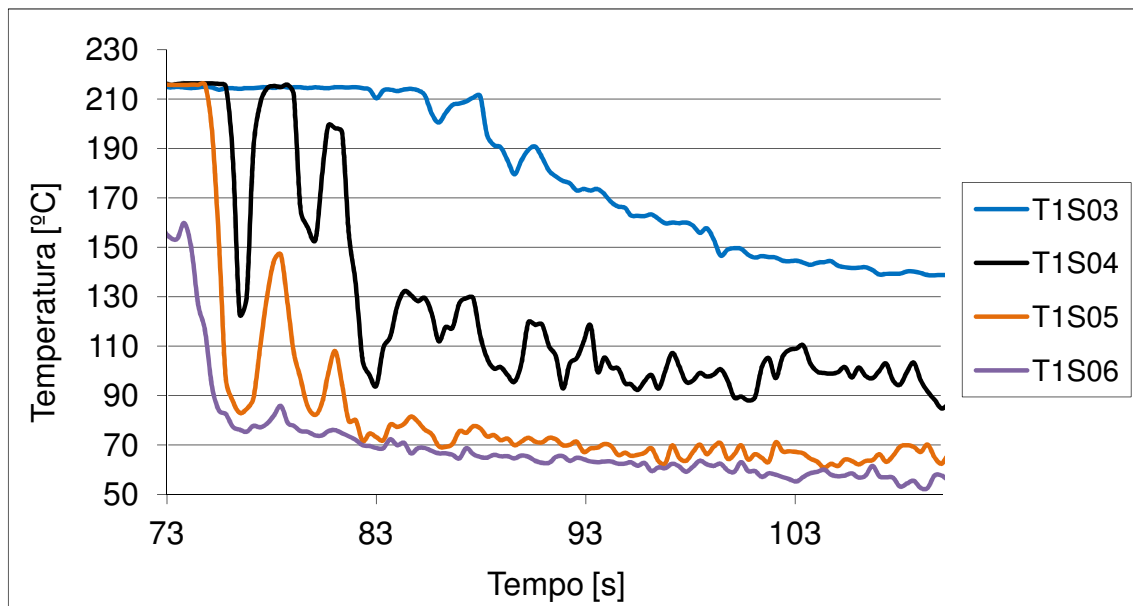


Figura 5.67 – Caracterização da oscilação da interface entre a água fria e a água quente na sonda vertical da Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.

A Figura 5.68 mostra oscilações semelhantes registradas pelos termopares internos, ou seja, termopares de fluido posicionados próximo à parede do tubo, igualmente para a Estação de Medição 1 podendo-se observar os termopares T1I04 e T1I05 oscilando em conjunto, durante o

Experimento 2159. A oscilação registrada pelo termopar T1105 chegou a uma amplitude superior a 100°C. Essa condição em que a oscilação próxima à parede é maior do que a oscilação junto ao diâmetro vertical do tubo foi obtida em todos os experimentos que apresentaram tais oscilações.

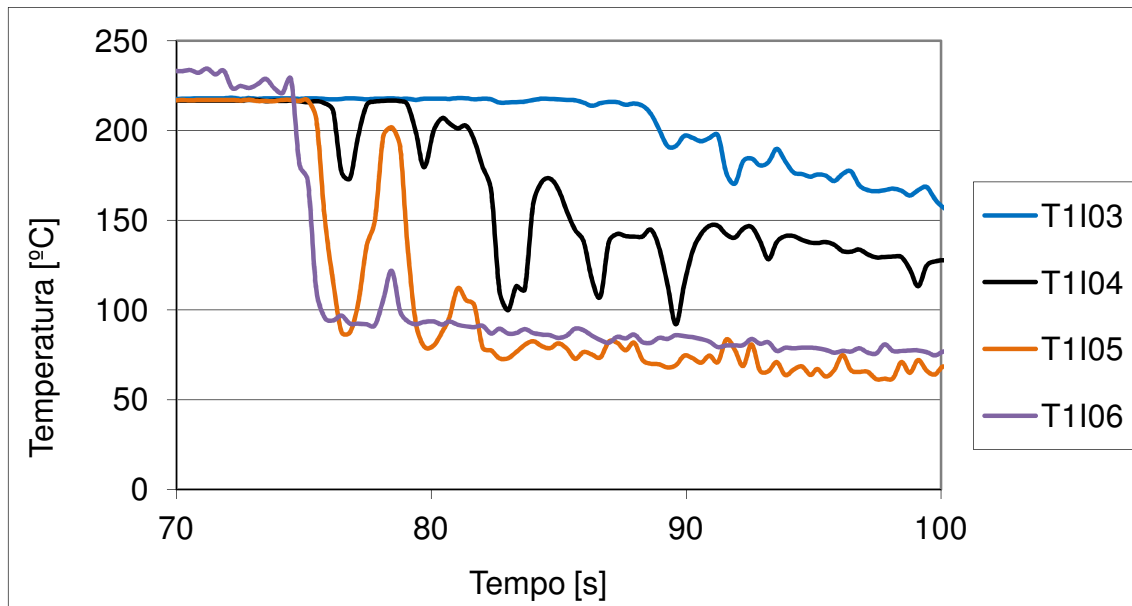


Figura 5.68 – Caracterização da oscilação da interface entre a água fria e a água quente próximo da parede na Estação de Medição 1 durante o Experimento 2159.

5.4. Gradientes de Temperatura

5.4.1. Gradientes de temperatura obtidos experimentalmente

A primeira consequência da estratificação térmica é a ocorrência de gradientes térmicos acentuados na região da interface entre a água fria e a água quente. Assim, esse foi o parâmetro básico utilizado para a caracterização da ocorrência do escoamento termicamente estratificado. A Figura 5.69 apresenta a evolução da diferença de temperatura entre termopares vizinhos, na sonda vertical da Estação de Medição 1, durante o Experimento 2159. O gradiente máximo de

temperatura medido ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1 ocorreu no instante 76 s, quando a diferença entre as temperaturas medidas pelos termopares T1S04 e T1S05 atingiu 118 °C. Como a distância entre esses dois termopares é de 10,1 mm, o gradiente vertical de temperatura no fluido chegou a pelo menos 11,7 °C/mm. A Figura 5.70 mostra a distribuição de temperatura medida ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1, no instante 76 s.

Entre os termopares T1S01 e T1S02, a máxima diferença de temperatura ocorreu no instante 284 s, chegando a 108°C, como pode ser visto na Fig. 5.69. Como a distância entre esses dois termopares é de 15,3 mm, o gradiente vertical de temperatura entre os mesmos chegou a pelo menos 7,1 °C/mm. Este valor é inferior ao obtido entre os termopares T1S04 e T1S05, mas a diferença entre as temperaturas dos dois termopares consecutivos permaneceu acima de 80 °C por aproximadamente 264 s, diferentemente do caso anterior, quando o tempo de permanência da diferença de temperatura acima de 80 °C não passou de 5 s.

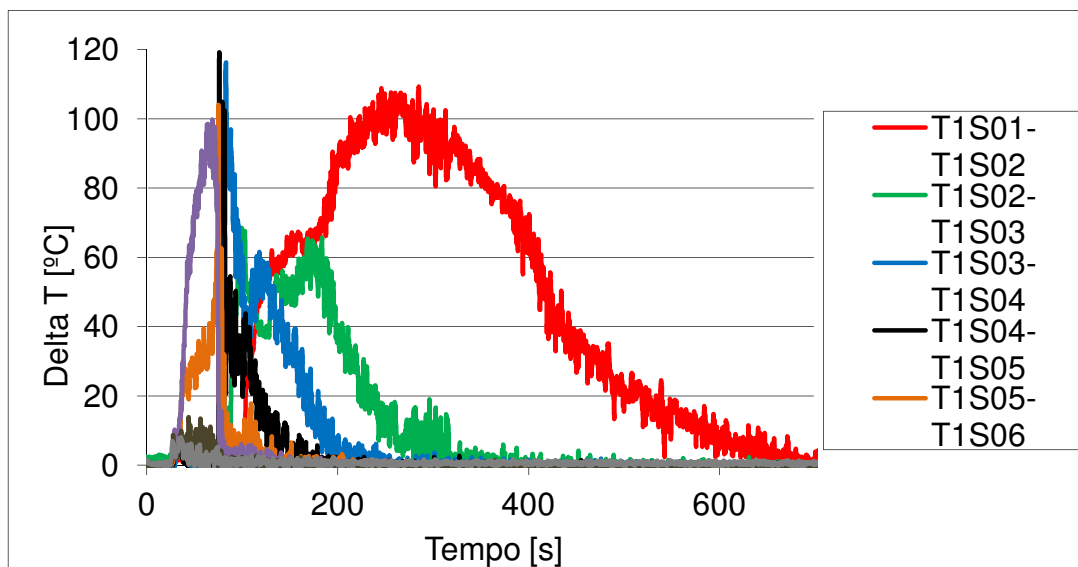


Figura 5.69 - Evolução da diferença de temperatura entre termopares vizinhos, na sonda vertical da Estação de Medição 1, durante o Experimento 2159.

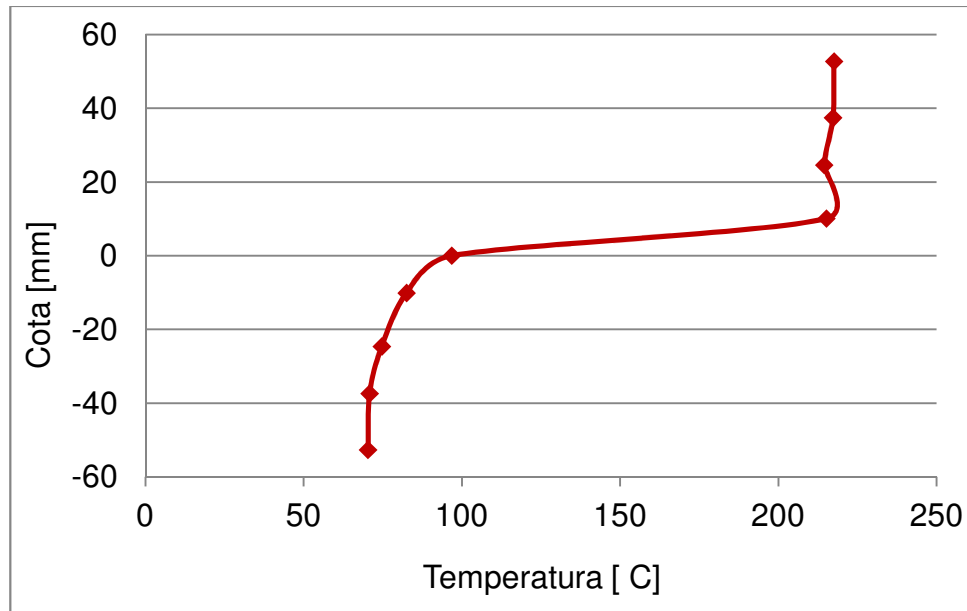


Figura 5.70 - Distribuição de temperatura medida ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1, no instante 76 s.

5.4.2. Gradientes de temperatura em função do número de Froude

Estudos semelhantes foram feitos para todos os experimentos realizados e, em seguida, buscou-se obter uma relação entre o gradiente máximo obtido em cada experimento e o Número de Froude. A Figura 5.71 apresenta, em forma de gráfico, os gradientes máximos de temperatura obtidos nas sondas verticais de cada uma das três estações de medição, em função do número de Froude, para os testes realizados à pressão de 21 bar. A Figura 5.72 apresenta o mesmo para os testes realizados à pressão de 10,5 bar. A seguir, as Fig. 5.73 a 5.75 comparam os resultados obtidos a 21 bar com aqueles obtidos a 10,5 bar para as Estações de Medição 1, 2 e 3, respectivamente.

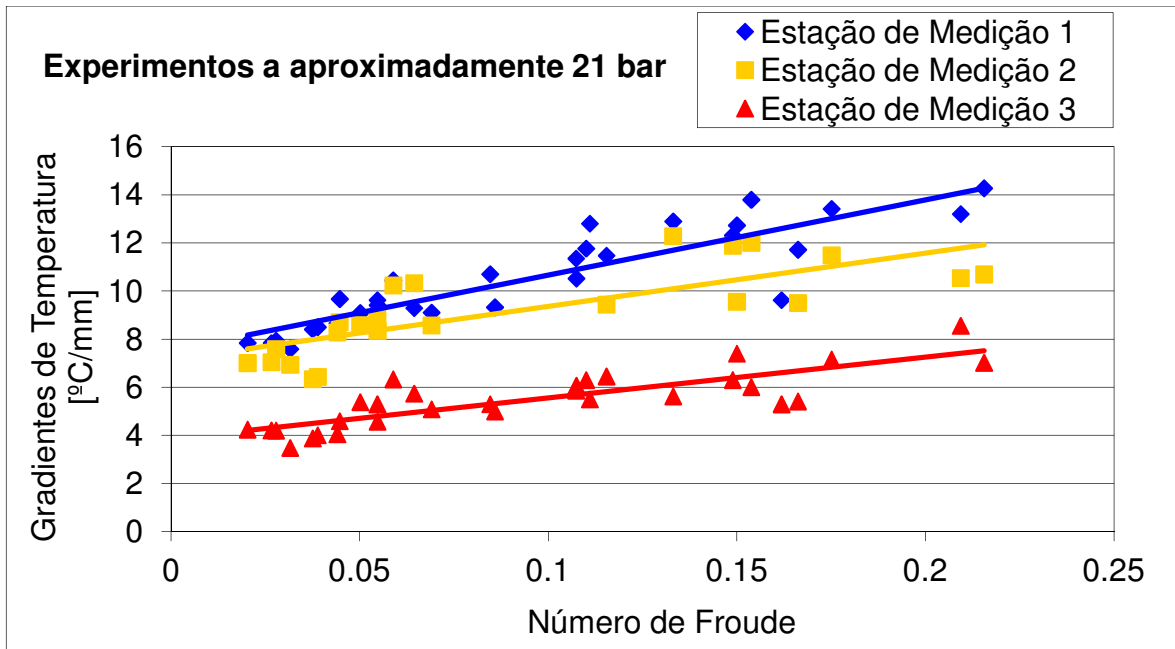


Figura 5.71 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais das estações de medição, em função do número de Froude, para os testes à pressão de 21 bar.

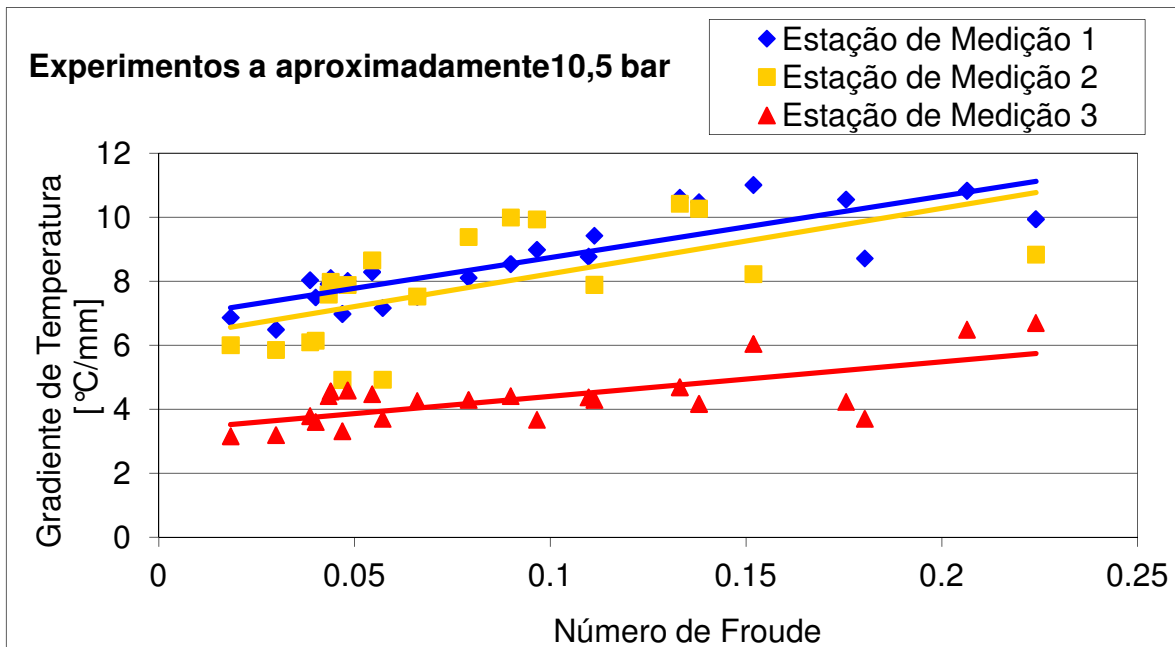


Figura 5.72 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais das estações de medição, em função do número de Froude, para os testes à pressão de 10,5 bar.

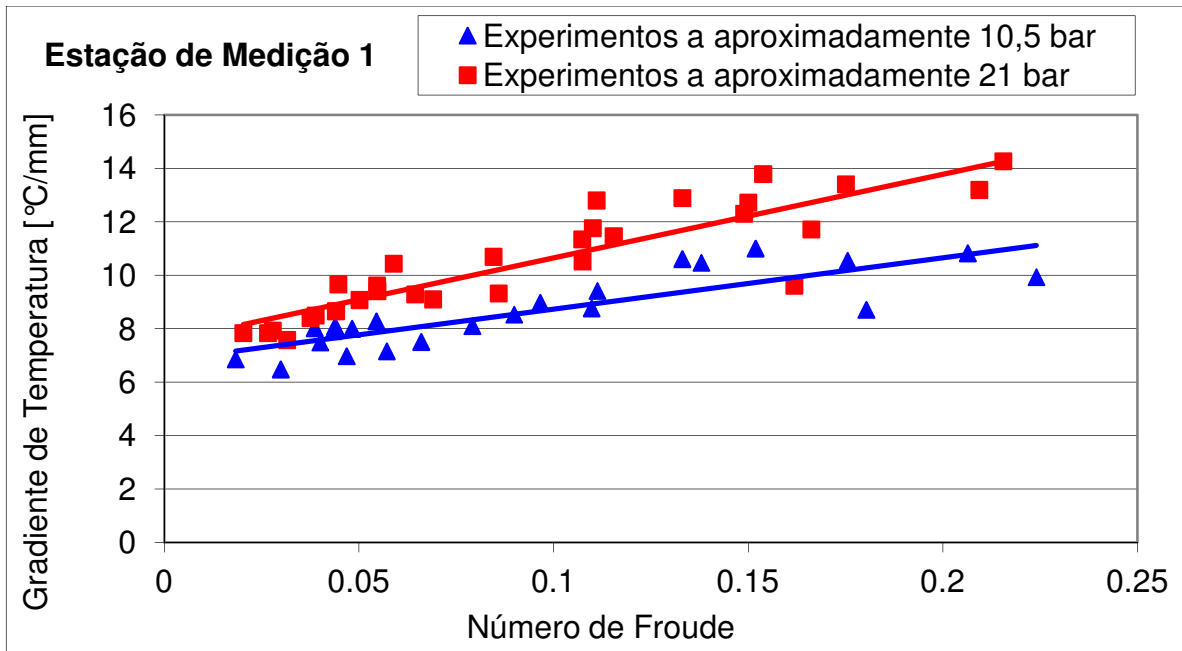


Figura 5.73 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 1, em função do número de Froude.

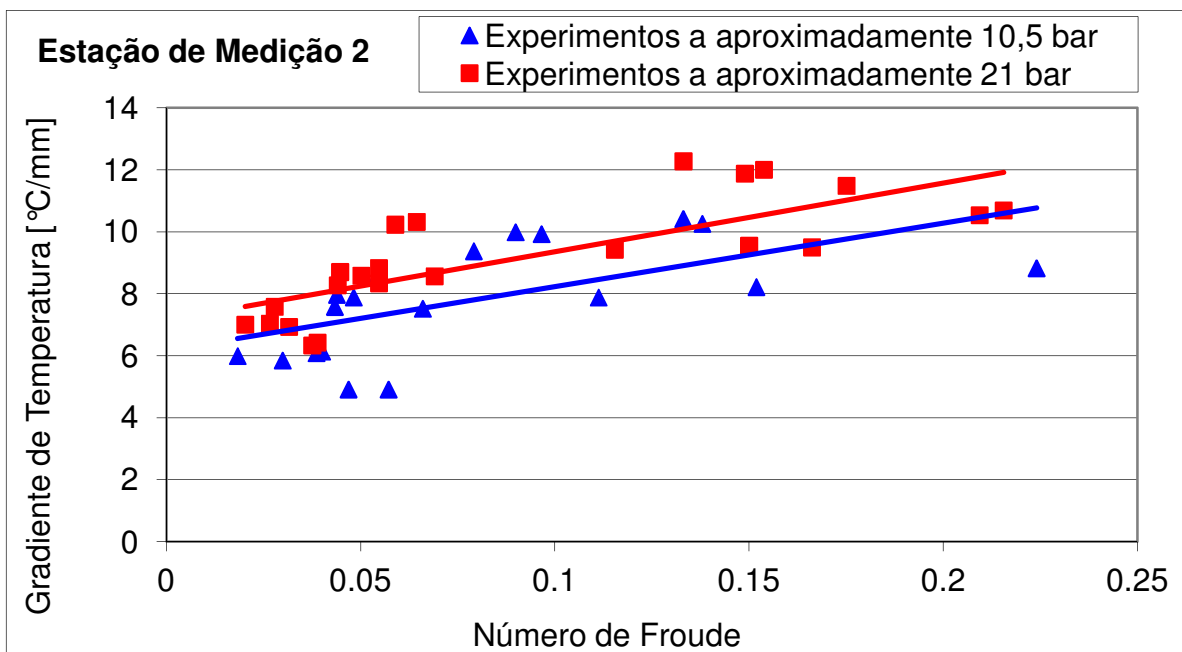


Figura 5.74 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 2, em função do número de Froude.

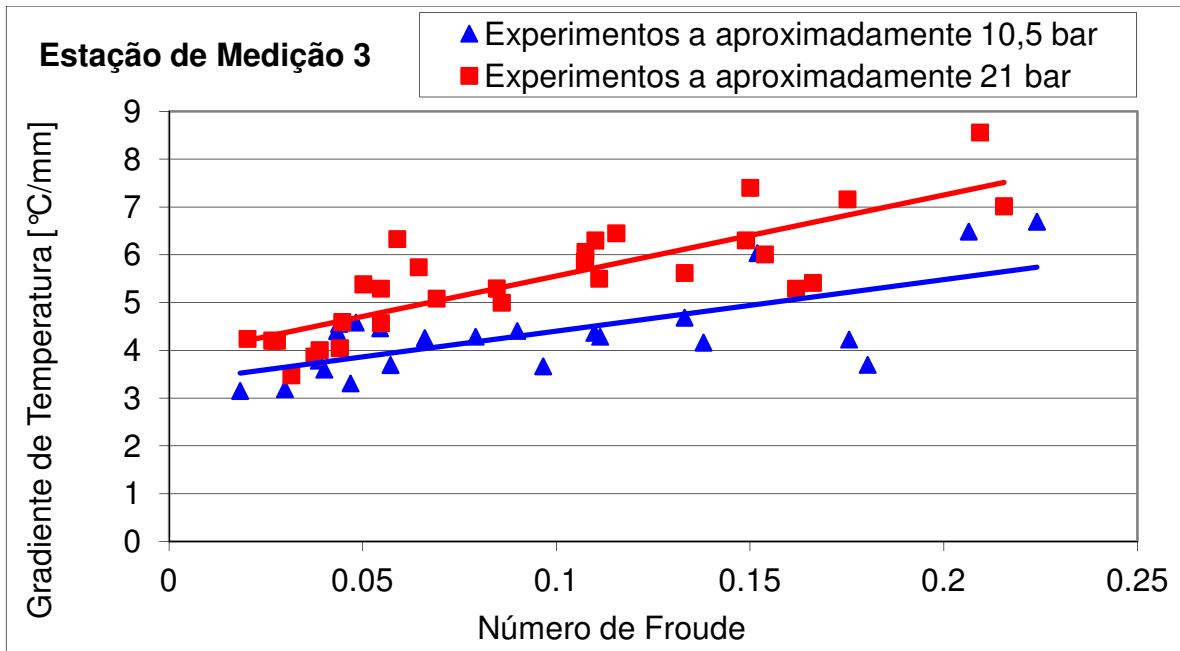


Figura 5.75 - Gradientes máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 3, em função do número de Froude.

5.4.3. Gradientes adimensionais de temperatura

Os mesmos resultados apresentados nas Fig. 5.73 a 5.75 com os gradientes máximos de temperatura medidos nas sondas verticais de cada uma das três estações de medição, em função do número de Froude, são apresentados aqui de forma adimensional. Os gradientes adimensionais foram obtidos dividindo-se a temperatura adimensional pela distância adimensional entre dois termopares consecutivos. A temperatura adimensional é dada por:

$$\theta = \frac{\Delta t}{\Delta t_0} = \frac{t - t_f}{t_q - t_f} \quad (8)$$

Onde,

θ é a temperatura adimensional;

t_q é a temperatura da água quente; e,

t_f é a temperatura da água fria.

A distância adimensional entre dois termopares consecutivos é dada por:

$$L = \frac{l}{D} \quad (9)$$

Onde:

L é a distância adimensional entre dois termopares consecutivos;

l é a distância entre dois termopares consecutivos; e,

D é o diâmetro interno do tubo simulador do bocal de injeção.

As Figuras 5.76 a 5.78 comparam a relação entre os gradientes adimensionais máximos de temperatura obtidos no diâmetro vertical e o número de Froude para os testes a 10,5 bar com a mesma relação obtida para os testes a 21 bar, respectivamente, para as Estações de Medição 1, 2 e 3. Pode-se observar que as relações obtidas em cada estação de medição são bastante semelhantes para os testes a 10,5 bar e os testes a 21 bar. As diferenças observadas estão dentro das incertezas dos resultados.

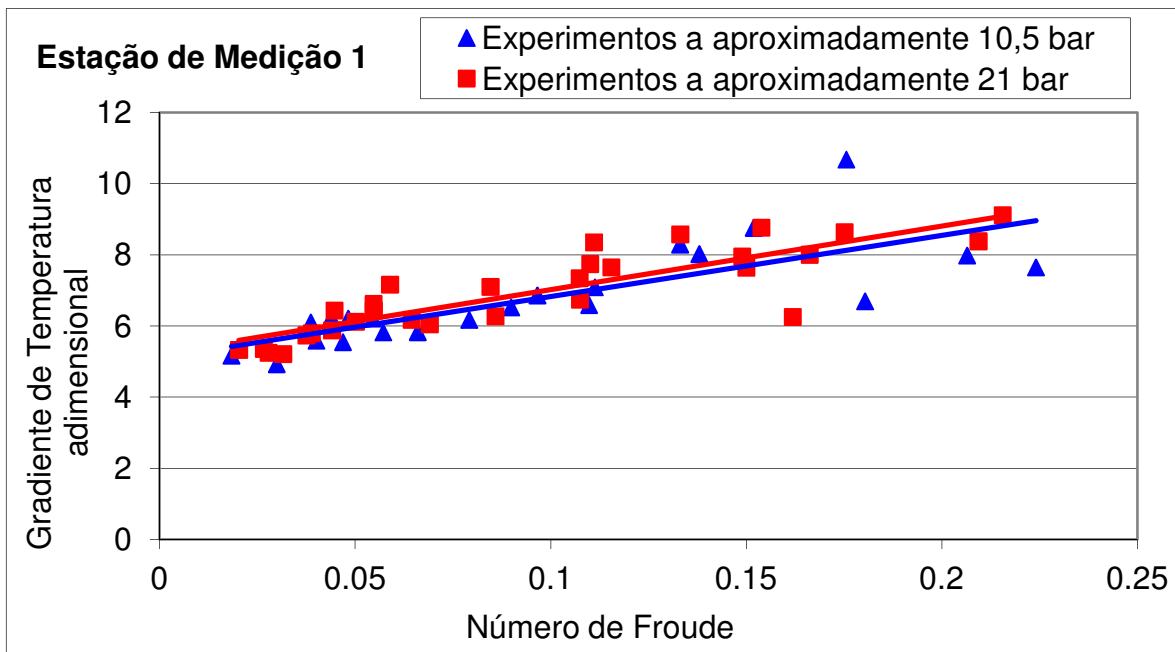


Figura 5.76 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 1, em função do número de Froude.

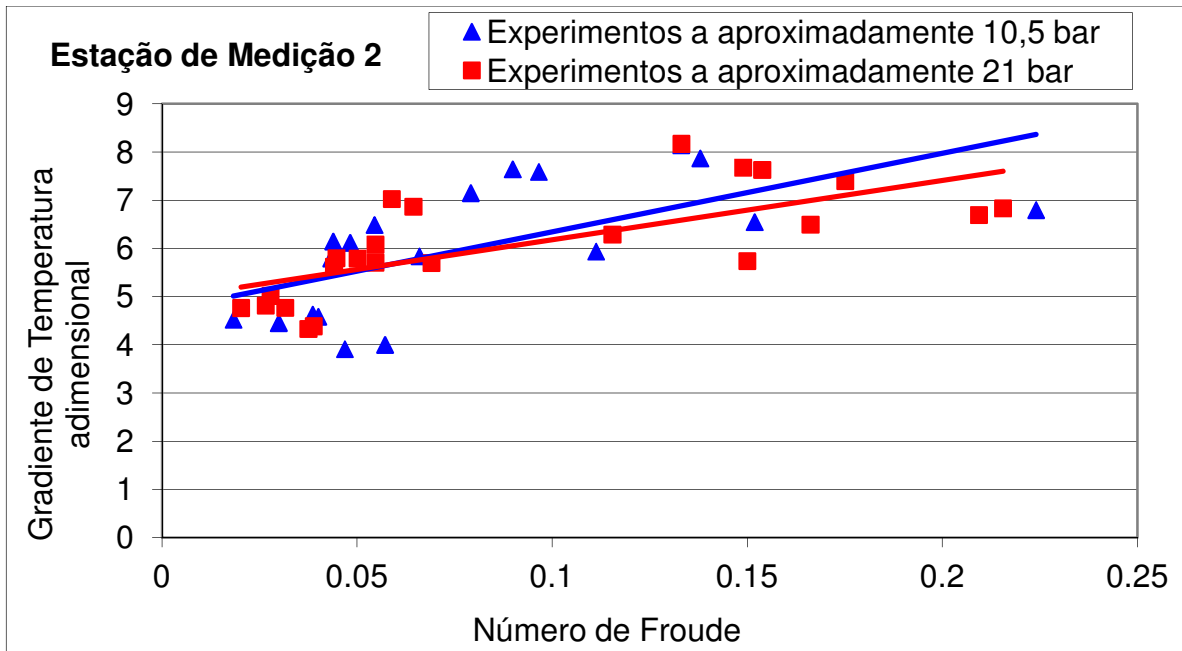


Figura 5.77 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 2, em função do número de Froude.

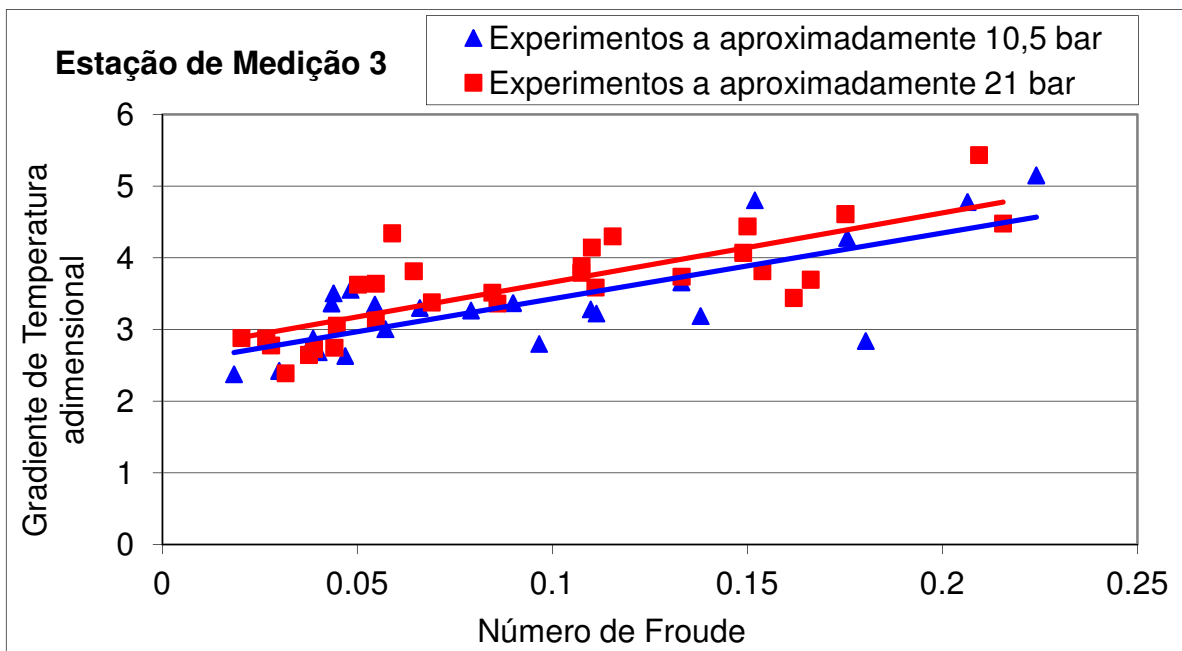


Figura 5.78 – Gradientes adimensionais máximos de temperatura nas sondas verticais da Estação de Medição 3, em função do número de Froude.

6. RESULTADOS NUMÉRICOS

6.1. Resultados da Simulação de Três Experimentos

A seguir são apresentados alguns resultados obtidos com a metodologia numérica, utilizando o código comercial CFX 13.0 [ANSYS, 2010], e sua comparação com resultados experimentais. Foram escolhidos três experimentos realizados, com números de Froude (Fr) bastante distintos, os quais foram modelados numericamente. A Tabela 6.1 fornece os parâmetros iniciais para os três experimentos.

Tabela 6.1 – Parâmetros iniciais dos três experimentos.

Experimento	Fr	Vazão [kg/s]	Pressão [bar]	T_{quente} [°C]	T_{fria} [°C]
2069	0,069	0,351	21,1	218,3	39,3
2146	0,146	0,758	21,1	219,2	31,7
2212	0,212	1,095	21,4	219,0	26,5

Os resultados experimentais foram sincronizados com os resultados numéricos tomando-se como referência o instante em que a frente de água fria atinge a estação de medição A (Fig. 3.4). As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram para os experimentos 2069, 2146 e 2212, respectivamente, as evoluções das temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente na posição do termopar inferior de cada uma das sondas verticais das três estações de medição localizadas no trecho horizontal do tubo simulador do bocal de injeção. Esses termopares foram identificados como T1S08 para a sonda da Estação de Medição 1, T2S08 para a sonda da Estação de Medição 2 e T3S06 para a sonda da Estação de Medição 3 (ver Figs. 5.4, 5.5 e 5.6). Todos estes termopares estão posicionados na mesma cota, ou seja, $-37,4$ mm a partir do eixo central do tubo. Percebe-se que as temperaturas caem sucessivamente nas sondas 1, 2 e 3, como era de se esperar, devido ao sentido de avanço da camada de água fria.

Pode-se observar nos três gráficos que o avanço da camada de água fria na região inferior do tubo obtido numericamente foi mais rápido que o observado experimentalmente. A diferença no instante em que a água fria atinge a posição de cada termopar aumenta à medida que se afasta da posição A. No termopar T3S06 esta diferença varia de 6 s para a menor vazão (0,354 kg/s) até 1,5 s para a maior vazão (1,06 kg/s). As figuras mostram ainda que a queda de temperatura devido à chegada da frente de água fria foi mais abrupta nos resultados numéricos que nos experimentais. Esta diferença diminui com o aumento da vazão.

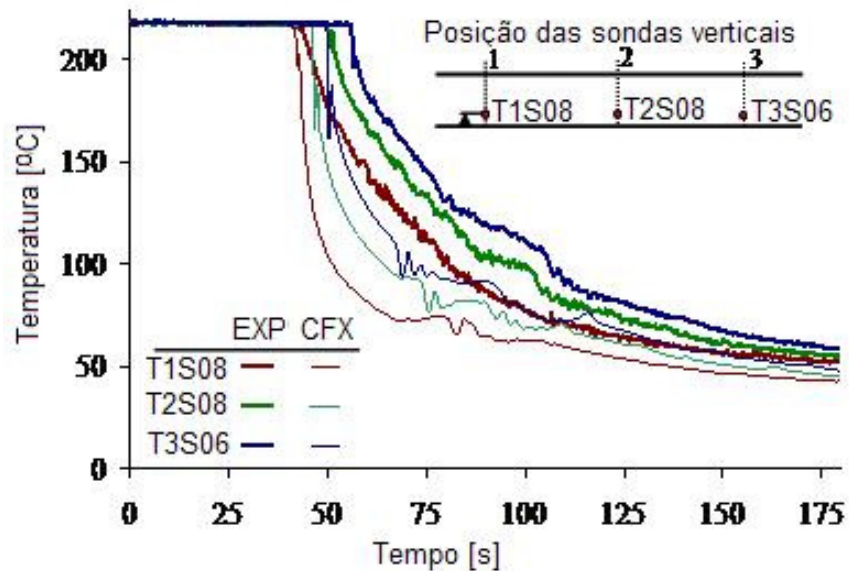


Figura 6.1 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2069 (0,354 kg/s).

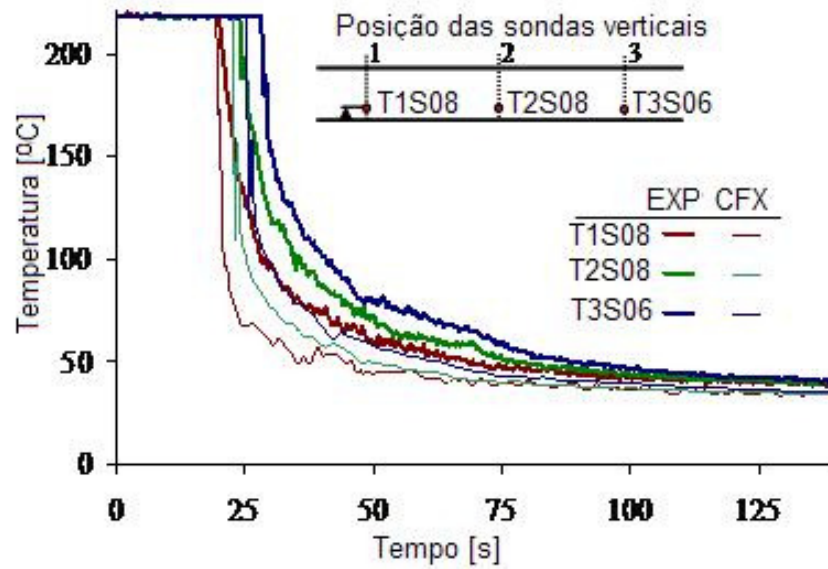


Figura 6.2 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2146 (0,758 kg/s).

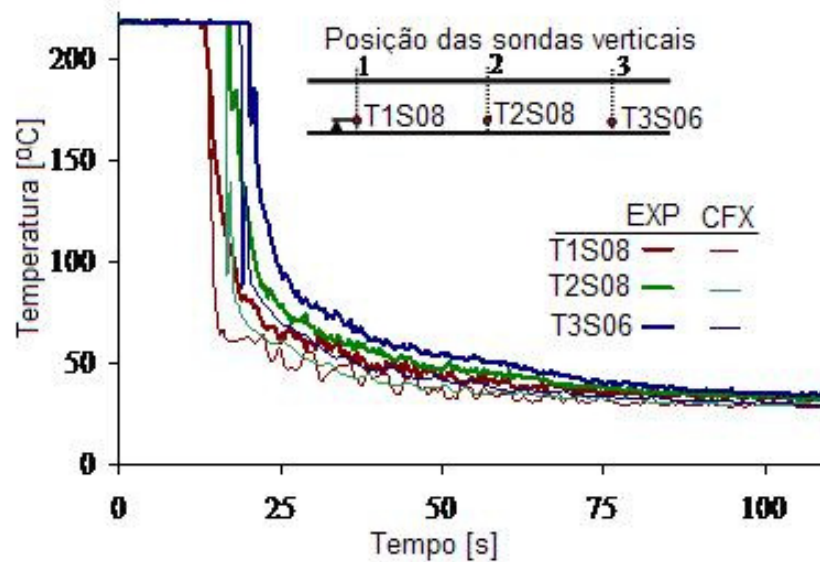


Figura 6.3 - Evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais inferiores de cada uma das três sondas verticais para o experimento 2212 (1,095 kg/s).

As Figuras 6.4, 6.5 e 6.6 mostram as evoluções das temperaturas, obtidas experimental e numericamente, na posição do termopar posicionado no centro do tubo, ou seja, na cota 0, de cada uma das sondas verticais. Esses termopares foram identificados como T1S05 para a sonda da Estação de Medição 1, T2S04 para a sonda da Estação de Medição 2 e T3S02 para a sonda da Estação de Medição 3. Pode-se observar na Fig. 6.4 que, à vazão de 0,354 kg/s o termopar da sonda 3, termopar T3S02, foi resfriado antes do termopar da sonda 2, termopar T2S04, que por sua vez foi resfriado antes do termopar da sonda 1, T1S05. Este é o sentido contrário ao do avanço da camada de água fria na região inferior do tubo. Os resultados experimentais haviam apontado resultados semelhantes e, então, a suposição inicial foi que, após a camada de água fria atingir a extremidade de saída do tubo da seção de testes, uma segunda camada de água fria estaria retornando sobre a primeira. Esta suposição foi confirmada numericamente. Já nas vazões maiores (Fig. 6.5 e 6.6), observa-se nos resultados experimentais um resfriamento inicial brusco dos termopares em sequência coerente com o sentido de avanço da camada de água fria na região inferior do tubo. Entretanto, este resfriamento inicial não permanece, e cada termopar retorna à temperatura inicial. A seguir, os termopares voltam a ser resfriados em sequência contrária ao do avanço da primeira camada de água fria. Este segundo fenômeno, coerentemente com o que foi observado para a vazão mais baixa, foi confirmado pelos resultados numéricos. Quanto ao primeiro fenômeno, não confirmado pelos resultados numéricos para esta cota, a explicação mais plausível é que a primeira camada de água fria avança como uma onda, cuja frente de avanço atinge uma cota mais alta que o restante da camada de água fria.

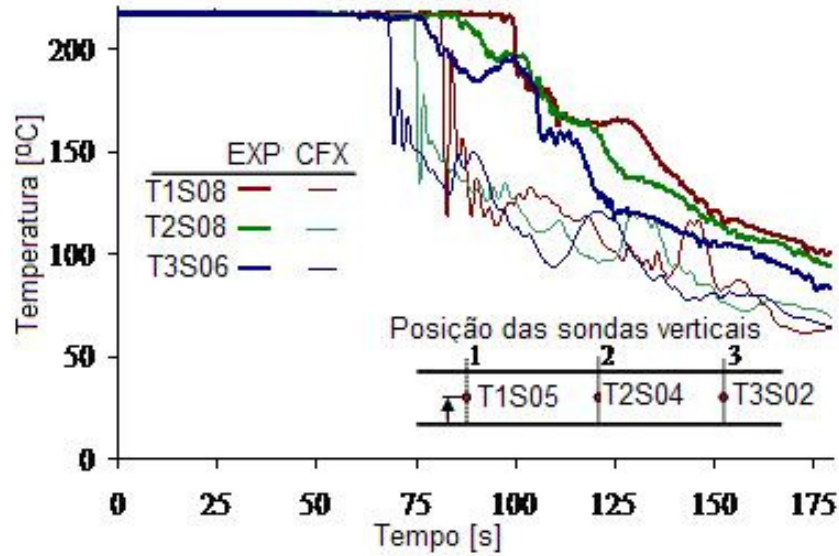


Figura 6.4 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2069 (0,354 kg/s).

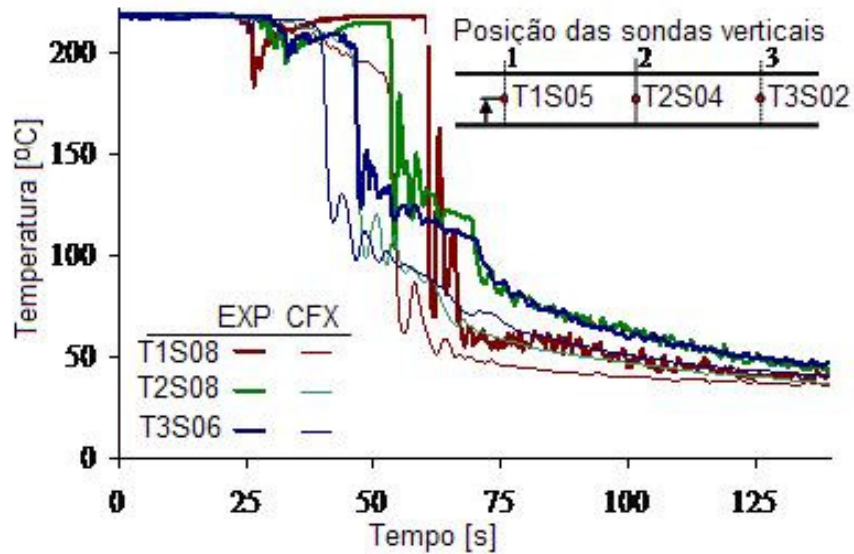


Figura 6.5 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2146 (0,758 kg/s).

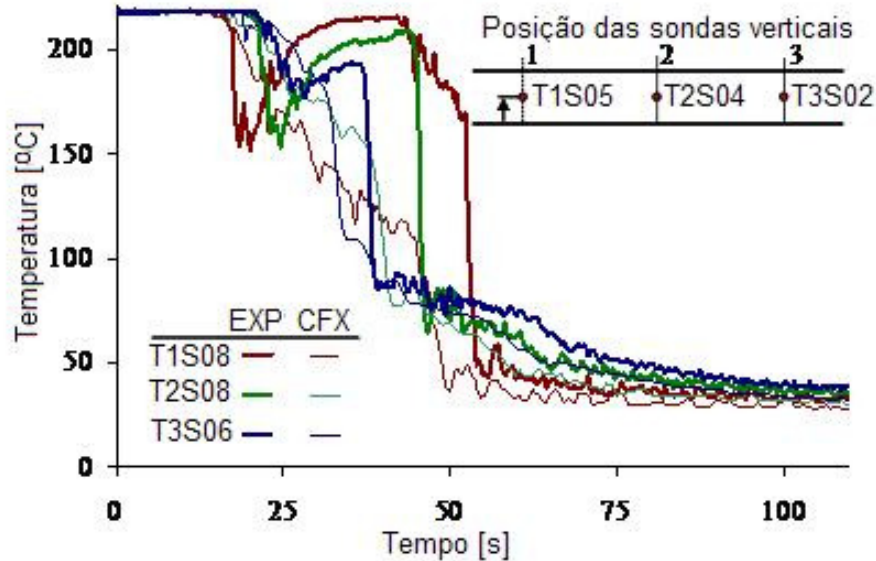


Figura 6.6 – Evolução das temperaturas nas posições dos termopares no eixo central do tubo (cota zero), em cada uma das três sondas verticais, para o experimento 2212 (1,095 kg/s).

A Figura 6.7 mostra a evolução da frente de água fria obtida numericamente para a vazão de 0,758 kg/s. Pode-se observar o aparecimento de uma segunda frente de água fria, escoando em sentido contrário sobre a primeira camada, a partir do instante em que esta atinge a extremidade de saída da seção de testes, no instante $t = 31$ s. É de se notar, mais claramente no instante $t = 26$ s, que a onda na frente de avanço da camada de água fria atinge uma cota maior que no restante da camada. É provável que, para os resultados experimentais, a cota atingida pela frente de avanço tenha sido superior à cota 0, explicando o fenômeno do resfriamento preliminar dos termopares, descrito no parágrafo anterior.

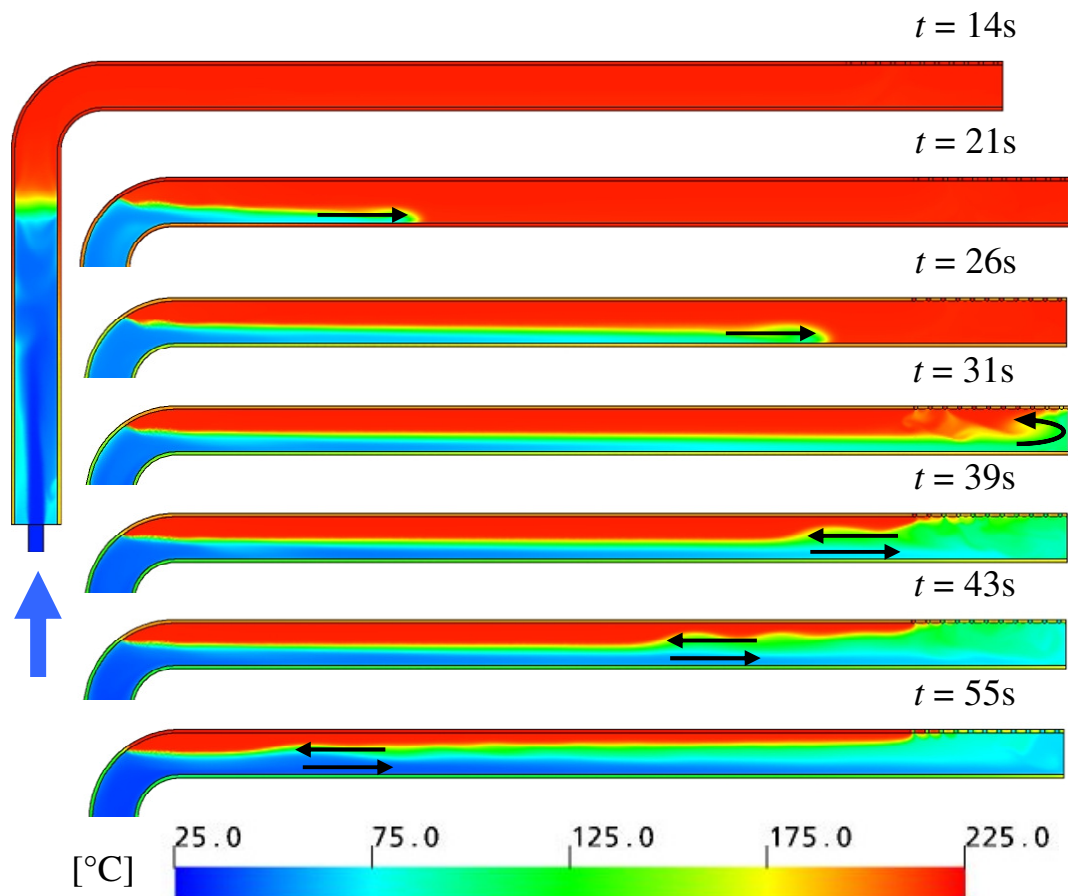


Figura 6.7 – Distribuição de temperatura em diferentes instantes durante o Experimento 2146, realizado à vazão de 0,758 kg/s.

A Figura 6.8 apresenta os perfis de velocidade u , obtidos numericamente para o Experimento 2146, ao longo do diâmetro vertical correspondente à posição da sonda da Estação de Medição 2, para diferentes instantes. A mesma figura mostra ainda vetores de velocidade, indicando as direções de escoamento, sobre o plano de simetria da seção de testes, nas vizinhanças da Estação de Medição 2, superpostos à distribuição de temperatura, para os mesmos instantes em que são apresentados os perfis de velocidade. Inicialmente, no instante 14 s, o perfil de velocidades na região superior é quase uma constante, apresentando velocidades ligeiramente menores na região inferior do tubo. Aos 23,2 s, a chegada da frente de água fria com altas velocidades, induz uma mudança na direção de escoamento no fluido quente na região superior do tubo, promovendo um escoamento termicamente estratificado em contra corrente, que pode

ser observado com clareza no instante 32 s, após a passagem da frente fria. Este escoamento estratificado em contra corrente foi igualmente observado nas simulações para as demais vazões. Quando a frente fria atinge a extremidade do tubo horizontal, o impacto contra a parede gera uma segunda camada de água fria propagando em direção contrária sobre a primeira. Aos 47 s, a segunda frente fria atinge a região da Estação de Medição 2 e podem ser observados escoamentos em várias direções na camada de fluido quente. Aos 57 s, podem ser observados vetores de velocidade na mesma direção, com módulos menores na região de altura média, região onde se observou a segunda camada de água fria.

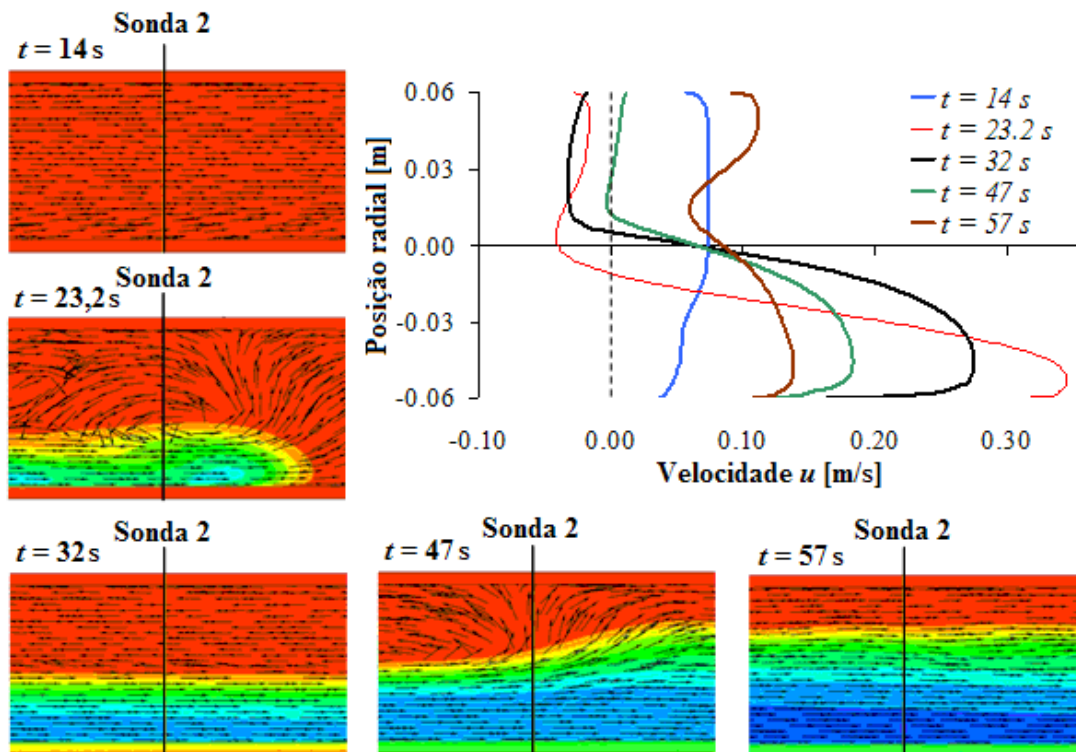


Figura 6.8 - Perfis de velocidade e vetores de visualização em diferentes instantes, para o Experimento 2146, realizado à vazão 0,758 kg/s.

A Figura 6.9 mostra detalhes das configurações de escoamento e seus efeitos sobre a temperatura, na posição do termopar T2S04, obtidos tanto na simulação experimental quanto na

numérica, para o Experimento 2146. A posição do termopar T2S04, na metade da altura na sonda vertical, aparece assinalada nos quatro desenhos com a distribuição de temperatura. A Figura 6.9 mostra, ainda, que na simulação experimental a chegada da primeira frente de água fria, aos 27 s, provoca uma breve queda de temperatura, não prevista na simulação numérica. Como já visto na Figura 6.8, aos 23,2 s, a primeira frente fria apresenta uma pequena onda de avanço, com uma altura de influência maior que no restante da camada fria, devido à resistência à mistura com o fluido quente. A simulação numérica previu a existência desta onda, porém, com uma altura menor que a obtida experimentalmente. Quando a segunda frente de molhamento atinge a posição do termopar, ela provoca uma queda brusca de temperatura, que ocorreu aos 53,2 s no experimento, mas que foi prevista numericamente aos 46 s. Após a passagem da segunda frente fria, a instabilidade na altura da interface entre as camadas de água quente e fria, provoca oscilações de temperatura, conhecidas como “thermal striping”, que foram observadas tanto na simulação experimental quanto na numérica. A diferença de amplitude entre o “thermal striping” experimental e o numérico deve-se à diferença obtida entre as alturas das interfaces, que na simulação experimental colocou a posição do termopar bem mais no centro da região de oscilação.

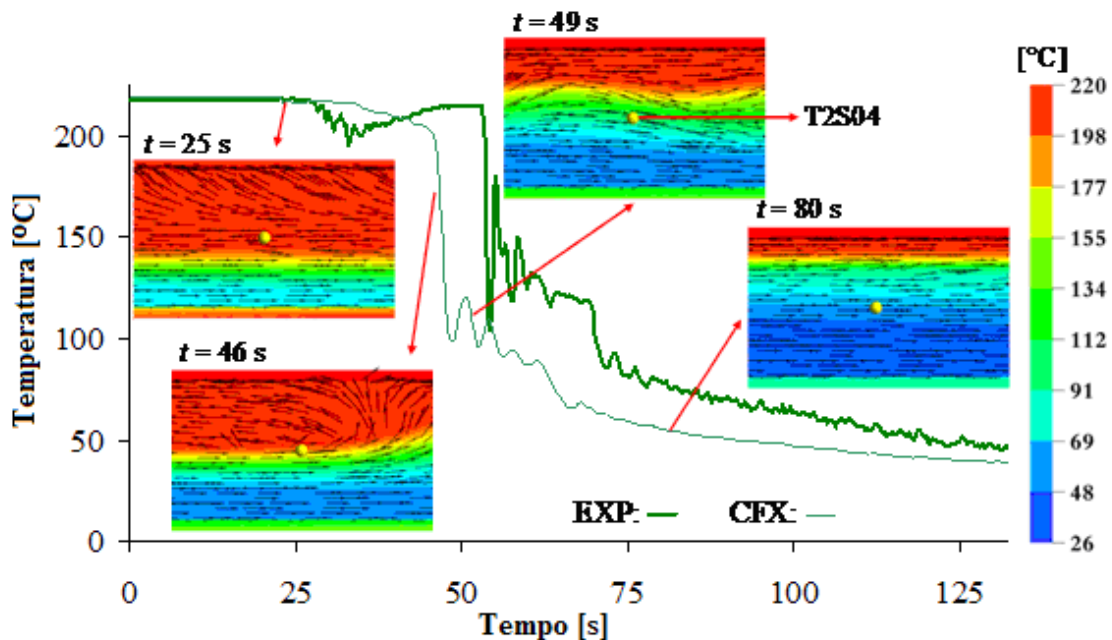


Figura 6.9 - Perfis de velocidade e temperatura para diferentes instantes, para o Experimento 2146, realizado à vazão de 0,758 kg/s.

As Figuras 6.10 e 6.11 mostram a evolução das temperaturas nas posições dos termopares mais altos (cota + 24,6 mm) das sondas das estações de medição 1 e 2, identificados como T1S03 na sonda da Estação de Medição 1 e T2S02 na sonda da Estação de Medição 2. A sonda da Estação de Medição 3 não possui termopar nesta cota. Apenas são apresentados resultados para os experimentos 2069 e 2146, porque os termopares T1S03 e T2S02 falharam durante o experimento 2212. Em ambos os experimentos a chegada da frente de água fria às posições dos termopares ocorre mais cedo nas simulações numéricas que nas experimentais.

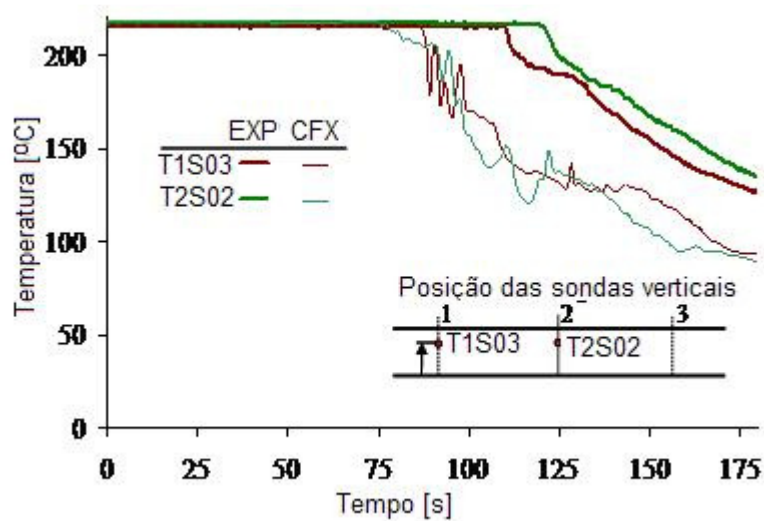


Figura 6.10 – Evolução das temperaturas nas posições superiores das sondas verticais das Estações de Medição 1 e 2, para o experimento 2069 (0,354 kg/s).

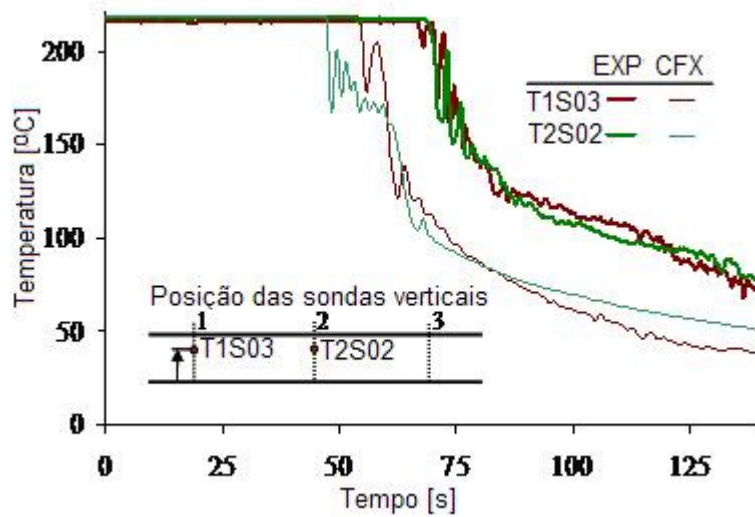


Figura 6.11 – Evolução das temperaturas nas posições superiores das Estações de Medição 1 e 2, para o experimento 2146 (0,758 kg/s).

A Figura 6.12 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1. A posição $R = 0$ é o centro seção transversal do tubo. Os dados foram obtidos para o instante 80 s para a vazão de 0,354 kg/s, 50 s para a vazão de 0,758 kg/s e 40 s para a vazão de 1,06 kg/s. Os altos gradientes de temperatura observados caracterizam a ocorrência de estratificação térmica nos três níveis de vazão.

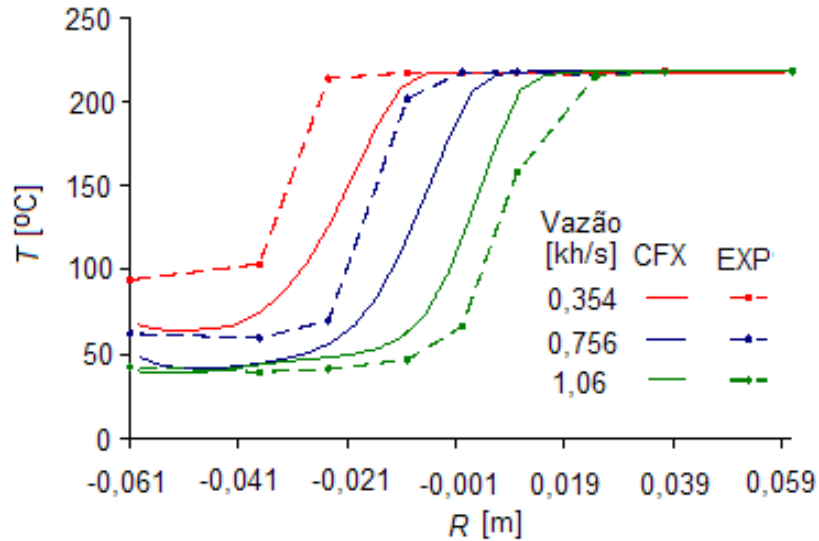


Figura 6.12 – Distribuição de temperatura ao longo do diâmetro vertical da Estação de Medição 1.

A Figura 6.13 mostra a evolução das temperaturas nas posições de três termopares posicionados na metade da altura da Estação de Medição 2: o termopar T2S04 foi posicionado no centro do tubo, na sonda vertical; O termopar T2I15 foi posicionado a 3 mm da parede interna do tubo; e, o termopar T2E11 foi brasado na superfície externa do tubo. Tanto na simulação experimental quanto na numérica, as diferenças entre as temperaturas nas posições dos termopares T2S04 e T2I15 foram bastante pequenas, enquanto a diferença de temperatura entre estes e a superfície externa do tubo, na posição do termopar T2E11, atingiu valores superiores a 70°C.

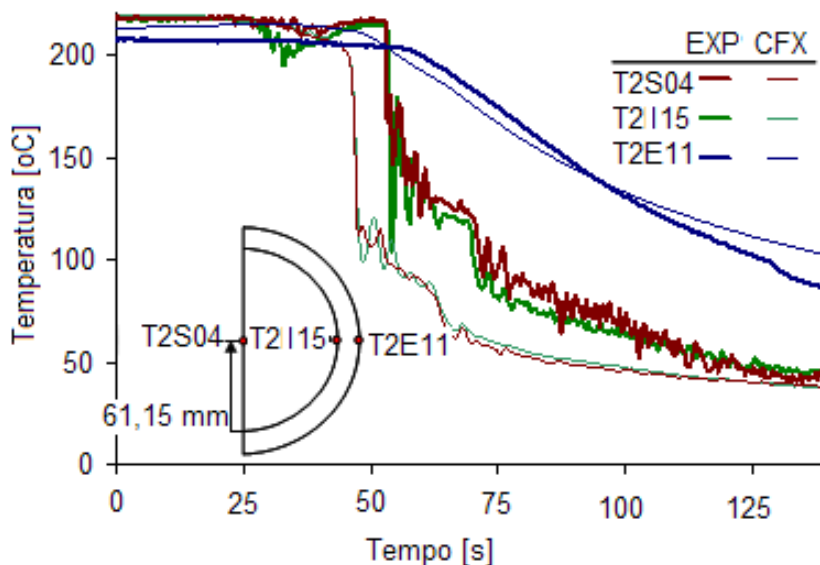


Figura 6.13 – Evolução das temperaturas na cota 0 da Estação de Medição 2, para o experimento 2146 (vazão de 0,758 kg/s).

6.2. A Condição de Mistura

A matriz de testes proposta, apresentada na Tabela 3.2, previa a realização de experimentos com números de Froude variando de 0,02 a 0,24. Supunha-se que com números de Froude próximos a 0,2 seria atingida a condição de mistura, quando a estratificação térmica deixaria de acontecer. Entretanto, como essa condição não foi alcançada, foram realizados experimentos com número de Froude acima desse valor. Somente dois desses novos experimentos tiveram resultados satisfatórios: o experimento 1345, com número de Froude de 0,345 e vazão de 1,540 kg/s, e o experimento 1436, com número de Froude de 0,436 e vazão de 1,904 kg/s. Em ambos os experimentos, a estratificação térmica ainda apresentou-se bem caracterizada. Razões técnicas inviabilizaram a realização de novos experimentos. Assim, tentou-se chegar numericamente à condição de mistura.

Tabela 6.2 – Parâmetros iniciais para as novas simulações numéricas.

Experimento	Fr	Vazão [kg/s]	Passo de tempo [s]	Transiente total [s]
2146	0,146	0,758	0,1	140
2212	0,212	1,095	0,08	112
1436	0,436	1,88	0,048	50
-	0,65	2,8	0,031	35
-	0,88	3,8	0,023	20

A Figura 6.14 apresenta o avanço da frente fria para as diferentes vazões. Do seu lado esquerdo, a figura mostra a distribuição de temperatura em cada um dos experimentos, no instante em que a frente fria se aproxima da Estação de Medição 1, e, do seu lado direito, a figura mostra a distribuição de temperatura no instante em que a frente fria se aproxima da extremidade do tubo. Pode-se observar que, enquanto para as baixas vazões, uma camada de água fria quase horizontal avança pelo tubo, para as vazões maiores, a interface entre a água quente e a água fria assume um perfil inclinado, em forma de cunha, que avança rapidamente. O perfil horizontal da interface caracteriza a estratificação térmica e, como já visto anteriormente na Fig. 6.7, para baixas vazões de água fria, essa interface horizontal avança lentamente, submetendo a parede do tubo a diferentes graus de expansão nas suas regiões superiores e inferiores, durante um período de tempo relativamente longo. Por outro lado, para as vazões maiores a frente fria de perfil inclinado, também, resfria a região superior do tubo e a água fria tende a preencher todo o interior do tubo em um curto período de tempo. Esse intervalo de tempo é suficientemente pequeno para que a parede do tubo mantenha-se aquecida em toda a sua seção, a temperaturas relativamente homogêneas. Essa condição pode ser observada na Fig. 6.15, que mostra a distribuição de temperatura na seção transversal do tubo na Estação de Medição 2, em instantes selecionados para cada uma das diferentes vazões.

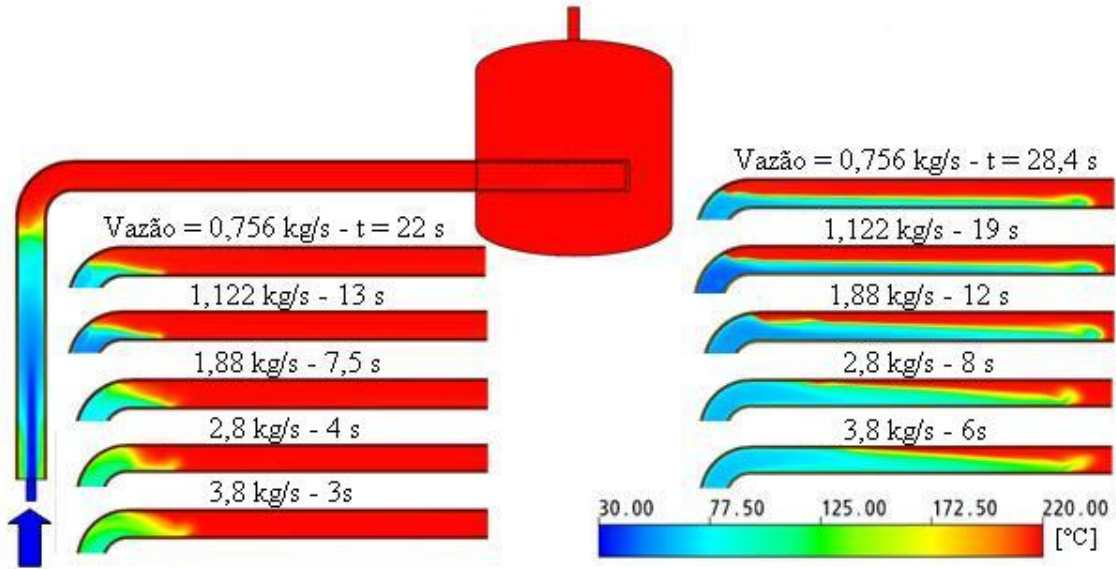


Figura 6.14 - Distribuição de temperatura em instantes escolhidos de cada experimento.

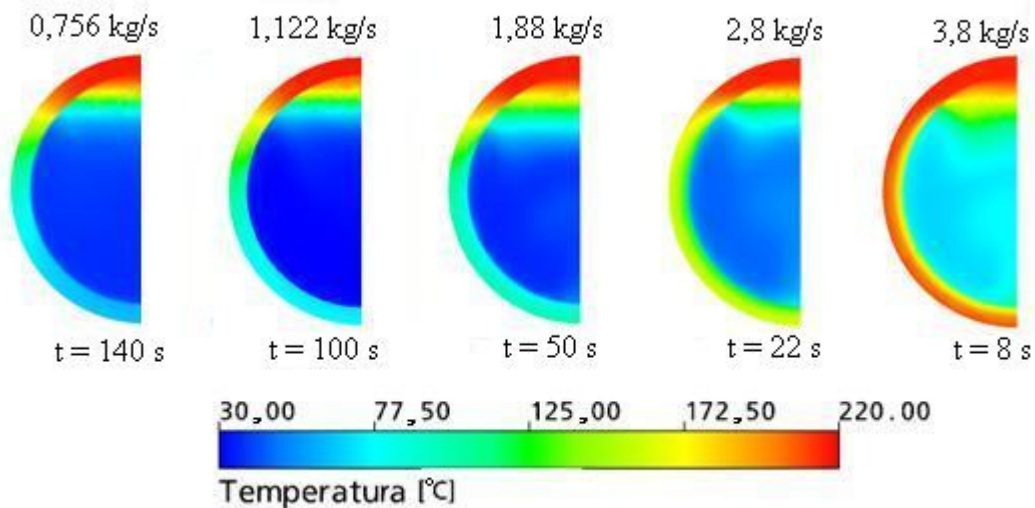


Figura 6.15 - Distribuição de temperatura na seção transversal do tubo na Estação de Medição 2 para as diferentes vazões.

A temperatura média da região superior do tubo foi considerada como a média entre as temperaturas nas posições dos termopares T1E01 e T2E01, os termopares de parede mais altos posicionados das Estações de Medição 1 e 2, respectivamente. De maneira semelhante, a

temperatura média da região inferior do tubo foi considerada como a média entre as temperaturas nas posições dos termopares T1E10 e T2E11, os termopares de parede inferiores das Estações de Medição 1 e 2, respectivamente. A diferença entre essas duas temperaturas médias foi tratada na Fig. 6.16 como a diferença de temperatura média entre as regiões superiores e inferiores do tubo (DT). A figura mostra a evolução dessa diferença de temperatura durante os processos de simulação numérica e experimental da estratificação térmica. Pode-se observar que as diferenças de temperatura na parede (DT) atingem cerca de 35 °C, no instante 30 s, para a vazão de 2,8 kg/s, e cerca de 8 °C, no instante 11 s, para a vazão de 3,8 kg/s. Estas diferenças de temperatura na parede não resultam em diferenças expressivas de expansão entre as regiões superiores e inferiores do tubo, como ocorre para as baixas vazões ($\leq 1,8$ kg/s), para as quais estas diferenças de temperatura chegam a atingir 135 °C.

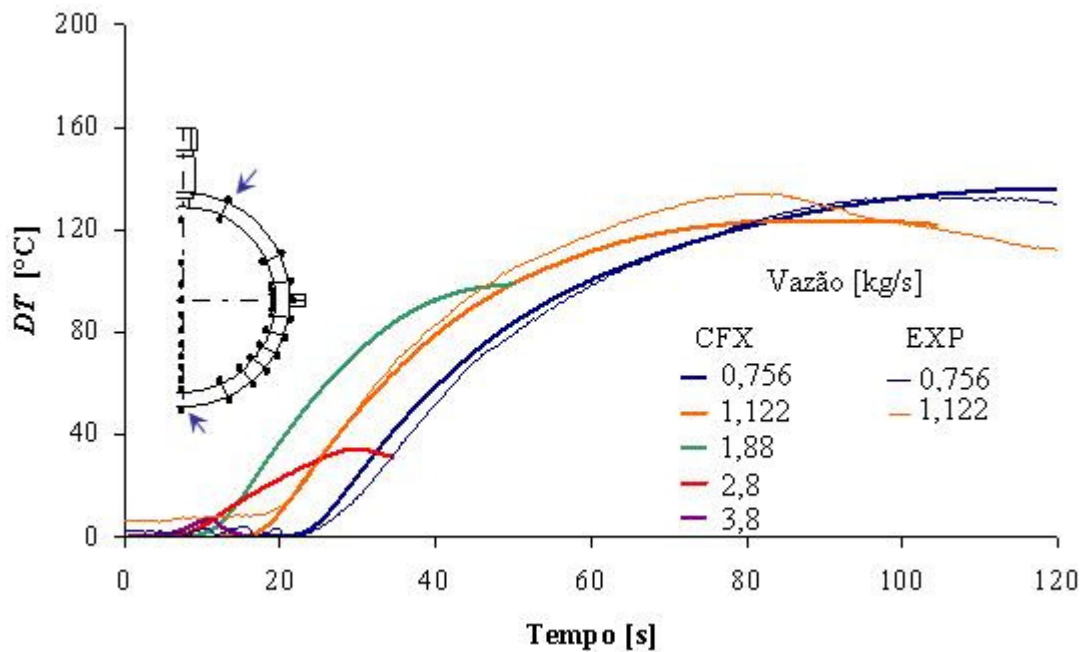


Figura 6.16 - Evolução da diferença de temperatura média entre as regiões superiores e inferiores do tubo (DT), para as diversas vazões.

Conclui-se desses resultados, que nas simulações numéricas às vazões de 2,8 kg/s e 3,8 kg/s não mais ocorre o fenômeno da estratificação térmica. No entanto, esse resultado, com a frente de água fria escoando em forma de cunha e preenchendo toda a seção do tubo, não caracteriza a condição de mistura procurada, que seria decorrente da turbulência na interface entre a camada de água fria e a de água quente.

7. CONCLUSÃO

O trabalho realizado consistiu na simulação experimental e numérica das configurações de escoamentos monofásicos termicamente estratificados e no estudo da influência de parâmetros característicos, tais como pressão, vazão de injeção e diferença de temperatura. A geometria simulada foi a do bocal de injeção de água no gerador de vapor de um reator a água pressurizada. A simulação experimental foi realizada preservando-se o número de Froude, número adimensional tradicionalmente utilizado em simulações de escoamentos termicamente estratificados, que se constitui numa relação entre forças de inércia e forças gravitacionais. O modelo físico para a simulação experimental do problema foi projetado de forma a permitir a realização de experimentos na faixa de número de Froude de $Fr = 0,02$ a $0,2$.

A matriz de testes planejada incluía um total de 30 experimentos, sendo doze experimentos realizados com a temperatura da água quente a $219\text{ }^{\circ}\text{C}$, nove experimentos a $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ e nove experimentos a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$. Entretanto, foram realizados experimentos em número maior que o previsto na matriz de testes original, muito embora não tenha sido possível a realização dos experimentos previstos com a temperatura da água quente a $140\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondente à pressão de saturação de $3,5$ bar manométrica, devido a deficiências do sistema de controle e alívio de pressão. A matriz de testes efetivamente realizada continha, ainda, um experimento com número de Froude de $0,345$ e outro de $0,436$. A razão disso foi a busca pela condição de mistura entre as duas camadas de fluido devido à turbulência na interface. Previa-se que nos experimentos com baixo número de Froude seriam obtidos escoamentos em camadas laminares bem definidas, com um nível de estratificação mais acentuado. Ao contrário, testes com maiores números de Froude deveriam resultar em maior mistura, devido à ocorrência de turbulência na interface entre os fluidos frio e quente. Entretanto, os resultados experimentais não atingiram o ponto de mistura, mesmo com o número de Froude de $0,436$, superior ao dobro do valor máximo previsto.

A primeira consequência da estratificação térmica é a ocorrência de gradientes térmicos acentuados na região da interface entre a camada de água fria e a camada de água quente. Assim, esse foi o parâmetro básico utilizado para a caracterização da ocorrência do escoamento termicamente estratificado. Essa condição ocorreu em todos os experimentos, sem exceção. Um dos mais graves efeitos que podem ocorrer durante o processo de estratificação térmica é a

oscilação da interface, conhecidas como “thermal striping”. Esta oscilação foi detectada na grande maioria dos experimentos. A caracterização da mesma foi entendida quando dois ou mais termopares consecutivos registraram a mesma oscilação.

Os resultados experimentais tratados de forma adimensional resultaram em retas, correlacionando o número de Froude com os maiores gradientes adimensionais de temperatura medidos, que se mostraram independentes de parâmetros como vazão, pressão e diferença entre as temperaturas da água quente e da água fria.

O modelo numérico apresentado respondeu de forma qualitativa muito coerente com os resultados experimentais. Entretanto, do ponto de vista quantitativo, ainda se necessita de melhores ajustes. O avanço da camada de água fria na região inferior do tubo obtido numericamente foi mais rápido que o observado experimentalmente. Da mesma forma, a queda de temperatura devido à chegada da frente de água fria foi mais abrupta nos resultados numéricos que nos experimentais. Esta diferença diminui com o aumento da vazão. Entretanto, os resultados numéricos confirmaram o aparecimento de uma segunda camada de água fria, que retorna sobre a primeira, após esta atingir a extremidade do tubo da seção de testes, em conformidade com os resultados experimentais. Após a passagem da segunda frente fria, a instabilidade na altura da interface entre as camadas de água quente e fria provocava oscilações de temperatura, que foram observadas tanto na simulação experimental quanto na numérica.

Após a realização do último experimento, Experimento 1345, a caldeira começou a apresentar vazamentos na tubulação, levando à acumulação de água na câmara de combustão, o que torna insegura a operação da mesma. O reparo destes vazamentos mostrou-se economicamente inviável, devido às dificuldades de acesso à posição dos mesmos. Assim, a solução considerada mais razoável será a troca da caldeira. Uma vez solucionado este problema, seria interessante uma sequência dos experimentos para que se possa obter, por exemplo, a condição de mistura turbulenta. Também, seria interessante a realização de experimentos com geometria diferente, que pudessem identificar influências de características geométricas, tais como o diâmetro do tubo. Entretanto, os principais objetivos propostos foram alcançados. E os resultados obtidos deveram contribuir para os projetos de gestão de vida útil de centrais nucleares, com sua utilização para a validação de modelos numéricos de escoamentos termicamente estratificados.

REFERÊNCIAS

- AHN, J. S.; YUNE, S. J.; Ko, Y. S.; LIM, D. J.; PARK, M. H. Numerical analysis on the turbulent natural convection in a long pipeline with thermal stratification. In: INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON ADVANCED REACTORS SAFETY, ARS'97, Orlando, Proceedings..., Washington: American Nuclear Society, 1997. v. 2., p. 967 – 974.
- ALEMBERTI, A.; CARLSSON, J.; MALAMBU, E.; ORDEN, A.; STRUWE, D.; AGOSTINI, P.; MONTI, S. European lead fast reactor – ELSY. Nuclear Engineering and Design, v. 241, p. 3470 – 3480, 2011.
- ANDRADE, D. A.; ANGELO, G.; BELCHIOR Jr., A.; ANGELO, E.; UMBERAUN, P. E.; SABUNDJIAN, G.; TORRES, W. M.; MACEDO, L. A. Thermal hydraulics special theme for CFD codes: Thermal stratification experiments. In: 2011 INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, INAC 2011, Belo Horizonte, Proceedings..., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear - ABEN, 2011.
- ALIZADEH, S. An experimental and numerical study of thermal stratification in a horizontal cylindrical solar storage tank. In: Solar Energy, v. 66, n. 6, p. 409 – 421. 1999.
- ANSYS. CFX-13 Users Manuals. Canonsburg, Pennsylvania: ANSYS, 2010.
- BAIK, J. J.; HWANG, H. S.; CHUN, H. Y. Transient, linear dynamics of a stably stratified shear flow with thermal forcing and a critical level. In: Journal of Atmospheric Sciences, v. 56, p. 483 – 499, February 1999.
- BARON, F.; GABILLARD, M.; LACROIX, C. Experimental study and three-dimensional numerical prediction of re-circulating and stratified pipe flows in PWR. In: FOURTH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NUCLEAR REACTORS THERMAL HYDRAULICS, NURETH 4, Karlsruhe. Proceedings... Vienna : International Atomic Energy Agency – IAEA, 1989, p. 1354 – 1361.
- BEJAN, A.; TIEN, C. L. Fully developed natural counterflow in a long horizontal pipe with different end temperatures. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 21, p. 701 – 708, 1978.
- BIENIUSSA, K. W.; RECK, H. Piping specific analysis of stresses due to thermal stratification. In: Nuclear Engineering and Design, v. 190, p. 239 – 249, 1999.
- BRANDENBURG, A.; HAZLCHURST, J. Evolution of highly buoyant thermals in a stratified layer. In: Astronomy & Astrophysics, v. 370, p. 1092 – 1102, 2001.
- BUSH, S. H. Failure Mechanics in Nuclear Power Plant Piping Systems. In: Transactions of the American Society of Mechanical Engineers - ASME, New York, v. 114, p. 389 – 395, November 1992.
- CHANUT, J.; BARNIER, B. Mesoscale eddies in the Labrador Sea and their contribution to convection and restratification. In: Journal of Physical Oceanography, , vol. 38, p. 1617 – 1643, 2008.

- CHASHECHKIN, Y. D.; BAYDULOV, V. G.; KISTOVICH, A. V. Basic properties of free stratified flows. In: Journal of Engineering Mathematics, v. 55, p. 313 – 338, 2006.
- CISTERNAS, M. Thermal stratification monitoring of Angra 2 steam generator main feedwater nozzles. In: 2009 INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, INAC 2009, Rio de Janeiro, Proceedings..., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear - ABEN, 2009.
- CIZELJ, L.; SIMONOVSKI, I. Fatigue relevance of stratified flows in pipes: a parametric study. Nuclear Engineering and Design, v. 241, p. 1191 – 1195, 2011.
- COLLIER, J. G.; HEWITT, G. F. Introduction to nuclear power. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1987. 232 p.
- CROUZEIX, C.; LE MOUËL, L.; PERRIER, F.; RICHON, P. Non-adiabatic boundaries and thermal stratification in a confined volume. In: International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 49, p. 1974 – 1980, 2006.
- DALRYMPLE, W. Replace the RPV. In: Nuclear Engineering International. v. 55, nº. 676, p. 5, November 2010. Editor's view comment.
- DEUTSCH, E.; BARCOUDA, M.; ROUSSET, J. L.; MALLEZ, C. Numerical and experimental study in piping system dead legs. In: EIGHTH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NUCLEAR REACTOR THERMAL-HYDRAULICS, NURETH-8.: Kyoto, PROCEEDINGS... Vienna : International Atomic Energy Agency – IAEA, 1997. v. 2, p. 782 – 790.
- DIN. Durchflussmessung mit Blenden, Düsen und Venturirohren in voll Durchströmten Rohren mit Kreisquerschnitt. Berlin: Deutsches Institut für Normung – DIN, 1982. (DIN 1952)
- DOI, Y.; MURAMATSU, T. Numerical analysis of thermal stratification phenomena in upper plenum of fast breeder reactor. In: EIGHTH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NUCLEAR REACTOR THERMAL-HYDRAULICS, NURETH-8, Kyoto, PROCEEDINGS... Vienna : International Atomic Energy Agency – IAEA, 1997, v. 3, p. 1696 – 1703.
- DONNE, M. D. The effect of a large temperature difference on the friction factor in convective laminar flow. In: Heat Transfer, Gas Cooled Reactors Today. London: BNES, 1982. p. 235 – 240.
- ENSEL, C.; COLAS, A.; BARTHEZ, M. Stress analysis of a 900 MW pressurizer surge line including stratification effects. Nuclear Engineering and Design, v. 153, p. 197 – 203, 1995.
- FAIDY, C. Status of French Fatigue Analysis Procedure. In: 2008 ASME PRESSURE VESSELS AND PIPING DIVISION CONFERENCE, PVP2008. Chicago, Proceedings... New York: American Society of Mechanical Engineers – ASME, 2008.
- FERRARI, L. D. B.; AMARAL, J. A. R.; FRANCISCO, S. Avaliação de efeitos de estratificação térmica em equipamentos de usinas nucleares. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE INTEGRIDADE E EXTENÇÃO DE VIDA DE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS. Pouso Alto, MG, Proceedings... São José dos Campos: Instituto de Estudos Avançados, p. 91 – 94, 1993.

- FIGLIOLA, R. S.; BEASLEY, D. E. Sampling concepts. IN: _____. Theory and design for mechanical measurements. Cingapura: John Wiley & Sons, 1991. p. 225 – 227.
- FISSOLO, A., FORESTIER, A., CHAPULIOT, S. Advances in thermal fatigue investigations performed in CEA for French PWR piping. In: THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON FATIGUE OF REACTORS COMPONENTS, Seville, Proceedings..., Paris: OECD Nuclear Energy Agency – NEA. 2004.
- GRIESBACH, T. J.; RICCARDELLA, P. C.; GOSSELIN, R. S. Application of fatigue monitoring to the evaluation of pressurizer surge lines. Nuclear Engineering and Design, v. 129, p. 163 – 176, 1991.
- HÄFNER, W. Thermische Schicht-Versuche im horizontalen Rohr. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1990. 238 p. (Technischer Fachbericht Nr. 92 - 89)
- HALLER, M. Y.; CRUICKSHANK, C. A.; STREICHER, W.; HARRISON, S. J.; ANDERSEN, E.; FURBO, S. Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison. Solar Energy, v. 83, p. 1847–1860, October 2009.
- HOLMAN, J. P. Experimental methods for engineers. 7th ed. McGraw-Hill: Boston.1998. 689p.
- HUNGER, H. Experimental investigation of a flawed pipe system loaded with temperature stratification and pressure. In: INTERNATIONAL & AMERICAN ASSOCIATIONS FOR STRUCTURAL MECHANICS IN REACTORS TECHNOLOGY MEETING, SMiRT 12, Stuttgart. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1993.
- IAPWS. Revised Release on the IAPWS Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam. The International Association for the Properties of Water and Steam, Lucerne, Switzerland, 2007.
- INMETRO. Guia para a expressão da incerteza de medição. 2^a Ed. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Rio de Janeiro, 1998.
- ISO. Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and venture tubes inserted in circular cross-section conduits running full. Zurich: International Organization for Standardization – ISO, 1980. (ISO 5167-1980 (E))
- KHALEEL, M. A. e SIMONEN, F. A. Effect of through-wall stress gradient on piping failures and probabilities. Nuclear Engineering and Design, v. 197, p. 89 – 106, 2000.
- KANG, M. G. Thermal mixing in a water tank during heating process. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 45, p. 4361 – 4366, 2002.
- KAMIDE, H.; IGARASHI, M.; KAWASHIMA, S.; KIMURA, N.; HAYASHI, K. Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping. Nuclear Engineering and Design, v. 239, p. 58-67, 2009.
- KEINÄNEN, H.; TALJA, H.; RINTAMAA, R. Computational methods assuring nuclear power plant structural integrity and safety: an overview of the recent activities at VTT. Nuclear Engineering and Design, v. 183, p. 41 – 51, 1998.
- KIM, J. H.; ROIDT, R. M.; DEARDORFF, A. F. Thermal stratification and reactor piping integrity. Nuclear Engineering and Design, v. 139, p. 83 – 95, 1993.

- KIM, S. N.; HWANG, S. H.; YOON, K. H. Experiments on the Thermal Stratification in the Branch of NPP. Journal of Mechanical Science and Technology (KSME Int. J.). Seoul, vol. 19, n. 5, p. 1206 – 1215, 2005.
- KOGA, T.; YAMAMOTO, K.; TAKAKUWA, M. KAJIWARA, O.; WATANABE, O.; AKAMATSU, K. Experimental study on thermal stratification in a reactor hot plenum of a Japanese demonstration LMFBR. In: EIGHTH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NUCLEAR REACTORS THERMAL HYDRAULICS, NURETH 8, Kyoto. Proceedings... Vienna: International Atomic Energy Agency – IAEA, 1997. v. 3, p. 1704 – 1711.
- KUSSMAUL, K.; ROOS, E.; DIEM, H.; KATZENMEIER, G.; KLEIN, M.; NEUBRECH, G. E.; WOLF, L. Cyclic and transient thermal loading of the HDR reactor pressure vessel with respect to crack initiation and crack propagation. Nuclear Engineering and Design, v. 124, p. 157 – 170, 1990.
- KWEON, D. H.; KIM, J. S.; LEE, K. Y. Fatigue design of nuclear class 1 piping considering thermal stratification. Nuclear Engineering and Design, v. 238, p. 1265 – 1274, 2008.
- LADEIRA, L. C. D.; NAVARRO, M. A. Brazilian test facility for thermallyhydraulic reactor safety research. In: FIFTH INTERNATIONAL TOPICAL MEETING ON NUCLEAR REACTORS THERMAL HYDRAULICS, NURETH 5, Salt Lake City. Proceedings... Vienna: International Atomic Energy Agency – IAEA, 1992. v. 6. p. 1557-1561.
- LEE, J. B. e SONG, J. H. A study on the behavior of a crack located at the striping zone in a thermally stratified pipe. Nuclear Engineering and Design, v. 143, p. 229 – 237, 1993.
- LEE, J. I.; SAHA, P. e KAZIMI, M. S. A parametric study of high cycle thermal fatigue caused by thermal striping. In: 2004 International Congress on Advances in Nuclear Power Plants, ICAPP '04, Pittsburgh. Proceedings..., Washington: American Nuclear Society, 2004. Paper 4104.
- LENZ, E.; LIEBERT, A.; WIELING, N. Thermal stratification tests to confirm the applicability of laboratory data on strain-induced corrosion cracking to component behavior. In: THIRD INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY SPECIALISTS' MEETING ON SUBCRITICAL CRACK GROWTH, Moscow. Proceedings... Vienna : INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. p. 67 - 91, 1990.
- LUBIN, B. T.; BROWN, J. Thermal stratification in lines connected to a reactor coolant system. In: ASME, ASME PVP, New York: American Society of Mechanical Engineers – ASME, 1995. v. 313-1, p. 19 – 31.
- MAYINGER, W.; DIEM, H.; ZEHLEIN, H. Untersuchungen zur thermischen Belastung des RDB: Eintrittsstützens bei Schichtströmung (E23). In: KFK, 15. Statusbericht PHDR, Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe (KFK), 1991. p. 339 - 370.
- MEROLA, M. Normative issues in thermal fatigue design of nuclear components. Nuclear Engineering Design, p. 351-361, 1995.
- MIKSCH, M.; LENZ, E.; LÖHBERG, R. Loading conditions in horizontal feedwater pipes of LWRs influenced by thermal shock and thermal stratification effects. Nuclear Engineering and Design, v. 84, p. 179 – 187, 1985.

- NEA. Thermal Cycling in LWR Components in OECD-NEA Member Countries: CSNI Integrity and Ageing Working Group, Paris: OECD Nuclear Energy Agency – NEA, 2005. (NEA/CSNI/R(2005))
- NIJEHOLT, J. A. L.; HÖHNE, T. On the application of CFD modeling for the prediction of degree of mixing in a PWR during a boron dilution transient. In: 2006 INTERNATIONAL CONGRESS ON ADVANCES IN NUCLEAR POWER PLANTS, ICAPP'06.: Reno, Proceedings..., Washington: American Nuclear Society, 2006. p. 1645-1655.
- NOURGALIEV, R. R.; DINH, T. N. The investigation of turbulence characteristics in an internally-heated unstably-stratified fluid layer, Nuclear Engineering and Design, v. 178, p. 235 – 258, 1997.
- NRC. Thermal stresses in piping connected to reactor coolant systems. Washington: Nuclear Regulatory Commission, 1988. (NRC BULLETIN No. 88 – 08)
- NRC. Pressurizer surge line thermal stratification. Washington: Nuclear Regulatory Commission. (NRC BULLETIN No. 88 – 11)
- POUSSAIN, C.; HOLCBLAT, A. Framatome antistratification device for steam generator feedwater nozzle: effectiveness, qualification test, and on-site measurements, Nuclear Technology, vol. 112, p. 108 – 121, october 1995.
- REZENDE, H. C. Projeto, montagem e comissionamento de uma instalação de testes de remolhamento. 1985. 126 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares) – Departamento de Engenharia Nuclear, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1985.
- REZENDE, H. C.; SANTOS, A. A. C.; NAVARRO, M.; JORDÃO, E. Proposal of the thermal hydraulics special theme 1 (THSP1): Simulation of a thermal stratification experiment using CFD Codes. In: 2011 INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE, INAC 2011, Belo Horizonte, Proceedings..., Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Energia Nuclear - ABEN, 2011.
- ROHDE, U.; HÖHNE, T.; KLIEM, S.; HEMSTRÖM, B.; SCHEUERER, M.; TOPPILA, T.; ASZODI, A.; BOROS, I.; FARKAS, I.; MÜHLBAUER, P.; VYSKOCIL, L.; KLEPAC, J.; REMIS, J.; DURY, T. Fluid mixing and flow distribution in a primary circuit of a nuclear pressurized water reactor: Validation of CFD codes. Nuclear Engineering and Design. V. 237, p. 1639–1655, 2007.
- SHIGEO, K.; BEJAN, A. Experimental study of natural convection in a horizontal cylinder with different end temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 23, p. 1117-1126, 1980.
- SHIRALKAR, G.; GADGIL, A.; TIEN, C. L. High Rayleigh number convection in shallow enclosures with different end temperatures. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 24, p. 1621 – 1629. 1981.
- SILVA, L. L. Análise experimental e numérica em tubulações submetidas ao fenômeno de estratificação térmica. 2009, 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

- SONNENBURG, H. G. Computacional fluid mechanics in thermal stratified flows. Munich, Oct. 1997. 86 p. (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit - GRS mbH, Forschungsgelände, 85748 Garching n Munich - Germany)
- SUN, J. G.; SHEN, Y. H.; SHA, W. T. Analysis of flow stratification in the surge line of the comanche peak reactor. Argonne : Argonne National Laboratory, 1991. (NUREG/CR – 5456, ANL – 91/6)
- SVIRKUNOV, P. N. The conditions for the symmetric instability of vortex motions of an ideal stratified liquid. J. Appl. Maths. Mechs, v. 62, n. 6, p. 921 – 925. 1998.
- TALJA, A. Stresses in a horizontal pipe line due to thermal stratification. Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe, 141 p., 1988. (Technischer Fachbericht Nr. 81 / 88)
- TAKEHIRO, S.; LISTER, J. R. Penetration of columnar convection into an outer stably stratified layer in rapidly rotating spherical fluid shells. Ears and Planetary Science Letters, v. 187, p. 357 – 366, 2001.
- TAVAKOLI, A.; TSKHAKAYA, D. D.; TSINTSADZE, N. L. Rayleigh-Taylor instability in the presence of density transition layer. Physics Letters A, v. 256, p. 212 – 216, May 1999.
- TOKUHIRO, A.; KIMURA, N. An experimental investigation on thermal striping. Mixing phenomena of a vertical non-buoyant jet with two adjacent buoyant jets as measured by ultrasound Doppler velocimetry. Nuclear Engineering and Design, v. 188, p. 49 – 73, 1999.
- UHLMANN, D.; DIEM, H.; HUNGER, H. Untersuchung zum zyklischen Rißwachstum eines Umfangsrisse in einem geraden Rohrabschnitt DN 425 bei langsam wechselnder Biegelast und periodisch wiederholter thermischer Schichtung. In: KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSHUE. PHDR Statusbericht Karlsruhe: Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1991. V. 04, p. 371 – 408.
- WESTIN, J.; HENRIKSSON, M.; PÄTTIKANGAS, T.; TOPPILA, T.; RÄMÄ, T.; KUDINOV, P.; ANGLART, H. Stratification issues in the primary system: Review of available validation experiments and State-of-the-Art in modeling capabilities (StratRev). Roskilde: Nordisk Kernesikkerhedsforskning – NKS (Nordic Nuclear Safety Research), 2009. 73 p.
- WOLF, L.; HÄFNER, W.; GEISS, M.; HANSJOSTEN, E.; KATZENMEIER, G. Results of HDR-experiments for pipe loads under thermally stratified flow conditions. Nuclear Engineering and Design, v. 137, p. 387 – 404, 1992.
- WOLF, L. ; HÄFNER, W.; SPENKE, H. Fluidodynamik und thermohydraulische Abläufe in Rohrsystemen bei geschichteten ein- und zweiphasigen Strömungen; Ergebnisse von Experimenten und Berechnungen. Frankfurt am Main: Battelle-Europe, 1991. 54 p. (Beitrag Nr. VII).
- WU, P. C.; FERNANDO, H. J. S. An analysis of turbulent motions in and around a differentially forced density interface. Theoretical and Computacional Fluid Dynamics, v. 13, p. 129 – 141, 1999.
- WU, X.; ZHANG, J. Instability of a stratified boundary layer and its coupling with internal gravity waves: Part 2 Coupling with internal gravity waves via topography. Journal of Fluid Mechanics, v. 595, p. 409 – 433, 2008.

Yu, Y. J.; PARK, S. H.; SOHN, G. H.; BAK, W. J. Structural evaluation of thermal stratification for PWR surge line. Nuclear Engineering and Design, v. 178, p. 211 – 220, 1997.

ŻUCHOWSKI, R. Analysis of the thermal fatigue process. Journal of Materials Processing Technology, v. 106, p. 167-172, 2000.

ANEXO A

CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES

1. Metodologia de Calibração dos Termopares de Sonda

São apresentados os resultados da calibração dos termopares das três sondas verticais, posicionadas nas três estações de medição. A calibração restringiu-se aos termopares posicionados nas sondas, uma vez que os demais termopares de fluido, assim como os termopares de parede, estão brasados à seção de testes, a qual é muito grande para ser posicionada em um banho com temperatura homogênea ou em um bloco metálico equalizador de temperatura, juntamente com a instrumentação padrão. Entretanto, os 24 termopares de sonda calibrados foram considerados uma amostragem satisfatória do lote total de 100 (90 utilizados) termopares tipo K, diâmetro de 0,5 mm, com proteção em aço inox, e isolamento mineral, adquiridos para os experimentos de estratificação térmica, permitindo uma avaliação estatística da incerteza nos demais.

O método de calibração utilizado foi o da comparação entre a leitura dos sinais dos termopares de cada sonda, coletados pelo sistema de coleta de dados montado para os experimentos de estratificação térmica monofásica, e a leitura do padrão de referência. A junta quente dos termopares e o sensor padrão foram posicionados no orifício do bloco metálico equalizador mostrado na Figura A.1, o qual foi posicionado no forno de calibração. Este bloco foi confeccionado em cobre, com dimensões compatíveis com as do forno existente no Laboratório de Termo-hidráulica do CDTN – forno da marca ISOTEC, Isothermal Technology Ltd., modelo Júpiter. O bloco equalizador foi posicionado na cavidade do forno revestida de cerâmica refratária. A sonda do controle de temperatura do forno, também, foi posicionada no bloco equalizador, juntamente com a sonda dos termopares a serem calibrados e o sensor padrão. Esta montagem pode ser vista na Figura A.2.

O sensor padrão consta de um termômetro de resistência de platina, tipo PT-100, marca Hart Scientific, modelo 5614, N^o de série 434243. Sua incerteza é de $\pm 0,007$ °C na faixa de 0 °C a 250 °C. Seu sinal foi lido por um multímetro digital de 6½ dígitos, marca Prema, modelo DMM

6001, nº de série 11975, faixa de medida de temperatura de -200°C a 850°C . Sua incerteza é de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ e sua resolução de $0,01^{\circ}\text{C}$.

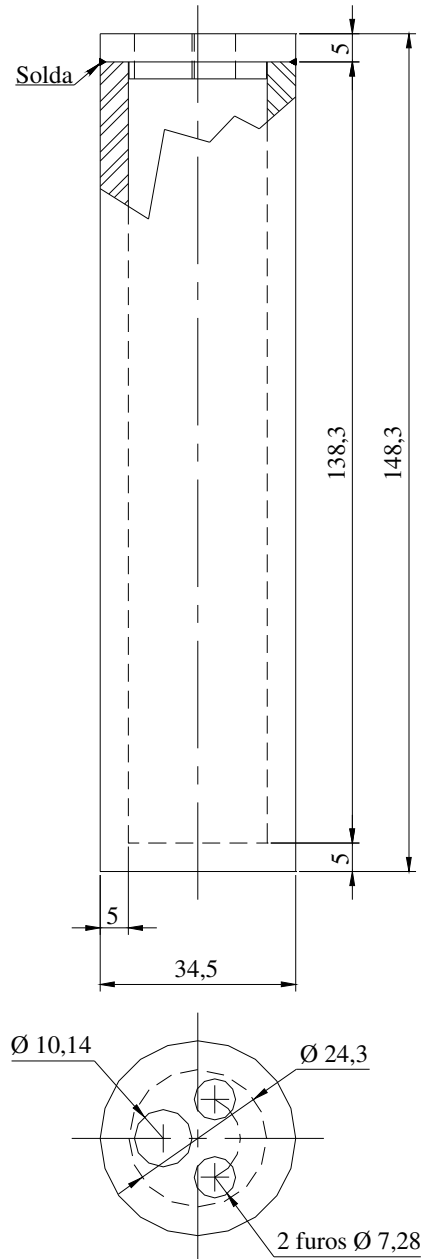


Figura A.1 – Desenho construtivo do bloco de cobre utilizado para a equalização das temperaturas nas sondas de termopares e no padrão.

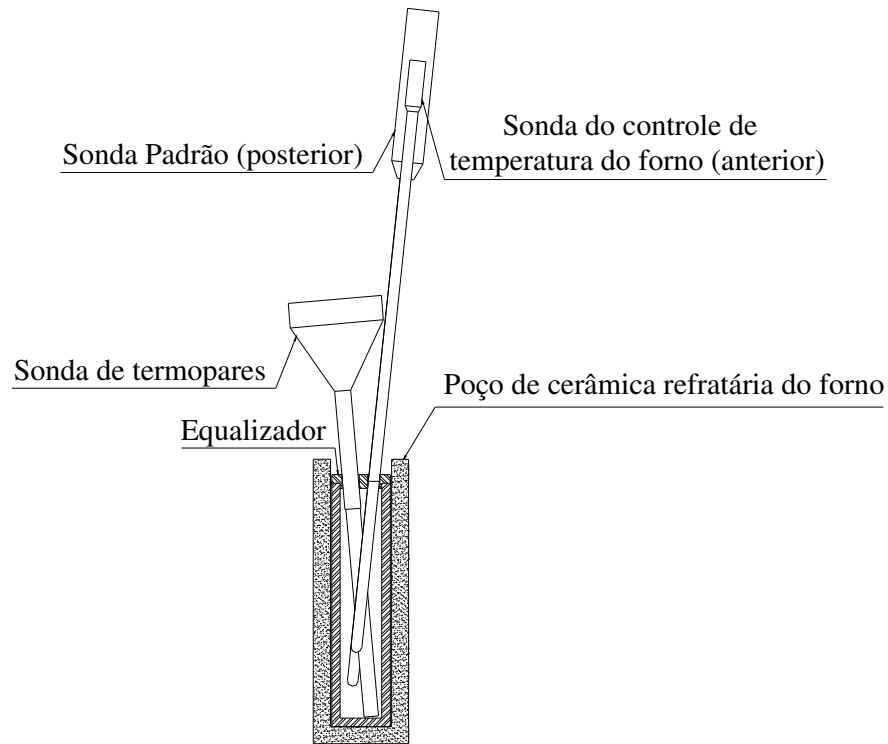


Figura A.2 – Posicionamento da sonda de termopares, sensor padrão e sonda do controle de temperatura no equalizador de cobre e no poço cerâmico do forno.

2. Aquisição e Tratamento dos Dados da Calibração

Os sinais dos termopares [mV] passam através de uma junta fria de referência e são enviados ao sistema de aquisição de dados montado para os experimentos de estratificação térmica monofásica. A temperatura na junta fria é monitorada por meio de termistores cujos sinais são, também, enviados para o mesmo sistema de aquisição de dados. Este sistema constitui-se de um conjunto de sete placas amplificadoras e multiplexadoras que recebem o sinal de toda a instrumentação dos experimentos, não só termopares e termistores, mas também transdutores de pressão. São placas da marca Advantech, modelo PCLD-789D, e apresentam exatidão de 0,0244% do fundo de escala. Cada placa multiplexadora possui 16 entradas de canais diferenciais e uma saída de canal analógico. Para cada placa pode-se selecionar um dos seguintes ganhos: 1, 2, 10, 50, 100, 200, 500 e 1000. Para as placas que coletam os sinais dos termopares e dos termistores foi selecionado o ganho 200. A tensão elétrica é amplificada, filtrada, convertida

em sinal digital e enviada ao computador que processa e registra os dados. Os canais analógicos de saída das placas multiplexadoras são conectados em forma de cascata a uma placa conversora marca Advantech, modelo PCL-818HD, à qual se podem conectar até 8 placas PCLD-789D, permitindo, desta forma, a leitura de até 128 canais. A placa conversora apresenta uma taxa máxima de conversão de 100 kHz. O tipo de conversão é por aproximação sucessiva, sua resolução é de 12 bits, sua exatidão de 0,01% do fundo de escala e sua linearidade de ± 1 bit. Esta placa fica posicionada no gabinete de um micro computador que processa os dados coletados.

Para cada ponto de medida registram-se a média de 60 leituras fornecidas pela linha a ser calibrada e o valor da temperatura lido no indicador padrão. Os desvios padrão das leituras das linhas, fornecidos pela equação a seguir, também são registrados. O programa implantado no computador realiza estas operações.

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n - 1}}$$

onde:

S_i = desvio padrão amostral;

Y_i = valor de cada leitura;

\bar{Y}_i = média das leituras;

n = número de leituras, igual a 60.

A partir dos dados coletados ajusta-se uma reta, por regressão, para cada linha de medida. O valor do coeficiente de determinação para a curva de regressão também é apresentado ($R^2 = R$ quadrado). As equações ajustadas são implantadas no programa de aquisição de dados.

3. Resultados da Calibração

3.1. Resultados preliminares

Durante a calibração dos termopares das sondas, foram ajustadas retas passando pelo zero, relacionando a tensão gerada por cada termopar e a diferença entre as temperaturas das suas juntas frias e quentes. As inclinações das retas ajustadas para os termopares da sonda da primeira

estação de medição apresentaram uma nítida tendência de queda da posição 1 até a posição 9, conforme pode ser observado na Figura A.3. Esta tendência indicava que provavelmente o bloco metálico equalizador não estava conseguindo homogeneizar as temperaturas dos diversos termopares e da sonda padrão. O mais provável é que o ventilador do Forno Júpiter, localizado próximo à extremidade inferior da cavidade de cerâmica refratária do mesmo, estivesse resfriando preferencialmente a extremidade inferior do bloco equalizador.

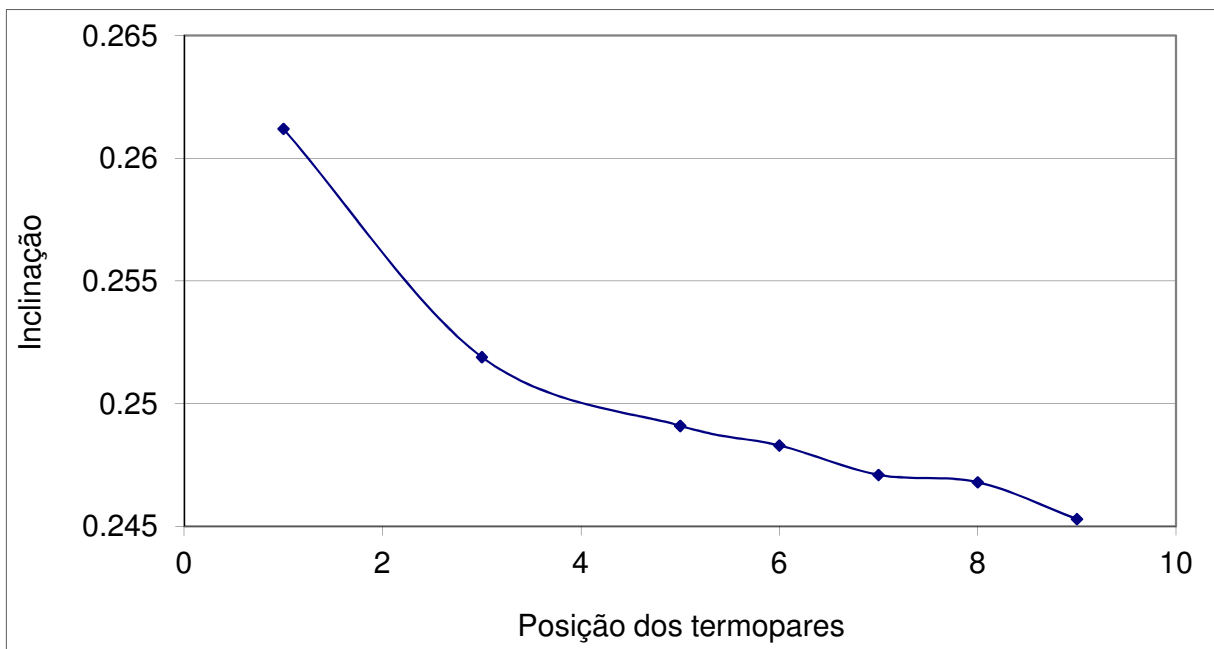


Figura A.3 - Inclinação das retas dos termopares da sonda da primeira estação de medição em função da posição dos termopares.

As inclinações das retas ajustadas para os termopares da sonda da segunda estação de medição apresentaram a mesma tendência de queda da posição 1 até a posição 10, constatada para os termopares da sonda da primeira estação de medição. A única exceção a esta tendência foi o termopar T2S06, cuja calibração levou à suspeita de tratar-se de um termopar diferente do tipo K. Essa questão voltará a ser tratada na próxima seção deste anexo.

Diante dos problemas descritos, decorrentes da não homogeneização da temperatura no interior do bloco metálico equalizador, todo o processo de calibração teve que ser refeito. Para a nova série de medidas foram feitas duas modificações no procedimento de calibração.

Primeiramente, a extremidade superior da cavidade do forno foi isolada termicamente, por meio de uma manta de lã de rocha, sempre que as sondas padrão e a sonda com os termopares eram posicionadas no interior da mesma, juntamente com o bloco metálico equalizador. Além disso, sempre que a temperatura atingia o valor pré-ajustado, desligava-se o forno por dois minutos antes de iniciarem-se as leituras. A intenção era de que nestes dois minutos o bloco metálico pudesse equalizar as temperaturas, sem interferências das resistências elétricas ou do ventilador do forno. Um tempo maior do que dois minutos resultava em uma queda muito acentuada da temperatura pré-ajustada. As inclinações das retas ajustadas para os termopares das sondas não voltaram a apresentar a tendência de queda da primeira até a última posição. Isto indica que provavelmente o bloco metálico equalizador pôde homogeneizar as temperaturas dos diversos termopares e da sonda padrão.

3.2. Resultados da calibração dos termopares de sonda

A calibração dos termopares de sonda gerou as retas de calibração, ajustadas para cada termopar, apresentadas na Tabela A.1. Nas curvas apresentadas, T representa a temperatura em [°C] e V a tensão devido à força eletromotriz (FEM) de cada termopar em [mV]. As retas apresentadas foram incluídas no programa de coleta e tratamento de dados dos experimentos de estratificação térmica. Apenas as curvas ajustadas são fornecidas neste anexo, não sendo apresentada a totalidade dos dados coletados nesta calibração. A tabela apresenta ainda, o erro padrão obtido para cada termopar. O erro padrão considerou a incerteza de toda a instrumentação padrão, do sistema de coleta de dados, das medidas de temperatura na junta fria realizadas com termistores e os resíduos entre os valores padrão e os valores obtidos com a curva ajustada.

Durante a calibração dos termopares da sonda da segunda estação de medição, o termopar T2S06 apresentou resultado tal que levou à conclusão de tratar-se de termopar de tipo diferente do tipo K. Possivelmente trata-se de um termopar do tipo N, uma vez que sua curva de calibração mais se aproxima da curva do fabricante para este tipo de termopar. Entretanto, ainda que sua curva se aproxime do tipo N, ela não corresponde exatamente à curva do fabricante, mas isto pode ser decorrente da utilização de cabos de extensão do tipo K. De qualquer maneira, para a

coleta de dados foi utilizada a reta ajustada durante a calibração, a qual foi obtida incluindo-se toda a linha de medição.

Tabela A.1 – Retas de calibração ajustadas para os termopares de sonda.

Termopar	Reta ajustada (*)	R ²	Erro padrão [°C]
T1S01	T = 24,72 V	0,9999	0,2
T1S02	T = 24,77 V	0,9998	0,2
T1S03	T = 24,79 V	0,9998	0,2
T1S04	T = 24,80 V	0,9997	0,2
T1S05	T = 24,81 V	0,9999	0,2
T1S06	T = 24,83 V	0,9999	0,2
T1S07	T = 24,71 V	0,9999	0,2
T1S08	T = 24,68 V	0,9998	0,2
T1S09	T = 24,53 V	0,9997	0,2
T2S01	T = 24,76 V	1	0,2
T2S02	T = 24,82 V	0,9999	0,2
T2S03	T = 24,67 V	0,9999	0,2
T2S04	T = 24,87 V	0,9998	0,2
T2S05	T = 24,83 V	0,9999	0,2
T2S06	T = 37,89 V	0,9998	0,4
T2S07	T = 24,65 V	0,9999	0,2
T2S08	T = 24,64 V	0,9999	0,2
T2S09	T = 24,62 V	0,9998	0,2
T2S10	T = 24,59 V	0,9998	0,2
T3S01	T = 24,75 V	0,9999	0,2
T3S02	T = 24,81 V	0,9998	0,2
T3S03	T = 24,78 V	0,9999	0,2
T3S04	T = 24,57 V	0,9997	0,2
T3S05	T = 24,63 V	0,9998	0,2
T3S06	T = 24,78 V	0,9999	0,2

(*) T em [°C] e V em [mV]

3.3. Resultados para os demais termopares

Conforme visto na seção 1 deste anexo, os termopares de fluido, posicionados a 3 mm da parede interna da seção de testes (termopares internos), assim como os termopares de parede (termopares externos), estão brasados à seção de testes, muito grande para ser posicionada em um banho com temperatura homogênea ou em um bloco metálico equalizador de temperatura. Assim, foi ajustada uma reta a partir da tabela ASTM-E-230, fornecida pelo fabricante dos termopares, que relaciona força eletromotriz térmica em milivolts e temperatura em graus Celsius, para termopares tipo K. Essa reta foi incluída no programa de coleta e tratamento de dados dos experimentos de estratificação térmica, para conversão das leituras em temperatura para todos esses termopares. A reta obtida foi:

$$T = 24,51 V,$$

Onde,

T é a temperatura em [°C]; e,

V é a tensão em [mV].

Para o cálculo do erro padrão, foram considerados os resíduos entre os valores obtidos com a reta acima e os valores obtidos com a reta ajustada para o termopar T1S06, que, dentre os termopares tipo K calibrados, foi o que mais se desviou da reta acima. Esse procedimento resultou em um erro padrão estimado em 0,4 °C.

Todos esses termopares, ainda que não tenham sido calibrados, tiveram suas respostas avaliadas, com um procedimento em que a seção de testes foi aquecida, e sua temperatura homogeneizada conforme procedimento descrito para o início de cada experimento. Isso permitiu constatar que todos eles eram termopares do tipo K. Assim, considerou-se que a calibração dos 25 termopares de sonda constituía em uma amostragem satisfatória do lote de termopares.

ANEXO B

CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIDA DE VAZÃO

1. O Sistema de Medida de Vazão

O sistema de medida de vazão utilizado nos experimentos de estratificação térmica monofásica constitui-se de um conjunto de placa de orifício e transmissor de pressão diferencial. O escoamento para o qual o sistema de medição de vazão foi projetado apresenta duas características importantes: escoamento a baixo número de Reynolds ($Re < 5 \times 10^3$); e, escoamento em tubulação de pequeno diâmetro ($D < 40$ mm). Os sistemas de medição de vazão por placas de orifício convencionais são normalizados para tubulações de diâmetro não inferior a 40mm e para escoamentos com número de Reynolds acima de 5×10^3 . As principais normas tais como a DIN 1952 (1982) e a ISO 5167 (1980) não especificam valores para os coeficientes de descarga e não apresentam as características construtivas das placas para tubulações de diâmetros pequenos e escoamentos com baixos números de Reynolds.

Assim, a placa de orifício construída não segue uma norma determinada, mas sim, vários aspectos das normas mencionadas acima, além de questões como a funcionalidade do sistema. Foi construída uma placa de orifício convencional com aresta viva, como mostrado na Fig. B.1. O orifício convencional com aresta viva pode ser utilizado em aplicações onde o número de Reynolds inferior varia entre 25 a 75, de acordo com o valor da relação de diâmetros. A Tab. B.1 contém as dimensões da placa utilizada nos experimentos de estratificação térmica. As tomadas de pressão foram construídas de forma anular, juntas à própria placa de orifício (tomadas de canto).

Tabela B.1 - Dimensões da Placa de orifício.

d/D	R₀	r_e	E	e	I	α	r_l
0,23	13,2	28,4	4	0,5	2,14	45°	14,64

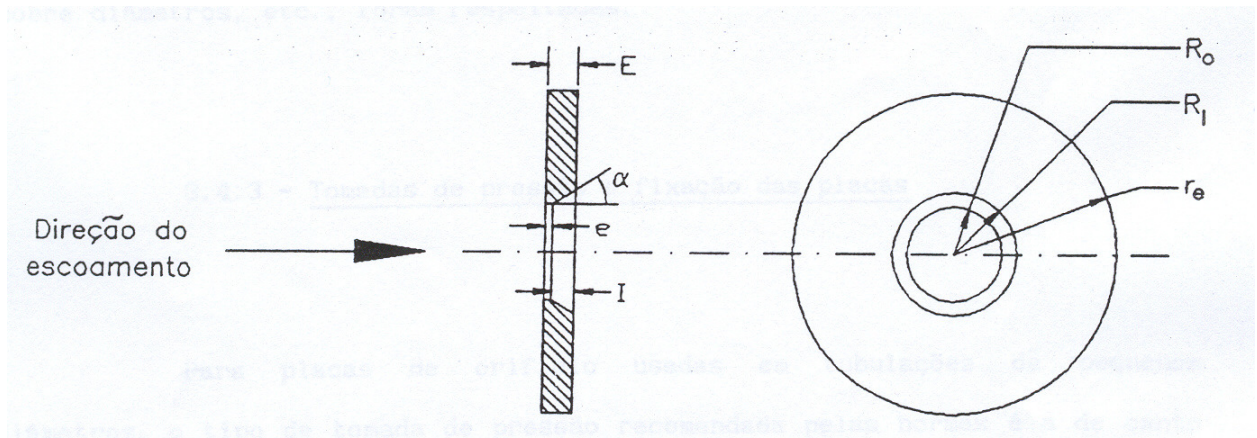


Figura B.1 – Placa de orifício convencional com arestas vivas.

2. O Objetivo da Calibração Sistema de Medida de Vazão

A calibração do sistema de medida de vazão teve como objetivo obter experimentalmente os coeficientes das equações da norma ISO 5167 (1980), que foram utilizados para alimentar o programa de aquisição de dados, permitindo o cálculo da vazão, um dos principais parâmetros deste experimento. O principal coeficiente é o coeficiente de descarga, dado por:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re_D} \right)^{0,75} + 0,09L_1\beta^4(1-\beta^4)^{-1} - 0,0337L_2\beta^3$$

Onde,

β é a razão entre o diâmetro do orifício e o diâmetro interno do tubo ($\beta = \frac{d}{D}$);

$$L_1 = L_2 = \frac{25,4}{D[mm]};$$

Re_D é o número de Reynolds ($Re_D = \frac{u_1 D}{\nu_1}$);

u_1 é a média da velocidade axial do fluido no tubo; e,

ν_1 é a viscosidade cinemática do fluido ($\nu_1 = \frac{\mu}{\rho}$).

A vazão mássica é dada por:

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2\Delta p \cdot \rho}$$

onde,

ε é o fator de expansividade, considerado igual a 1;

E é o fator de aproximação de velocidade $\{ E = (1 - \beta^4)^{-1/2} \}$;

Δp é a perda de pressão na placa de orifício; e,

ρ é a densidade do fluido.

3. A Metodologia de Calibração

A metodologia utilizada para a calibração a placa de orifício constituiu na utilização de uma tubulação vertical, com diâmetro conhecido, para armazenar o volume de água que passa pela placa em um tempo determinado, conforme ilustrado na Fig. B.2. Este volume armazenado, proporcional à coluna de água acumulada no tubo, é medido por um transmissor de pressão diferencial, cuja tomada de baixa pressão foi ligada à parte inferior do tubo, e cuja tomada de alta pressão foi ligada através de um tubo vertical de pequeno diâmetro a um pote posicionado na altura da extremidade superior do tubo de armazenamento de água. Esse pote é conectado a essa mesma extremidade superior do tubo de armazenamento de água. Assim, a vazão pode ser calculada pela medida da diferença de pressão ao longo de um intervalo de tempo. Uma válvula manual, posicionada em uma derivação da tubulação, permite controlar a vazão através da placa de orifício, juntamente com outra válvula de ajuste fino (de 0 kg/s a 1 Kg/s), posicionada logo após a placa de orifício.

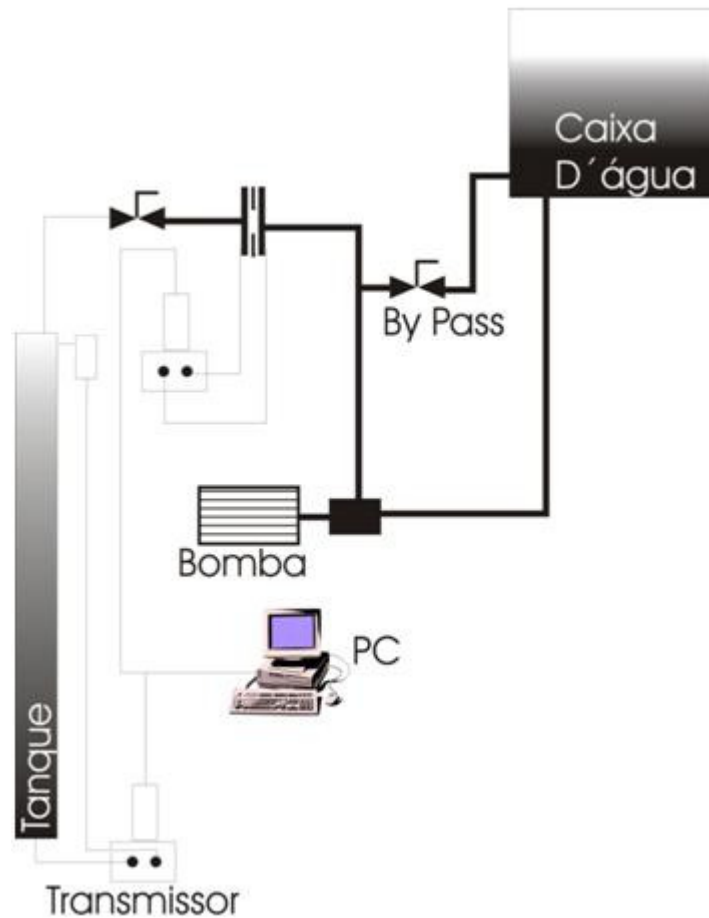


Figura B.2 – Montagem para a calibração da placa de orifício.

A instrumentação a seguir foi utilizada no processo de calibração do sistema de medida de vazão:

Placa Conversora Analógico-Digital

Marca: Advantech

Modelo: PCL-818HD

Características:

Possui 16 entradas analógicas simples ou 8 diferenciais.

Taxa de conversão: 100 kHz (máximo)

Tipo de conversão: Aproximação Sucessiva

Resolução: 12 bits

Exatidão: 0,01% do fundo de escala

Linearidade: ± 1 bit

Placa Amplificadora e Multiplexadora:

Marca: Advantech

Modelo: PCLD-789D

Características:

Cada placa multiplexadora possui 16 entradas de canais diferenciais e uma saída de canal analógico. Pode-se conectar em forma de cascata até 8 placas multiplexadora em cada conversora, desta forma permitindo a leitura de até 128 canais.

Pode-se seleccionar os seguintes ganhos: 1, 2, 10, 50, 100, 200, 500 e 1000.

Possui compensação de junta fria acoplado para leitura de termopar.

Exatidão: 0,0244% do Fundo de escala

2 Transmissores de Pressão Diferencial

Marca: GOULD

Modelo: Série PDH3000

Características:

Transdutor tem como principio de operação um diafragma, que mede pressão diferencial de até 2bar.

Exatidão: 0,25%

Calibrador de Pressão (referência ou padrão)

Marca: PRESYS

Modelo: PC-507

Características:

Faixa de Operação do Módulo: de 0 a 1bar.

Resolução: 0,0001 mbar

Exatidão: $\pm 0,05\%$ (VI)

4. Resultados das Calibrações

Inicialmente, antes da calibração da placa de orifício, foi necessária a calibração dos transmissores de pressão diferenciais utilizados tanto para a leitura da pressão devido à coluna d'água do tanque, quanto da perda de pressão através da placa de orifício. Os resultados dessas calibrações são apresentados a seguir.

4.1. Calibração do transmissor do tanque

O tanque que armazena a vazão de água para a calibração tem aproximadamente 4 m de altura, o que em termos de coluna d'água equivale a algo em torno de 400 mbar. O fundo de escala do transmissor é de 1 bar. Foram realizadas medidas a cada 100 mbar, o que totalizou onze pontos de calibração. Para cada ponto realizaram-se quatro medidas. A Tab. B.2 apresenta os dados coletados e analisados na calibração do transmissor do tanque. A Figura B.3 mostra graficamente os pontos obtidos e a curva ajustada. A equação que relaciona a pressão diferencial medida no tanque com a tensão lida é:

$$p = 241,531 * V - 226,308$$

onde,

p é a pressão em mbar

V é a tensão em volt

Somente a tendência e o desvio padrão foram considerados para a análise de incertezas, porque se verificou que a resolução do calibrador não influencia no cálculo do erro e as demais fontes de incertezas são muito difíceis de mensurar, tendo sido desconsideradas. A análise dos dados revelou que o comportamento do transmissor é bastante linear e que o erro máximo obtido foi de 1,2%.

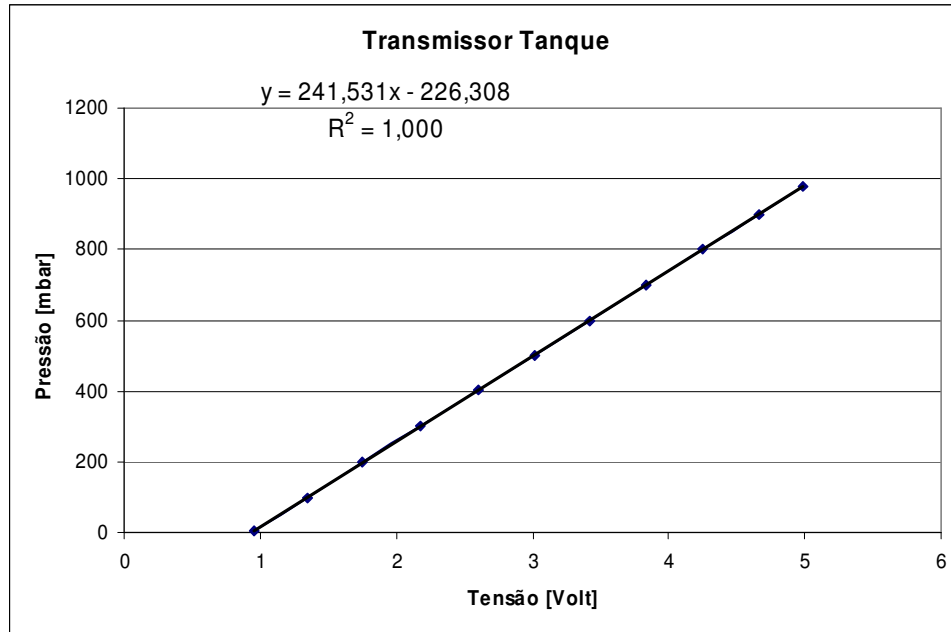


Figura B.3 – Ajuste da curva de calibração do transmissor do tanque.

Tabela B.2 - Dados da calibração do transmissor do tanque.

<i>Tensão [Volt]</i>	<i>Pressão [mbar]</i>		<i>Tendência</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Erro %</i>
	<i>Padrão</i>	<i>Equação</i>			
0,954773	0	4,299358	-4,29936	10,10134	-
1,347423	100	99,13634	0,863656	7,126921	0,863656
1,755287	200	197,6483	2,351695	4,243038	1,175848
2,174663	300	298,9404	1,059551	1,842133	0,353184
2,603619	401	402,5466	-1,54662	2,239761	-0,38569
3,014761	501	501,8503	-0,85032	3,873927	-0,16972
3,419092	600	599,5087	0,49129	4,779472	0,081882
3,831317	700	699,0739	0,926093	4,462417	0,132299
4,247696	800	799,6423	0,357737	2,500623	0,044717
4,666293	900	900,7465	-0,7465	2,167479	-0,08294
4,985545	977	977,8557	-0,85575	6,976342	-0,08759

4.2. Calibração do transmissor da placa de orifício

O fundo de escala do transmissor da placa de orifício é de 600 mbar. Foram realizadas medidas a cada 100 mbar, o que totalizou sete pontos de calibração. Para cada ponto realizaram-se quatro medidas. A Tab. B.3 apresenta os dados coletados e analisados na calibração do transmissor do tanque. A Figura B.4 mostra graficamente a curva ajustada. A equação que relaciona a pressão diferencial medida pelo transmissor da placa de orifício com a tensão lida é:

$$p = -1,4331 \cdot V^3 + 9,8117 \cdot V^2 + 1,3313 \times 10^2 \cdot V - 1,3877 \times 10^2$$

onde

p é a pressão em mbar

V é a tensão em Volt

A análise dos dados de calibração do transmissor da placa de orifício mostrou que este não apresenta um comportamento linear, mas possui uma pequena curvatura, o que levou a ajustar-se uma curva de terceiro grau, para diminuir os resíduos. Este transmissor, também, apresentou erros relativamente pequenos.

Tabela B.3 - Dados da calibração do transmissor da Placa de Orifício.

<i>Tensão [Volt]</i>	<i>Pressão [mbar]</i>		<i>Tendência</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Erro %</i>
	<i>Padrão</i>	<i>Equação</i>			
0,980926	0	-0,09104	-0,09104	2,644976	-
1,646477	101	100,6273	-0,37268	4,381077	0,368989
2,291842	200	200,6276	0,627625	4,884529	-0,31381
2,932777	300	299,9124	-0,08758	4,284489	0,029194
3,599815	401	400,7676	-0,23242	3,011692	0,057961
4,294608	501	500,4214	-0,57859	1,731027	0,115486
4,796129	567	567,3295	0,329534	1,486109	-0,05812

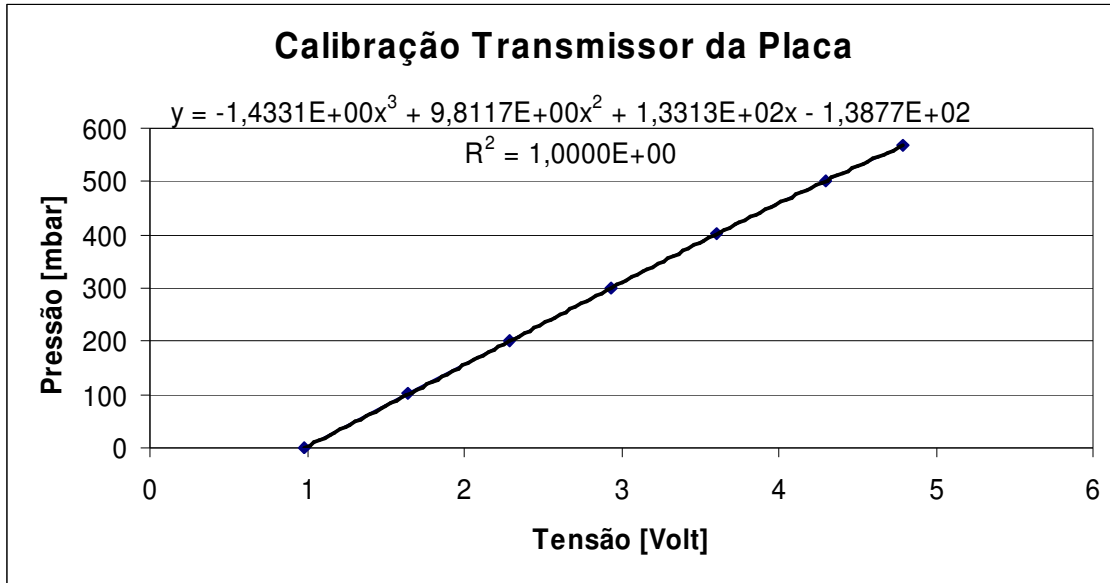


Figura B.4– Ajuste da curva de calibração do transmissor da placa de orifício.

4.3. Calibração da placa de orifício

Para a calibração da placa de orifício, cada nível de vazão desejado era ajustado previamente e, a seguir, a vazão era direcionada para o tanque, até que este fosse preenchido completamente. A vazão era então desviada para a linha de derivação e o tanque era esvaziado. Esse procedimento era repetido quatro vezes para cada nível de vazão. O programa de coleta de dados registrava o tempo e as pressões diferenciais medidas pelos dois transmissores. Foram escolhidos cinco níveis de vazão para o processo de calibração. A Figura B.5 mostra um ciclo de calibração para um nível de vazão. O cálculo da vazão mostrou-se bastante simples, com o volume no tanque evoluindo de forma linear, como pode ser observado na Fig. B.6, que apresenta os resultados coletados para a vazão de $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$. e na Fig. B.7, que apresenta os resultados coletados para a vazão de $8,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

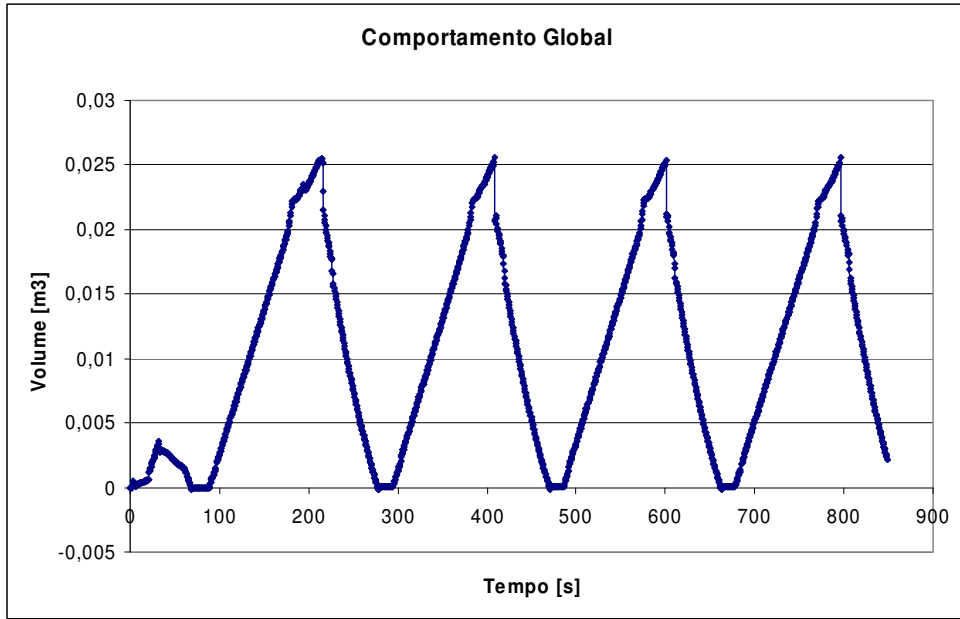


Figura B.5 – Variação do volume de água contido no tanque durante um ciclo de calibração.

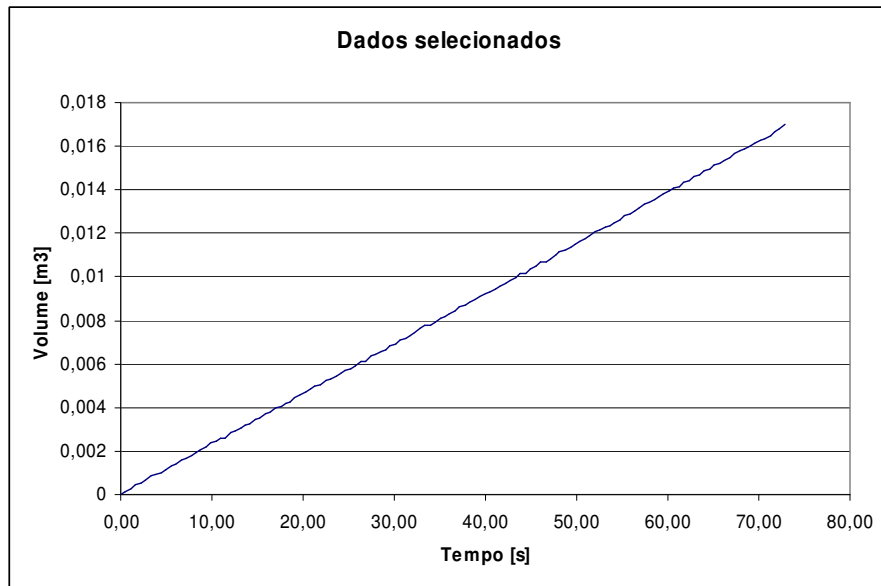


Figura B.6 – Dados coletados para a vazão de $2,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

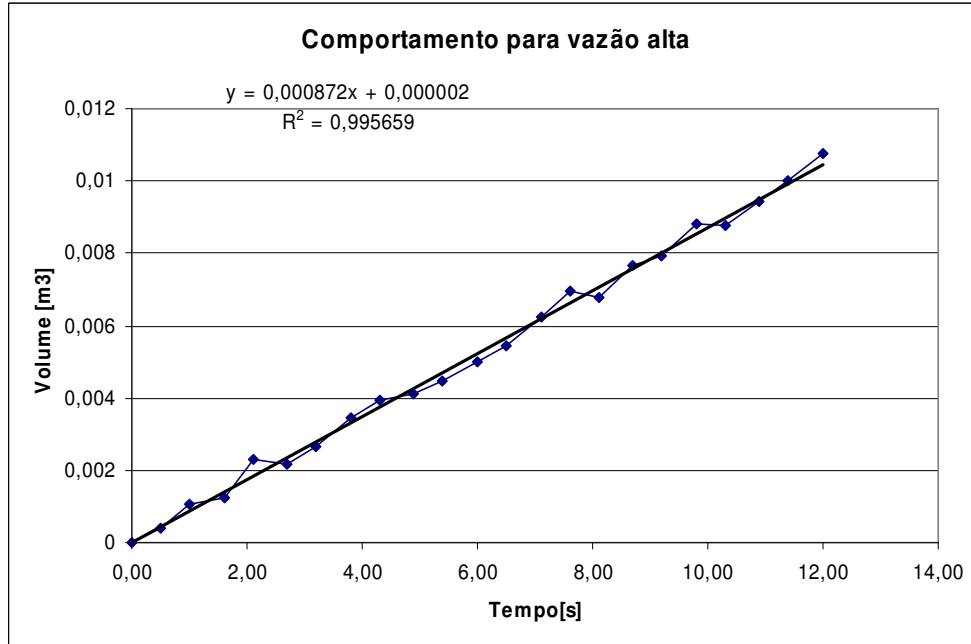


Figura B.7 – Dados coletados para a vazão de $8,5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Foi obtida a seguinte equação relacionando a pressão devido à coluna d'água e o volume contido do tanque:

$$V = 0,00005491 \cdot p$$

onde:

V é o volume em m^3 ; e,

p é a pressão em mbar.

A incerteza no volume foi estimada por:

$$U^2(V) = \left(\frac{\partial V}{\partial p} \times U(p) \right)^2$$

onde:

$$U(V) = 0,00005491 \times U(p)$$

$$U(V) = 0,00005491 \times 5 = 0,000275$$

$$U(V) = 0,000275 \text{ m}^3$$

A vazão é obtida pela divisão do volume armazenado pelo intervalo de tempo, ou seja:

$$\dot{V} = q_v = \frac{0,00005491 \times p}{t}$$

A partir desta equação, o erro na medida da vazão foi estimado por:

$$U^2(q) = \left(\frac{\partial q}{\partial P} \cdot U(p) \right)^2$$

$$U(V) = \frac{0,00005491 \cdot U(p)}{t}$$

$$U(q) = \frac{0,00005491 \cdot 5}{20} = 0,000014$$

$$U(q) = 0,000014 \text{ m}^3 / \text{s}$$

4.4. Ajuste da equação para o cálculo da vazão

Conforme apresentado na seção 1 deste anexo, a equação para o cálculo da vazão fornecida pela norma ISO 5167 (1980) é dada por:

$$q_m = C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

Na equação acima, o quadrado da vazão é proporcional à queda de pressão na placa de orifício (Δp) vezes a densidade (ρ), conforme ilustrado na Fig. B.8.

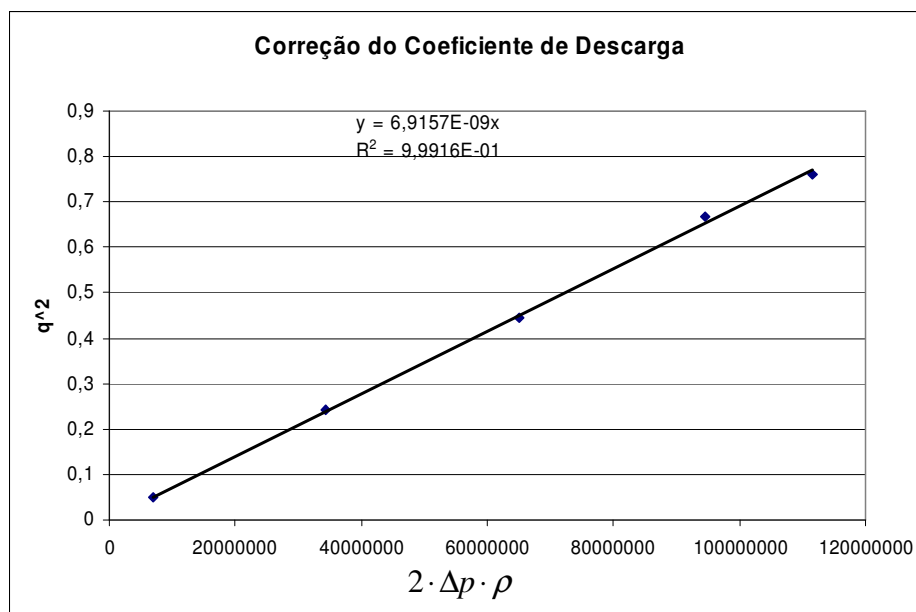


Figura B.8– Determinação experimental da parcela $C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2$ da equação da vazão.

Dos dados que resultaram na figura acima, tem-se que:

$$\left(C \cdot E \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \right)^2 = 6,9157 \times 10^{-9}$$

onde,

$$E = (1 - \beta^4)^{-1/2} = \frac{D^2}{\sqrt{D^4 - d^4}} = \frac{0,0263667^2}{\sqrt{0,0263667^4 - 0,0131^4}} = 1,032$$

ε é o fator de expansividade, que para a água é igual a 1, pois trata-se de um fluido incompressível.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0,0131^2 = 1,348 \times 10^{-4}$$

$$C = \frac{\sqrt{6,9157 \times 10^{-9}}}{1,032 \cdot 1 \cdot 1,348 \times 10^{-4}} = 0,5978$$

Desta forma, a equação da vazão para esta placa de orifício é:

$$q_m = 8,316 \times 10^{-5} \sqrt{2 \cdot \Delta p \cdot \rho}$$

onde:

Δp é a queda de pressão da placa em [Pa];

ρ é a densidade da água em [kg/m³]; e,

q_m é a vazão mássica em [kg/s].

O erro na medida da vazão com a placa de orifício atual pode ser estimado por:

$$U(q)^2 = \left(\frac{\partial q}{\partial \Delta p} \cdot U(\Delta p) \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial \rho} \cdot U(\rho) \right)^2$$

$$U(q)^2 = \left(\frac{8,316 \times 10^{-5} \cdot \rho}{\sqrt{2 \Delta p \cdot \rho}} \cdot U(\Delta p) \right)^2 + \left(\frac{8,316 \times 10^{-5} \cdot \Delta p}{\sqrt{2 \Delta p \cdot \rho}} \cdot U(\rho) \right)^2$$

A Tab. B.4 apresenta os dados coletados durante a calibração da placa de orifício. A Figura B.9 mostra a curva de calibração com a estimativa de erro nos cinco pontos em que foram feitas as medidas.

Tabela B.4 – Análise dos dados da vazão.

<i>Delta p (Placa) [Pa]</i>	<i>Vazão medida [kg/s]</i>	<i>Vazão obtida com a equação [kg/s]</i>	<i>Resíduo</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>u(dp)</i>	<i>Erro %</i>
3496,221839	0,225548	0,219682	-0,00587	1,689608	0,004082788	1,810164
17180,77073	0,4937605	0,486986	-0,00677	1,200202	0,007397397	1,498175
32603,84282	0,667662	0,670856	0,003194	5,411885	0,011565222	1,732197
47413,65822	0,816031333	0,808996	-0,00704	0,353928	0,017469983	2,140847
55861,90541	0,872751	0,878117	0,005366	1,266073	0,022790966	2,611394

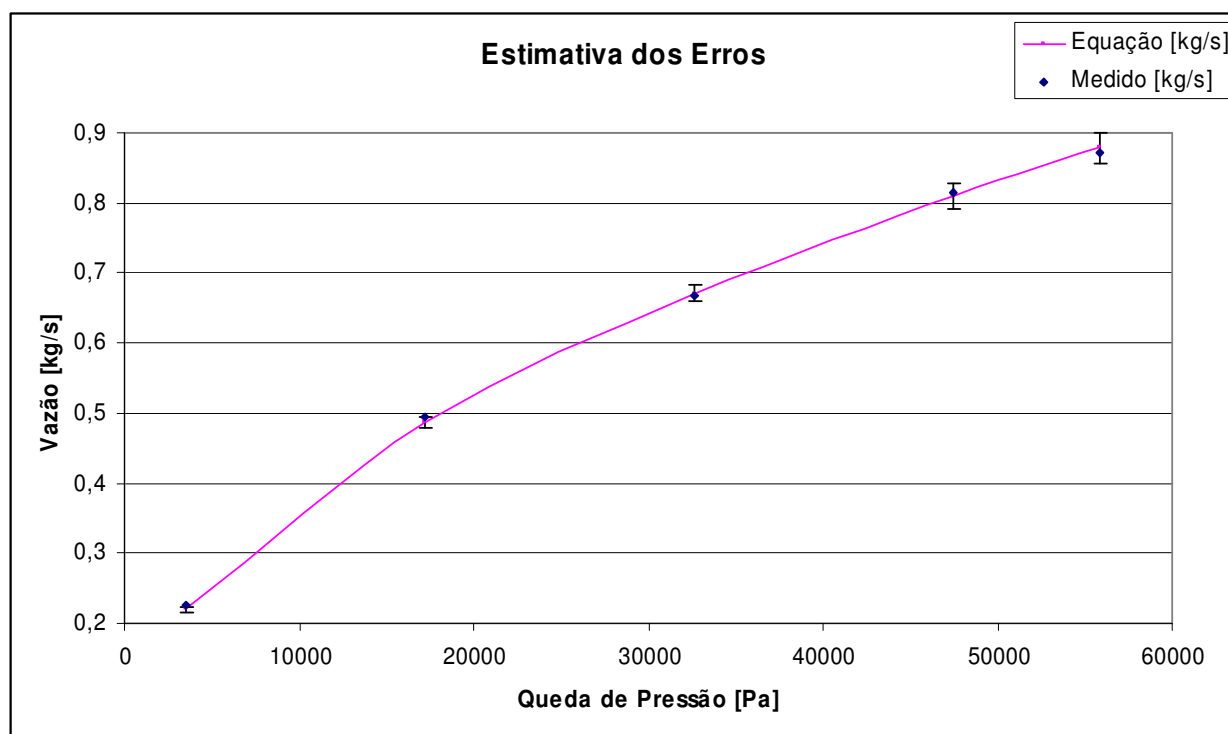


Figura B.9 – Curva de calibração da placa de orifício com as faixas de incerteza estimadas.

ANEXO C

CALIBRAÇÃO DA LINHA DE MEDIDA DE PRESSÃO

1. Descrição da Linha de Medida de Pressão

A pressão do circuito foi medida por meio de um transmissor de pressão com coleta e monitoramento no sistema de aquisição de dados. O transmissor envia seu sinal de corrente (4 a 20 mA) à placa condicionadora de sinal do sistema de aquisição de dados (sinal do ponto de medição identificado como P1, placa condicionadora 6, canal 6). O sinal passa por um resistor de 250Ω (precisão = 0,2%), localizado na entrada desta placa. A seguir são apresentadas as principais características da linha.

Transmissor de pressão marca Engematic.

Modelo: TP-201-640, nº de série 0037.

Faixa de Trabalho: 0 a 30 bar).

Exatidão: $\pm 0,1\%$ da faixa.

Alimentação: 24 Vcc

Sinal de saída: 4 a 20 mA.

Placa Conversora Analógico/Digital marca Advantech

Modelo: PCL-818HD

Resolução: 12 bits

Taxa de coleta máxima: 100 kHz (DMA);

Incerteza: $\pm 0,01\%$ da faixa ± 1 bit;

Proteção máxima contra sobretensão: ± 30 V.

Placa Condicionadora marca Advantech;

Modelo: PCLD-789D;

Entrada: 16 canais diferenciais

Tensão máxima de entrada: ± 10 V;

Ganho utilizado: 1 (disponíveis: 1, 2, 10, 50, 100, 200, 500 e 1000)

Incerteza para o ganho 1: 0,0244% da faixa ± 1 LSB.

Computador com Processador Intel Pentium MMX 220 MHz,

384 Mb de memória DIMM;

Disco rígido com 40 Gb; e,

Sistema Operacional Windows 98 SE.

Padrão de Calibração

Foi utilizado como padrão de referência um calibrador de pressão com as seguintes características.

Calibrador de Pressão Marca Presys;

Modelo: PC-507;

Calibrado pelo fabricante em: 05.05.2003;

Faixa utilizada: 1500 psi

Resolução: 0,0001;

Exatidão: $\pm 0,05$ % da leitura;

Estabilidade Térmica: 0,005 % FS/°C.

Instrumento Suporte

Bomba Geradora de Pressão Marca Presys;

Modelo: BY-100/8112-3000;

Nº. Série: 066.02.01;

Fluido: água destilada;

Faixa: 0 a 3000 psi.

2. Metodologia

Com o transmissor de pressão montado em sua posição de trabalho, desconectaram-se as ligações com instalação experimental. O padrão de referência e o transmissor foram, então, conectados a uma bomba manual e pressurizados simultaneamente. A corrente elétrica do

transmissor de pressão (4 a 20 mA) foi coletada normalmente pelo sistema de aquisição de dados, ou seja, conectada a um canal de uma das placas conversoras, com um resistor de $250,0 \Omega$ (precisão = 0,2%), transformando-se em um sinal de 1 a 5 V. Esse sinal de tensão elétrica foi filtrado, convertido em sinal digital, processado e registrado pelo computador, conforme o diagrama mostrado na Figura 1.

Para cada nível de pressão registraram-se 60 leituras, a média das mesmas e os desvios padrões das médias, além do valor da pressão lido pelo indicador padrão. Os desvios padrões das médias das leituras, que caracterizam a dispersão dos resultados, foram obtidos utilizando-se a Eq. 2, da Seção 3.4.

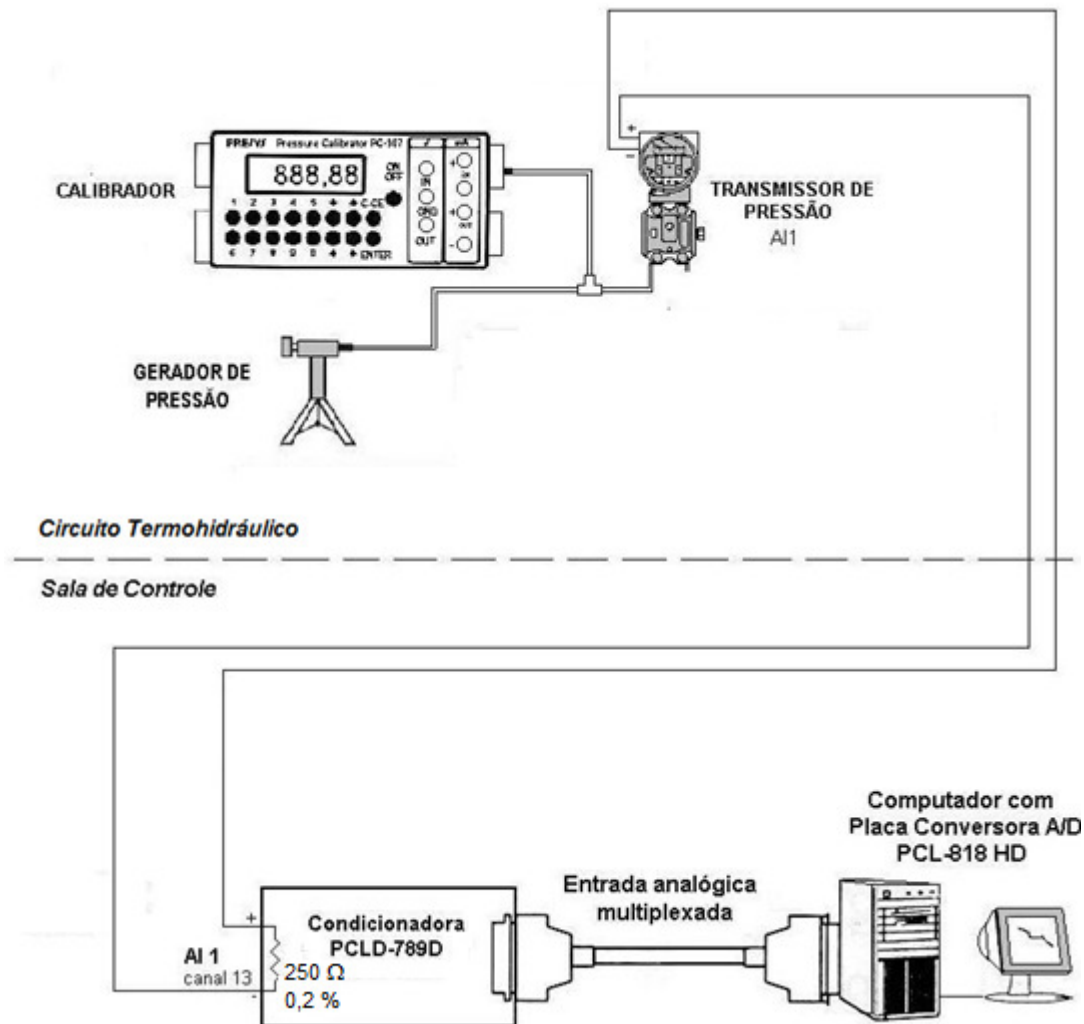


Figura C1. Diagrama para Calibração da Linha de Medida de Pressão.

A partir dos dados coletados ajustou-se uma reta, por regressão, para a linha de medida. O valor do coeficiente de determinação R^2 e o erro padrão da curva de regressão (Eq. 4, da Seção 3.4) também são calculados. A equação ajustada foi acrescentada no programa de aquisição de dados, corrigindo-se assim as leituras enviadas pelos sensores. A consolidação da incerteza associada a cada cadeia de medida (U), incerteza total da linha, foi obtida segundo a Eq. 5 da Seção 3.4.

3. Dados Coletados

Na Tabela 1 são apresentados os dados coletados durante a calibração. Na coluna 2 tem-se o valor da pressão lida no instrumento de referência, na coluna 3 tem-se o valor médio de 20 leituras da queda tensão, provocada pela passagem da corrente de saída do transmissor no resistor de $250,0 \Omega$ da placa de entrada de dados, e na coluna 3 tem-se o desvio padrão do valor médio. As condições em que foi realizada a calibração foram:

Data da calibração: 24.03.2007;

Temperatura ambiente: $25 \text{ }^\circ\text{C}$;

Umidade relativa do ar: 50 % a 70 %;

Pressão ambiente: 694 mmHg.

Tabela C1. Dados Coletados.

Item	Padrão [bar]	Transmissor [V]	Desvio Padrão [V]
1	0,000	1,000	0,0010
2	1,000	1,133	0,0013
3	2,000	1,267	0,0011
4	3,000	1,400	0,0014
5	4,000	1,533	0,0010
6	5,000	1,667	0,0012
7	6,000	1,800	0,0011
8	7,000	1,933	0,0010
9	8,000	2,066	0,0015
10	9,000	2,200	0,0013
11	10,000	2,333	0,0012
12	11,000	2,466	0,0010
13	12,000	2,600	0,0014
14	13,000	2,733	0,0013
15	14,000	2,866	0,0012
16	15,000	3,000	0,0010
17	16,000	3,133	0,0011
18	17,000	3,266	0,0013
19	18,000	3,399	0,0011
20	19,000	3,533	0,0012
21	20,000	3,666	0,0015
22	21,000	3,799	0,0013
23	22,000	3,933	0,0014
24	23,000	4,066	0,0010
25	24,000	4,199	0,0015
26	25,000	4,333	0,0013
27	26,000	4,466	0,0011
28	27,000	4,599	0,0012
29	28,000	4,732	0,0016
30	29,000	4,866	0,0013
31	30,000	4,999	0,0014

4. Curva Ajustada para o Sistema de Coleta de Dados

Com os dados coletados foi ajustada por regressão uma curva de primeiro grau a equação que relaciona a tensão em [V], lida pelo sistema de coleta de dados, com os níveis de pressão a que foi submetido o transmissor, conforme gráfico da Fig. C2. A curva foi adicionada ao programa de coleta de dados e é apresentada a seguir:

$$p = 7,4989V - 7,5132 ,$$

com:

Coefficiente de Determinação, $R^2 = 1$;

Erro Padrão ($U_{y,x}$) = $\pm 0,0045$ bar, (0,015% da faixa).

onde:

p é a pressão aplicada em [bar]; e,

V é a tensão elétrica registrada pelo sistema de aquisição de dados, em [V].

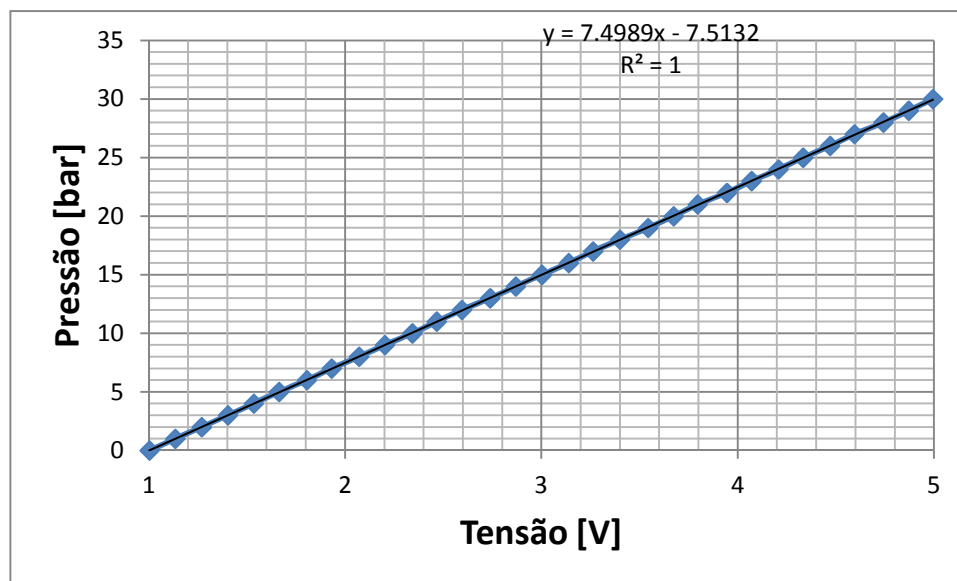


Figura C2 – Curva de calibração obtida para o transmissor de pressão.

5. Incerteza na Medida de Pressão

A maior incerteza consolidada (U) para a cadeia de medição de pressão é:

$$U = \pm 0,016 \text{ bar}$$