

Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase

Joana Isabel Cortez Trindade

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Prof. Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho

Orientadora do INEGI: Eng.^a Ana Gomes Magalhães



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Fevereiro 2018

«Failure is, in a sense, the highway to success, inasmuch as every discovery of what is false leads us to seek earnestly after what is true, and every fresh experience points out some form of error which we shall afterwards carefully avoid. »

John Keats

Resumo

O presente texto foi elaborado no âmbito da unidade curricular Dissertação, que se enquadra no 5º ano letivo do plano de estudos da opção de Energia Térmica do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, lecionado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).

Os principais objetivos deste trabalho recaem sobre a adaptação da unidade de testes de acumulação de energia térmica por materiais de mudança de fase existente no INEGI para novos materiais, assim como o projeto, construção de uma cápsula e a realização de testes ao comportamento térmico do conjunto cápsula-material de mudança de fase.

Para a realização destes testes foi usada uma instalação que utiliza um óleo térmico como fluido transportador de energia térmica, equipada de um permutador que alberga o material de mudança de fase, encapsulado numa cápsula de aço ao carbono com 190 mm de comprimento, 42 mm de diâmetro interno e 48 mm de diâmetro externo, inserida no permutador de testes. O termofluido cede calor ao material de mudança de fase durante o seu aquecimento e retira o calor do material de mudança de fase durante a fase de descarga durante o seu arrefecimento. O material testado, fornecido pela empresa *PCM Products Limited*, é um material de mudança de fase sólido-líquido com o nome comercial de *PlusICE A164*, que consiste num derivado de um açúcar alcoólico com uma temperatura de fusão de 164 °C.

Realizaram-se assim estudos do comportamento deste material durante o seu processo de fusão, quando recebia calor do termofluido, e posterior processo de solidificação, quando cedia calor ao termofluido. Foram estudadas as influências do caudal de termofluido e da orientação da cápsula. Foi ainda projetado e construído um sistema alhetado com alhetas radiais, colocado no interior da cápsula com o objetivo de aumentar a transferência térmica no interior desta. Os ensaios foram realizados para dois caudais do termofluido, com a cápsula normal e incluindo o sistema alhetado, e ainda, para a orientação vertical (escoamento paralelo) e orientação horizontal (escoamento cruzado) da cápsula que alberga o material de mudança de fase. Obtiveram-se assim coeficientes globais de transferência de calor entre o termofluido e o material de mudança de fase para as diversas situações testadas, com o objetivo de compreender e melhorar o processo a transferência de calor no uso de materiais de mudança de fase. Posteriormente determinou-se o coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase, quer para a fusão quer para a solidificação.

Project, construction and test of a thermal energy storage unit using phase change materials

Abstract

This dissertation was developed within the Integrated Master's in Mechanical Engineering syllabus in the Thermal Energy branch of the same course, regarding the 5th grade discipline Dissertation, taught at the Faculty of Engineering of University of Porto (FEUP).

The main goals of this work were the adaptation of the thermal storage test bench unit for phase change materials (PCM's) present in the laboratory of INEGI, as well as the design, construction and testing of a capsule with PCM.

The test bench uses thermal oil as the heat transfer carrier and the PCM is encapsulated inside a steel capsule with 190 mm length, 42 mm internal diameter and 48 mm external diameter. This steel capsule is kept inside a reactor where the heat transfer fluid (HTF) flows. The HTF transfers heat to the PCM during the energy accumulation step and carries heat away from PCM during the energy extracting step. The material, with the commercial name of *PlusICE A164*, supplied by PCM Products Limited, is a sugar alcohol blend with a fusion temperature around 164 °C.

Several tests on the behaviour of the PCM, during both the fusion and solidification processes were accomplished. The influence of the mass flow rate of the heat transfer oil, the capsule disposition and the capsule geometry was evaluated. Tests were made with two different pump frequencies, two different capsules (normal and finned), and also for a vertical (coflow) and horizontal (cross flow) layout of the capsule that holds the PCM. Values for the global heat transfer coefficient from the thermal oil towards the phase change material were obtained for the different testes situations. Subsequently heat transfer coefficient values for the phase change material were determined, both for the fusion and the solidification process.

Agradecimentos

Ao meu orientador e Professor Carlos Manuel Coutinho Tavares de Pinho, a quem agradeço toda a confiança demonstrada, orientação, sugestões e motivação nos momentos mais cruciais, sem os quais a realização desta dissertação não teria sido possível.

À minha orientadora no INEGI, Engenheira Ana Gomes Magalhães, agradeço pela disponibilidade e sugestões facultadas.

Agradeço ao INEGI por facultar as instalações necessárias para a realização desta dissertação, em especial ao Engenheiro Victor Ferreira por toda a disponibilidade, motivação e apoio prestado durante toda a realização da dissertação.

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo deste tempo, obrigada por todos os momentos partilhados neste percurso.

Finalmente gostava de agradecer aos meus pais e ao meu irmão por todas as oportunidades, confiança e apoio infundável.

Índice de Conteúdos

1	Introdução	1
2	Estado da Arte	5
2.1	Armazenamento de Energia	5
2.1.1	Armazenamento de Energia Mecânica	8
2.1.2	Armazenamento de Energia Química	10
2.1.3	Armazenamento de Energia Eletroquímica	11
2.1.4	Armazenamento de Energia Elétrica	12
2.1.5	Armazenamento de Energia Térmica	18
2.2	Materiais de Mudança de Fase	25
2.3.1	Requisitos e Especificações	25
2.3.2	Classificação e propriedades	31
2.3.2.1	Materiais de mudança de fase sólido-sólido	31
2.3.2.2	Materiais de mudança de fase sólido-líquido	34
2.3.3	Métodos de melhoria	38
3	Instalação laboratorial	47
3.1	Bombagem	48
3.2	Fluido de transferência de calor	49
3.3	Sistema de Arrefecimento	49
3.4	Sistema de Aquecimento	51
3.5	Medição de caudal	53
3.6	Vaso de expansão	54
3.7	Permutador de testes	55
3.8	Tubagem e válvulas	56
3.9	Aquisição de dados	56
3.10	Funcionamento	58
4	Propriedades da cápsula e do material testado	61
5	Testes ao material de mudança de fase	69
5.1	Caraterização da evolução da temperatura	70
5.2	Estudo dos coeficientes de transferência de calor	80
5.2.1	Análise do coeficiente global de calor	80
5.2.2	Análise do coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase ..	86
6	Conclusões	95

7 Trabalhos futuros	97
Referências	99
ANEXO A: Caraterísticas da bomba centrífuga	103
ANEXO B: Propriedades do termofluido-<i>Therminol 66</i>	105
ANEXO C: Sistema de aquisição de dados	109
ANEXO D: Caraterísticas e calibração da placa orifício	113
ANEXO E: Tratamento matemático para a análise do coeficiente global de transferência de calor	125
ANEXO F: Ensaios	131
ANEXO G: Valores médios do caudal mássico e da velocidade do escoamento para os ensaios realizados	146

Abreviaturas e Nomenclatura

Abreviaturas

BES	<i>Battery energy storage</i> Armazenamento de energia com uso de baterias
CAES	<i>Compressed Air Energy Storage</i> Armazenamento de energia por ar comprimido
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> Calorimetria Diferencial de Varrimento
FES	<i>Flywheel energy storage</i> Armazenamento de energia por volante de inércia
HES	<i>Hydrogen energy storage</i> Armazenamento de energia por hidrogénio
PCM	<i>Phase Change Material</i> Materiais de mudança de fase
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative Controller</i> Controlador proporcional-integral-derivativo
PHSS	<i>Pumped hydro energy storage</i> Armazenamento de energia por bombagem hidroelétrica
SMES	<i>Superconducting Magnetic Energy Storage</i> Armazenamento de energia elétrica/magnética
SS-PCM	<i>Solid-Solid Phase Change Material</i> Material de mudança de fase sólido-sólido

Nomenclatura

Designação	Definição	Unidades
C_d	Coefficiente de descarga	[-]
c_p	Calor específico	[kJ/(kg·K)]
c_{pl}	Calor específico	[kJ/(kg·K)]
c_{ps}	Calor específico	[kJ/(kg·K)]
D	Diâmetro	[m]
f	Fator de atrito	[-]
F_{eg}	Fator de correção da compressibilidade do gás	[-]
F_{et}	Fator de correção da expansão térmica	[-]
h	Coefficiente de transferência de calor	[W/(m ² ·K)]
h_{int}	Coefficiente de transferência de calor do material de mudança de fase	[W/(m ² ·K)]
h_{mf}	Entalpia de mudança de fase	[kJ/kg]
h_{out}	Coefficiente de transferência de calor do termofluido	[W/(m ² ·K)]
k	Condutividade térmica	[W/(m·K)]
L	Comprimento característico	[m]
m	Massa	[kg]
\dot{m}	Caudal mássico	[kg/s]
Nu	Número de <i>Nusselt</i>	[-]
P	Pressão	[Pa]
p	Probabilidade	[-]
Pr	Número de <i>Prandtl</i>	[-]

Q	Energia Térmica	[J]
\dot{Q}	Potência calorífica	[W]
Re	Número de <i>Reynolds</i>	[-]
R_i	Resistência i	[m ² ·K/W]
s_x	Desvio padrão da amostra	[-]
T_1, T_2, \dots, T_N	Termopar em estudo	[-]
T_{66}^i	Temperatura do termofluido no instante i	[°C]
T_i	Temperatura inicial	[°C]
T_f	Temperatura final	[°C]
T_{mf}	Temperatura de mudança de fase	[°C]
U	Coefficiente global de transferência de calor	[W/(m ² ·K)]
v	Velocidade do escoamento	[m/s]
V	Tensão	[V]
\bar{X}	Valor médio das leituras	[-]
X_i	Leitura i	[-]
α	Difusividade térmica	[m ² /s]
α_{em}	Expansão térmica do elemento medidor	[K ⁻¹]
α_{et}	Expansão térmica da tubagem	[K ⁻¹]
β	Razão de diâmetros	[-]
μ	Viscosidade dinâmica	[Pa·s]
ρ_l	Massa volúmica da fase líquida	[kg/m ³]
ρ_s	Massa volúmica da fase sólida	[kg/m ³]
τ	Desvio normalizado	[-]
Δt	Intervalo de tempo	[s]

ΔT_{ml}	Temperatura média logarítmica	[°C; K]
ΔP	Diferencial de pressão	[Pa]

Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase

Índice de Figuras

Figura 2.1- Cadeia de energia com integração dos sistemas de armazenamento de energia	5
Figura 2.2- Distribuição do consumo de energia em Portugal.	6
Figura 2.3- Diagrama de consumo/geração de energia solar num dia típico.	7
Figura 2.4- Esquema dos elementos constituintes de um volante de inércia.	8
Figura 2.5- Esquema de funcionamento de uma planta de bombagem hidroelétrica.....	9
Figura 2.6- Armazenamento de energia por gás comprimido.	9
Figura 2.7- Bateria chumbo/ácido	11
Figura 2.8- Pilha de zinco/dióxido de manganês.....	12
Figura 2.9- Esquema de um supercondensador	13
Figura 2.10- Esquema de um sistema de armazenamento de energia magnético.....	14
Figura 2.11- Diferentes métodos de armazenamento de energia de acordo com a sua capacidade e potência debitada.....	16
Figura 2.12- Classificação dos tipos de armazenamento de energia térmica.	18
Figura 2.13- Tipos de armazenamento de energia térmica relativamente ao tipo de calor.	19
Figura 2.14- Representação esquemática de uma reação termoquímica.....	20
Figura 2.15- Temperatura para a mudança de fase sólido/líquido.	23
Figura 2.16- Diagrama energia térmica armazenada vs. temperatura para três materiais de mudança de fase e um sistema de armazenamento de energia sensível utilizando água	25
Figura 2.17- Classificação de materiais de mudança de fase.	26
Figura 2.18- Requisitos térmicos de um material de mudança de fase.	27
Figura 2.19- Requisitos físicos de um material de mudança de fase.....	27
Figura 2.20- Caraterísticas químicas favoráveis de um material de mudança de fase. ...	28
Figura 2.21- Caraterísticas económicas favoráveis de um material de mudança de fase.	28
Figura 2.22- Propriedades cinéticas procuradas num material de mudança de fase.	29
Figura 2.23- Degrau de sobreaquecimento.	29
Figura 2.24- Representação esquemática de um SS-PCM's do tipo perovskita.	32
Figura 2.25- Diferentes geometrias para encapsulamento, esférico (a), tubular (b), cilíndrico (c) e retangular (d).....	38
Figura 2.26- Tipos de encapsulamento relativamente à sua dimensão.....	38

Figura 2.27-	Esquema de polimerização de emulsão micro PCM's.....	40
Figura 2.28-	Alguns tipos de geometrias utilizadas para alhetas.	41
Figura 2.29-	Alheta com pinos (a) e discos (b).	42
Figura 2.30-	Unidade de armazenamento com alheta em hélice.....	43
Figura 2.31-	Matriz/espuma porosa de alumínio com material de mudança de fase (parafina)	44
Figura 2.32-	Imagens de uma matriz de grafite.....	44
Figura 3.1-	Instalação previamente instalada no laboratório	47
Figura 3.3-	Caraterísticas da bomba da instalação.	48
Figura 3.2-	Grupo de bombagem.....	48
Figura 3.4-	Variador de frequência.	49
Figura 3.5-	Permutador <i>PILAN</i>	50
Figura 3.6-	Bomba da <i>Wilo</i> para o sistema de arrefecimento.....	50
Figura 3.7-	Caudalímetro do circuito de arrefecimento.	51
Figura 3.8-	Esquema do aquecedor.	52
Figura 3.9-	Controlador PID para controlo da temperatura do aquecedor.	52
Figura 3.10-	Transdutor <i>Bailey & Mackey</i> do tipo 482A.	53
Figura 3.11-	Fonte de alimentação do transdutor de pressão.	54
Figura 3.12-	Vaso de expansão da instalação.....	55
Figura 3.13-	Esquema do permutador de testes.....	56
Figura 3.14-	Placa de aquisição de dados TC-32.	57
Figura 3.15-	Placa de aquisição de dados USB-2416.....	57
Figura 3.16-	Aspetto final da instalação experimental.	58
Figura 3.17-	Esquema global 3D da instalação final. A- Dispositivo de aquecimento; B- Dispositivo de arrefecimento; C- Bomba centrífuga; D-Permutador de testes; E-Purga de ar, P- Placa orifício, V-Vaso de expansão.	59
Figura 3.18-	Esquema 2D do circuito de aquecimento.	60
Figura 3.19-	Esquema 2D do circuito de arrefecimento.....	60
Figura 4.1-	Dimensões da cápsula.	61
Figura 4.2-	Desenho CAD do conjunto permutador de testes e cápsula.	62
Figura 4.3-	Desenho CAD com dimensões da alheta.....	62

Figura 4.4- Desenho CAD da alheta com a cápsula.....	63
Figura 4.5- Posição das tomadas de temperatura do material de mudança de fase durante os ensaios.....	64
Figura 4.6- Cápsula construída.....	64
Figura 4.8- Material de mudança de fase A164.....	65
Figura 4.9- Mufla onde o material foi liquefeito.....	67
Figura 4.11- Posição da cápsula em que o material foi vazado.....	68
Figura 4.10- Material de mudança de fase A164 antes e após ativação.....	68
Figura 5.1- Esquematização dos parâmetros estudados nos ensaios laboratoriais.....	69
Figura 5.2- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_50_sa.....	72
Figura 5.3- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_35_sa.....	72
Figura 5.4- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa.....	74
Figura 5.5- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_35_sa.....	74
Figura 5.6- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa_A15.....	75
Figura 5.7- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa_A5.....	76
Figura 5.8- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_35_a.....	77
Figura 5.9- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_50_a.....	77
Figura 5.10- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_35_a.....	78
Figura 5.11- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_a.....	79
Figura 5.12- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_35_sa.....	81
Figura 5.13- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_50_sa.....	82
Figura 5.14- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_35_sa.....	83
Figura 5.15- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_50_sa.....	83
Figura 5.16- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_35_a.....	84
Figura 5.17- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_50_a.....	84

Figura 5. 18- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_35_a.	85
Figura 5. 19- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_50_a.	85
Figura 5.20- Esquematização das resistências térmicas do conjunto cápsula/permutador.	86
Figura 5.22- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_50_sa.	89
Figura 5.21- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_35_sa.	89
Figura 5. 23- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_35_a.	90
Figura 5. 24- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_50_a.	90
Figura 5.25- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_35_sa.	93
Figura 5.26- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_50_sa.	93
Figura 5.27- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_35_a.	94
Figura 5.28- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_50_a.	94
Figura B.1- Variação da viscosidade dinâmica do <i>Therminol 66</i> com a temperatura.....	105
Figura C.1- <i>Esquema</i> do processo de aquecimento.	109
Figura C.2- Imagem do programa <i>DASYLab</i> no processo de aquecimento.	110
Figura C.3- Esquema do processo de arrefecimento.	111
Figura D.1- Desenho de construção da placa orifício.....	113
Figura D.2- Foto da instalação durante o processo de calibração da placa orifício.	118
Figura D. 3- Gráfico de um dos valores de tensão obtidos durante a calibração.	119

Figura F.1- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_35_sa.....	133
Figura F.2- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_50_sa.	134
Figura F.3- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_35_sa.	134
Figura F.5- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_35_a.....	135
Figura F.4- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_50_sa.	135
Figura F.6- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_35_a.....	136
Figura F.7- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_50_a.....	136
Figura F.8- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_50_a.....	137
Figura F.9- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_35_sa.....	138
Figura F.10- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_50_sa.....	138
Figura F.11- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_35_sa.....	139
Figura F.12- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_50_sa.....	139
Figura F.13- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_50_a.	140
Figura F.14- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_35_a.	140
Figura F.15- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_35_a.	141
Figura F.16- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_50_a.	141
Figura F.17- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_50_sa.	142
Figura F.18- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_35_sa.	142
Figura F.19- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_50_a.	143
Figura F.20- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_35_a.	143

Figura F.22- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_50_sa.	144
Figura F.21- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_35_sa.	144
Figura F.24- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_50_a.	145
Figura F.23- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_35_a.	145

Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Análise comparativa de diferentes tecnologias para armazenamento de energia	15
Tabela 2.2- Materiais termoquímicos promissores	21
Tabela 2.3- Materiais disponíveis para armazenamento sensível e as suas propriedades	22
Tabela 2.4- Comparação relativa das propriedades dos diferentes tipos de SS-PCM's	33
Tabela 2.5- Características das parafinas e não-parafinas.....	35
Tabela 2.6- Comparação dos diferentes materiais de mudança de fase sólido/líquido ...	36
Tabela 2.7- Propriedades termofísicas de compostos selecionados	37
Tabela 3.1- Gama de medição transdutor de pressão	53
Tabela 4.2- Propriedades do material de teste A164	65
Tabela 4.3- Características térmicas do material Plus ICE A164	66
Tabela 4.4- Variação das propriedades térmica do material PlusICE A164 com a temperatura	66
Tabela 5.1- Coeficientes da equação de <i>Hilpert</i> em função do número de <i>Reynolds</i>	91
Tabela B.1- Propriedades do termofluido <i>Therminol 66</i> em função da temperatura	107
Tabela D.1- Características da placa orifício	114
Tabela D.2- Valores para a determinação do erro do ajuste da correlação para um intervalo de confiança de 95%.....	123
Tabela F.1- Especificações de cada ensaio e a denominação utilizada.....	132
Tabela G.1- Valores médios do caudal mássico de termofluido para cada disposição da cápsula.....	146

Tabela G.2- Valores médios do caudal mássico de termofluido para cada disposição da cápsula146

1 Introdução

O crescimento exponencial da população mundial e a mudança nos hábitos de vida e consumos são as principais causas para o aumento da demanda no consumo de energia nas últimas décadas. É esperado que em 2050 o consumo de energia mundial já tenha duplicado e que pelo fim do século seja o triplo do atual (Nault, 2005).

A União Europeia é responsável por 40 % do consumo total de energia, sendo que, o aquecimento, arrefecimento de edifícios e aquecimento de água são responsáveis por aproximadamente 70% deste consumo. Contudo cerca de 75% do fornecimento primário de energia para aquecimento e arrefecimento é baseado em combustíveis fósseis (European Commission, 2016).

De modo a caminhar no sentido da sustentabilidade e promover a diminuição das alterações climáticas é necessário então ser capaz de responder à crescente demanda energética recorrendo ao uso de energias renováveis. É assim necessário um esforço para descarbonizar o consumo mundial de energia, que ainda reside maioritariamente em fontes de combustíveis fósseis.

O uso de sistemas de aproveitamento da energia solar é uma solução para a redução de emissões de CO₂ associadas ao aquecimento e arrefecimento de água e edifícios.

A eletricidade é consumida ao mesmo tempo que é gerada. Por este motivo, a quantidade adequada de eletricidade deve ser fornecida de modo a ir de encontro às variações da procura. O armazenamento de energia elétrica é dispendioso, sendo que geralmente o armazenamento deste tipo de energia requiere a sua conversão noutra forma de energia. Por outro lado, as flutuações sazonais e diárias dos recursos de energia renováveis complicam a sua utilização. O facto de a energia poder ser portada e armazenada abre outros horizontes no campo da energia.

O estudo do armazenamento de energia térmica é essencial para responder à problemática do desfasamento entre a captação de energia solar e a sua demanda.

1.1 Enquadramento do projeto e motivação

Esta dissertação surge no seguimento do trabalho desenvolvido pela unidade de Energia do INEGI no estudo de sistemas de armazenamento de energia térmica, utilizando materiais de mudança de fase, com o propósito de terem uma utilização integrada em sistemas solares térmicos com concentração para fornecimento de calor a processos industriais.

Este trabalho procura contribuir para esse desenvolvimento, propondo-se o estudo de alguns dos materiais de mudança de fase e das geometrias mais adequadas da unidade de armazenamento de energia térmica, tendo em conta a uma gama média de temperaturas utilizada na indústria (120 a 250 °C).

1.2 INEGI

O INEGI – Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial é um Instituto de novas tecnologias vocacionado para a realização de atividade investigação, inovação de base tecnológica e transferência de tecnologia. Nasceu em 1986 por iniciativa do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), com a qual mantém ainda hoje uma relação privilegiada. É uma associação privada sem fins lucrativos com o estatuto de Utilidade Pública (INEGI, 2011).

Esta dissertação está inserida num projeto da unidade Energia, o projeto SHIP. Esta unidade tem como principal objetivo promover nos setores industrial e de serviços a sua sustentabilidade e ecoeficiência, através da implementação de conceitos de economia circular, da racionalização dos consumos energéticos, da integração direta de fontes de energias renováveis e da diminuição de desperdícios, valorização energética e recuperação de resíduos e dela faz parte o laboratório de combustão onde se desenvolveu o trabalho experimental desta tese (INEGI, 2017).

1.3 Objetivos do projeto

Os principais objetivos desta dissertação são os seguintes:

- Escolha do material de mudança de fase a ser utilizado para a acumulação térmica a temperaturas da ordem dos 120 °C-250 °C;
- Análise dos materiais compatíveis a serem empregues no encapsulamento;
- Avaliação de algumas geometrias e dimensões de encapsulamento mais adequadas para a transferência de calor;
- Construção e teste de uma cápsula, tendo em consideração a configuração e dimensão da instalação a erguer na instalação fabril para a qual se pretende aplicar esta tecnologia;
- Teste do desempenho da cápsula empregando a instalação laboratorial de materiais de mudança de fase existente do laboratório de combustão do INEGI.

1.4 Método seguido no estudo

A metodologia adotada para a realização desta dissertação foi conduzida do seguinte modo:

- Levantamento de informação acerca dos materiais de mudança de fase para temperaturas médias, principalmente do seu comportamento, das instalações utilizadas para o seu estudo e das dificuldades que é necessário superar. Seleção do material de mudança de fase mais apropriado para a gama de temperaturas requerida;
- Levantamento de informação acerca das geometrias mais utilizadas para unidades de acumulação de energia térmica, o material com que são construídas e a compatibilidade desses materiais com os diferentes materiais de mudança de fase. Seleção da geometria, e material mais adequado de acordo com o material de mudança de fase escolhido anteriormente;
- Adaptação da unidade laboratorial de acumulação de energia térmica por materiais de mudança de fase existente no INEGI para o teste da cápsula que se construiu.
- Realização de testes à cápsula de acumulação de energia térmica e posterior análise aos dados obtidos.

1.5 Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em sete capítulos, começando-se por referir o no primeiro capítulo o elevado interesse do estudo de materiais de mudança de fase, dentro do tópico de armazenamento de energia térmica. Seguidamente, dedica-se um capítulo à contextualização do estado da arte neste tipo de matéria, incluindo informação atual de diversos estudos realizados recentemente no sentido do avanço tecnológico da área.

O terceiro capítulo, descreve a instalação ajustada a partir da instalação existente no INEGI. É feita uma descrição extensiva dos diversos componentes constituintes, os circuitos e o seu funcionamento.

No capítulo seguinte são apresentadas as propriedades do material de mudança de fase escolhido para os testes, assim como, as características da cápsula, a localização das tomadas de temperatura, e o sistema alhetado que foi construído e instalado no interior da cápsula.

No capítulo cinco são apresentados os testes realizados no estudo ao material de mudança de fase, analisando e comparando o seu comportamento nos diversos ensaios durante o processo de fusão e solidificação.

O sexto capítulo apresenta um sumário das conclusões da análise feita aos ensaios realizados ao material de mudança de fase, comparando-se a influência dos diferentes parâmetros alterados, concluindo-se qual a configuração que otimiza o processo de transferência de calor. Por último, no capítulo sete são propostos trabalhos pertinentes que poderão dar continuidade aos estudos realizados nesta dissertação.

2 Estado da Arte

2.1 Armazenamento de Energia

Os métodos de armazenamento de energia podem variar consoante as suas aplicações, podendo alguns ser específicos para determinadas situações, enquanto outros são aplicáveis numa gama muito ampla. O fator de sucesso passa sobretudo por utilizar a tecnologia adequada para cada aplicação.

Como se pode observar na Figura 2.1, a cadeia tradicional de energia tem cinco etapas: a fonte de energia, a geração, a transmissão, a distribuição e o dispositivo de energia do consumidor. Os sistemas de armazenamento têm potencial para reinventar a cadeia de energia, desde as fontes de energia ao seu consumo. Estes sistemas proporcionam outras possibilidades, nomeadamente a capacidade de estabilizar e controlar o fornecimento de energia aos utilizadores com flexibilidade espacial e temporal.

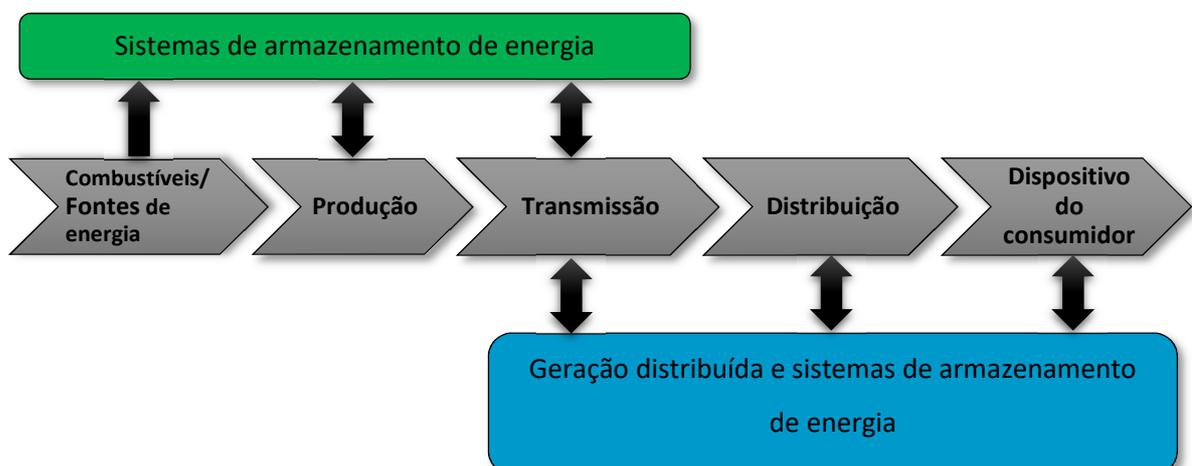


Figura 2.1- Cadeia de energia com integração dos sistemas de armazenamento de energia .

Segundo dados publicados pela *International Energy Agency* (2017) nos países da OCDE, em 2016, o setor da indústria foi responsável por 31% da energia consumida, sendo assim um dos setores com maior consumo, apenas superado pelo setor dos transportes cujo que consumiu 34% da energia. Já em Portugal o setor da Indústria é o maior responsável pelo consumo de energia consumindo uma fatia correspondente a 36,70% do consumo total de energia, como se pode constatar na Figura 2.2.

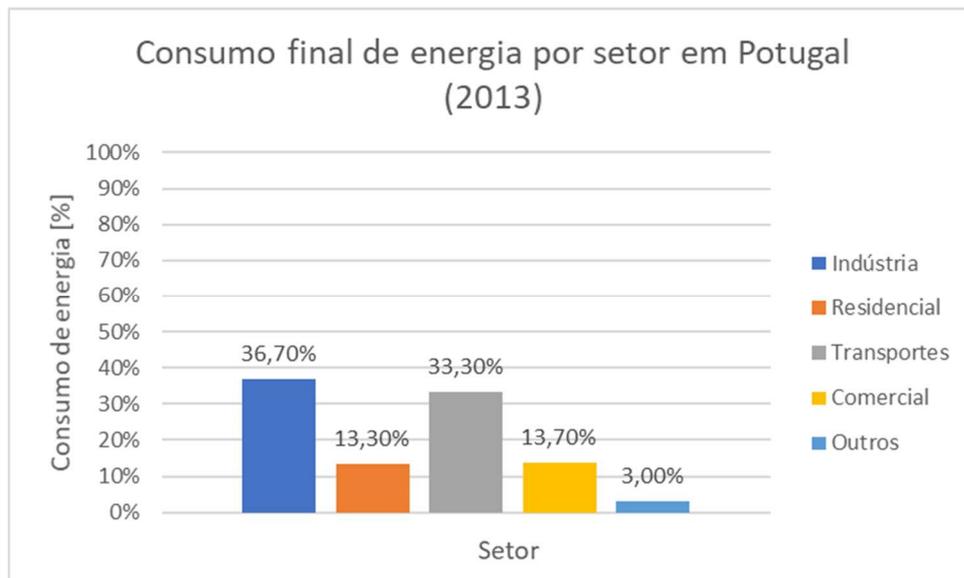


Figura 2.2- Distribuição do consumo de energia em Portugal (International Energy Agency, 2016).

Relativamente às fontes de energia renováveis a sua utilização é de grande interesse e tem sido incentivada, visto que apresenta inúmeros benefícios como o seu baixo impacto ambiental e o seu carácter inesgotável. Outro atributo destas fontes de energia é a sua presença física, nas suas diversas formas (energia hídrica, solar, eólica, geotérmica) em todas as partes do mundo, mesmo em países em desenvolvimento onde a falta de recursos não permite a construção de centrais elétricas e redes de distribuição. Contudo, devido ao carácter intermitente das fontes de energia renovável é necessário desenvolver e otimizar os métodos de armazenamento de energia de modo a compatibilizar os períodos de produção com os períodos de consumo energético.

São conhecidos os problemas de sazonalidade e de desfasamento entre a oferta e a procura, como é por exemplo a utilização de energia solar térmica, Figura 2.3. Problemas similares surgem em sistemas de recuperação de calor onde a disponibilidade e utilização do calor podem díspares, necessitando assim de sistemas de armazenamento de energia.

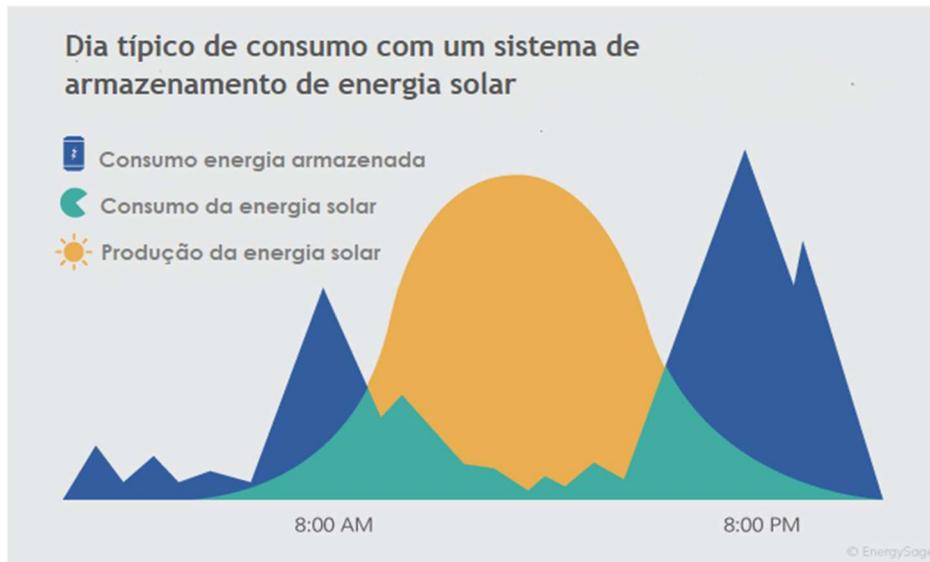


Figura 2.3- Diagrama de consumo/geração de energia solar num dia típico (EnergySage, 2017).

Compreende-se assim que apesar de haver alternativas à utilização de energia fóssil, a existência de sistemas eficazes de armazenamento de energia é fundamental para o sucesso da utilização de energia renovável na indústria portuguesa.

Os sistemas de armazenamento de energia podem ser divididos em cinco categorias principais: armazenamento de energia mecânica, química, eletroquímica, elétrica e térmica.

2.1.1 Armazenamento de Energia Mecânica

A maior vantagem do armazenamento de energia mecânica é a facilidade em fornecer a energia sempre que requerida para trabalhos mecânicos. Os métodos de armazenamento de energia mecânica são facilmente adaptáveis para converter e armazenar energia das ondas e energia hídrica. Estes métodos normalmente incluem volantes de inércia, gás comprimido e bombagem hidroelétrica (Guney e Tepe, 2017).

No caso do armazenamento de energia mecânica através da utilização de volantes de inércia (FES- *Flywheel energy storage*), existe um volante de inércia ligado a um veio e suportado por um estator que pode ser acionado por um motor ou gerador. Este dispositivo, ilustrado pela Figura 2.4, funciona como um motor quando alimentado por energia elétrica e como um gerador quando conduzido pela energia mecânica. Quando a energia é necessária, a rotação aciona o gerador para produzir eletricidade. Quando está em descarga o volante diminui a sua velocidade de rotação. Este volante é capaz de armazenar energia mecânica na forma de energia cinética da massa a altas rotações.

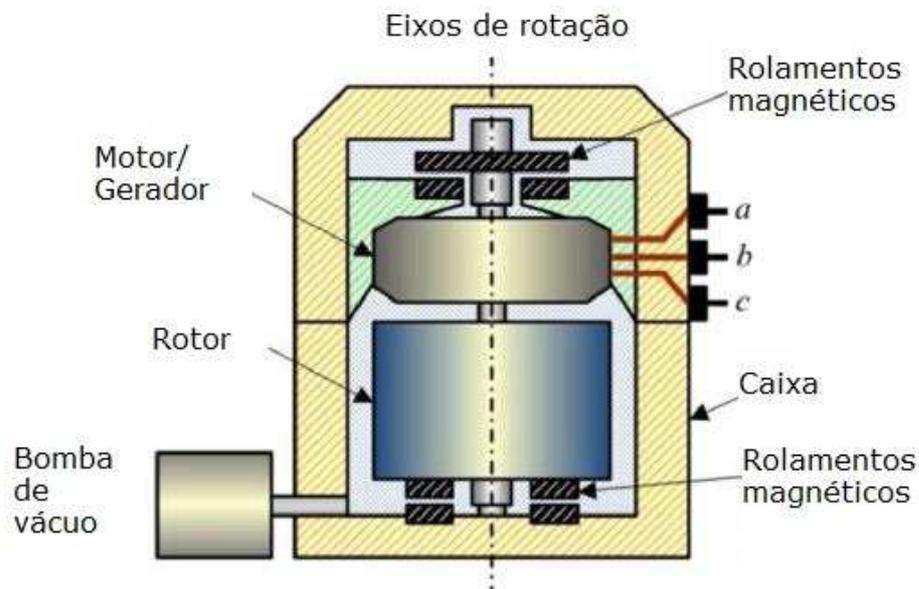


Figura 2.4- Esquema dos elementos constituintes de um volante de inércia (Guney e Tepe, 2017).

No armazenamento por bombagem hidroelétrica (PHES- *Pumped hydro energy storage*) a energia é armazenada e gerada através do escoamento de água entre dois reservatórios a cotas diferentes. Como se pode observar na Figura 2.5- Esquema de funcionamento de uma planta de bombagem hidroelétrica (Guney e Tepe, 2017). , quando a água escoa do reservatório com a cota mais alta para o reservatório de cota inferior a utilização de turbinas permite a geração de eletricidade. Se estas turbinas tiverem a função de bombagem poderão funcionar em sentido inverso, sendo desta forma possível transportar a água das cotas mais baixas para as cotas mais elevadas e converter-se assim a energia elétrica em energia potencial da água (Costa, 2014). Este método tem sido uma maneira económica de se utilizar e acumular parte da energia elétrica disponível nas horas de vazio (Barbour *et al.*, 2016).



Figura 2.5- Esquema de funcionamento de uma planta de bombagem hidroelétrica (Guney e Tepe, 2017).

Os sistemas convencionais de armazenamento de energia por gás comprimido, também apelidados por CAES (*Compressed air energy storage*), utilizam um compressor para pressurizar ar e bombeiam esse ar para um reservatório usualmente no subsolo. Uma inclusão destes sistemas na distribuição de energia está representada na Figura 2.6. Compressor, reservatório de ar e depósito de expansão são os três componentes principais destes sistemas.

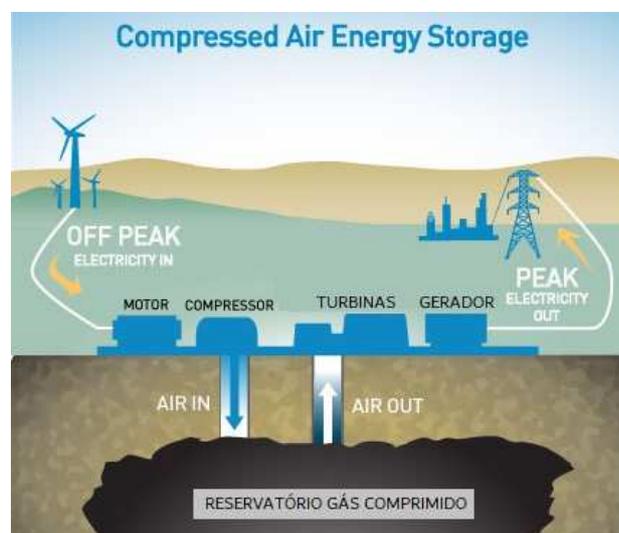


Figura 2.6- Armazenamento de energia por gás comprimido (PG&E, 2017).

2.1.2 Armazenamento de Energia Química

A energia química é armazenada na forma de ligações químicas entre átomos e moléculas, e essa energia pode apenas ser observada quando é libertada numa reação química. Geralmente, depois dessa reação a substância transforma-se noutra completamente diferente. Combustíveis químicos são a forma mais dominante de armazenamento de energia seja na geração de eletricidade ou no transporte de energia.

Os combustíveis químicos mais frequentemente processados são carvão, gasolina, gásóleo, gás natural, propano, butano, etanol, biodiesel e hidrogénio. A energia química armazenada pode ser libertada através das reações de transferência de eletrões para a produção direta de eletricidade, através de células de combustível. O armazenamento de energia química é adequado para armazenamento de longa duração e quantidade (Guney e Tepe, 2017).

O hidrogénio é um vetor energético com uma energia química de 142 MJ/kg, valor superior a qualquer outro combustível de hidrocarbonetos, que pode ser obtido através da termólise e eletrólise da água, gaseificação da biomassa, metanol, entre outros.

Um sistema de armazenamento de hidrogénio (HES- *Hydrogen energy storage*) típico é constituído por um eletrolisador, um tanque de armazenamento de hidrogénio e uma célula de combustível. Um eletrolisador é um conversor que quebra as ligações moleculares da água, com a ajuda de eletricidade, separando-a em hidrogénio e oxigénio. Para gerar energia os dois gases reagem na célula de combustível numa reação eletroquímica que é oposta à eletrólise da água, voltando a formar água, libertando calor e produzindo eletricidade (Niaz *et al.*, 2015).

2.1.3 Armazenamento de Energia Eletroquímica

A energia eletroquímica é o resultado da transformação da energia química em energia elétrica. Envolve no mínimo dois reagentes e a energia resultante desta reação está disponível na forma de corrente elétrica.

As baterias ou pilhas convertem a energia química contida nos seus componentes em energia elétrica por uma reação eletroquímica de oxidação-redução. Esta reação pode ser irreversível, no caso das baterias primárias que não são recarregáveis como é o caso das pilhas alcalinas. As baterias secundárias podem ser recarregadas como são exemplo caso as baterias presentes nos automóveis.

As baterias (BES- *Battery energy storage*) são um dos melhores tipos de armazenamento em termos de custo-benefício. Um sistema de baterias é constituído por módulos de baterias ligados em paralelo e em série. O carregamento destas acontece quando no seu interior se dão reações químicas sob um potencial aplicado aos terminais. Enquanto que o descarregamento acontece na reação química inversa. Alguns dos tipos mais importantes de baterias recarregáveis são as de chumbo-ácido (Figura 2.7), íões de lítio, níquel-cádmio, sódio-enxofre (Alotto *et al.*, 2014).

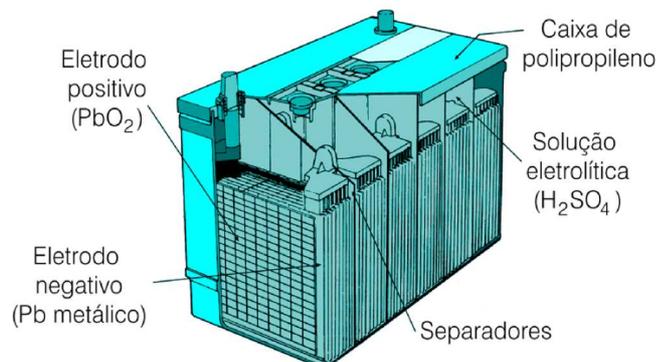


Figura 2.7- Bateria chumbo/ácido (SBQ, 2017).

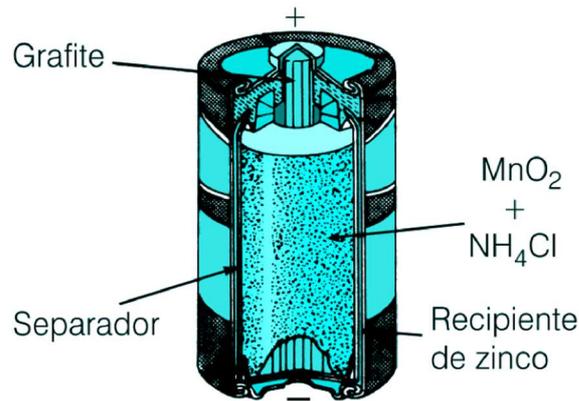


Figura 2.8- Pilha de zinco/dióxido de manganês (SBQ, 2017)

As vantagens da utilização de baterias para armazenamento incluem a sua elevada densidade de energia, a elevada capacidade energética, a eficiência de utilização, a boa capacidade cíclica das baterias e a boa relação custo inicial/tempo de vida.

2.1.4 Armazenamento de Energia Elétrica

O armazenamento de energia elétrica inclui métodos de armazenamento eletrostático como os condensadores e supercondensadores e sistemas de armazenamento de energia magnéticos/de corrente. Os condensadores são o método mais direto para armazenar eletricidade, podendo ser utilizados no caso de altas correntes em períodos de tempo extremamente curtos, dada a sua baixa capacitância.

Um condensador é constituído por duas placas de metal separadas por uma camada não condutora, que sob a atuação de um campo elétrico exterior permite o fluxo da corrente elétrica, denominada dielétrica. A capacidade de um material dielétrico polarizar é quantificada por uma constante apelidada permissividade. À medida que uma placa é carregada com corrente por uma fonte direta, a outra placa vai ter induzida uma corrente com sinal oposto. É favorável utilizar materiais dielétricos com alta permissividade pois permitem o armazenamento de carga elétrica com campos elétricos menores, aumentando a capacitância do condensador (Chen *et al.*, 2009).

Os supercondensadores ou condensadores de dupla camada, funcionam de uma maneira idêntica aos condensadores, mas utilizam uma camada mais fina de material dielétrico e contêm eletrodos porosos e com elevada área superficial. Um esquema destes supercondensadores encontra-se ilustrado na Figura 2.9- Esquema de um supercondensador Como consequência da reduzida distância entre as placas (menos de 1 mm) e elevada área de contacto os supercondensadores têm elevada capacidade de armazenamento ou capacitância (Rohit *et al.*, 2017).

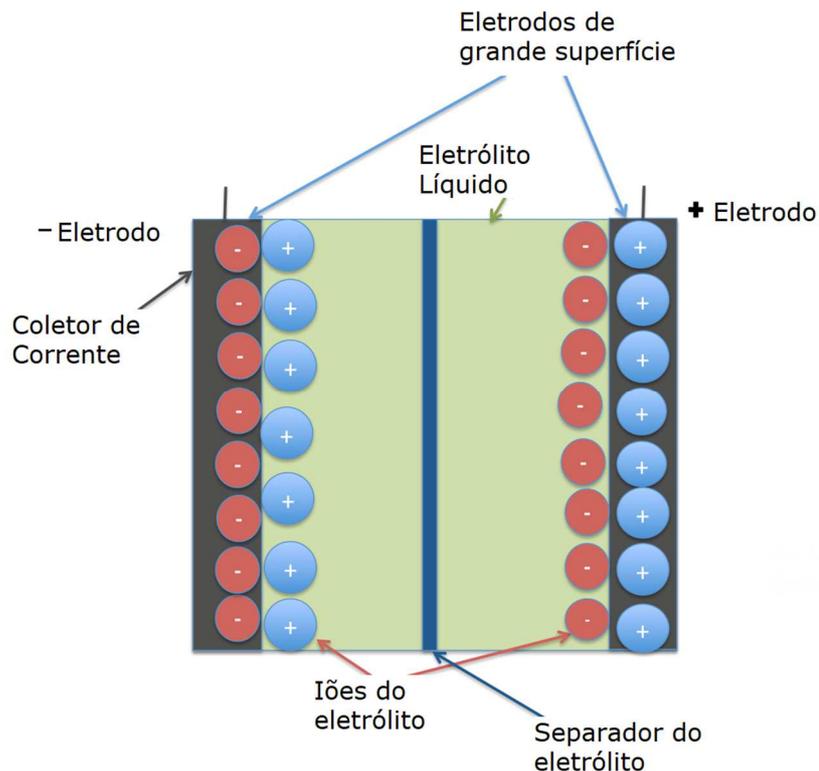


Figura 2.9- Esquema de um supercondensador (Aslani, 2012).

Os benefícios da utilização de supercondensadores incluem a sua elevada capacitância, baixa resistência interna, rápida carga e descarga, alta eficiência de armazenamento de energia, baixo custo por ciclo e longo tempo de vida. Este tipo de condensadores pode ser recarregado e descarregado milhões de vezes sem qualquer dano (contrariamente às baterias).

Existem ainda sistemas de armazenamento de energia magnética por supercondução também denominados de SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*) que se baseiam em princípios eletrodinâmicos. Neste caso, a energia é armazenada num campo magnético criado pela passagem de corrente elétrica numa bobina supercondutora que está criogenicamente congelada e é assim mantida a uma temperatura abaixo da sua temperatura crítica supercondutora. Normalmente o material da bobina é nióbio-titânio e esta é arrefecida por um fluido refrigerante que é geralmente hélio ou azoto líquido (Figura 2.10). A energia armazenada pode ser reintroduzida para a rede através da descarga da bobina (Energy Storage Council, 2015).

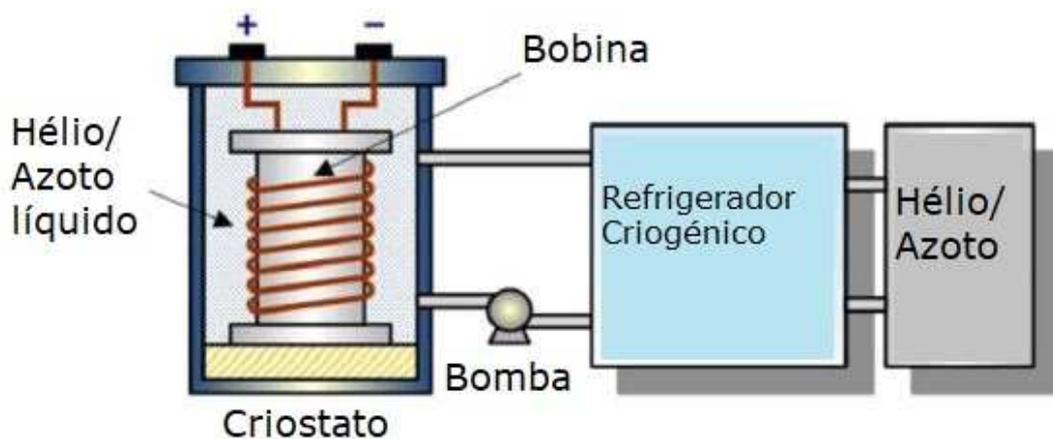


Figura 2.10- Esquema de um sistema de armazenamento de energia magnético (Guney e Tepe, 2017).

As principais vantagens deste tipo de armazenamento é a rapidez de resposta, ou seja, a energia está disponível imediatamente. O armazenamento de energia magnético é um processo com elevados custos e com alguns problemas ecológicos (Guney e Tepe, 2017).

Na Tabela 2.1 apresenta-se uma análise comparativa relativa às tecnologias de armazenamento de energia abordadas até agora, sobre os diferentes valores de eficiência, custo, expectativa de vida e densidade de energia.

Tabela 2.1- Análise comparativa de diferentes tecnologias para armazenamento de energia (Parfomak, 2012, International Energy Agency, 2014, Rohit *et al.*, 2017)

Tecnologia	Energia Saída	Eficiência	Custo- USD/kW (2017)	Tempo de vida- anos	Aplicação	Energia específica Wh/kg (MJ/m³)
Bombagem Hidroelétrica	Eletricidade	50-85%	500-4600	40-60	Longo prazo	0,5-1,5 (1,8-5,4)
Gás comprimido	Eletricidade	27-70%	500-1500	20-40	Longo prazo	30-60 (10,8-21,6)
Baterias	Eletricidade	75-95%	300-3500	5-20	Curto prazo	30- 240 (180-900)
Hidrogénio	Eletricidade	30-50%	500-750	5-15	Longo prazo	800-10000 (1800-10800)
Volantes de Inércia	Eletricidade	90-95%	130-500	15	Curto prazo	10-30
Supercondensadores	Eletricidade	90-95%	130-500	20+	Curto prazo	2,5-15 (36-108)
Arm. Magnético (SMES)	Eletricidade	90-95%	130-500	20+	Curto prazo	0,5-5

Não existe nenhuma tecnologia de armazenamento de energia completamente ideal. Dependendo dos objetivos pretendidos para cada aplicação e dependendo de fatores como o custo e impacto ambiental, pode ser selecionada a tecnologia mais adequada para cada situação.

Na Figura 2.11 estão representadas as potências debitadas em função dos vários métodos de armazenamento em função da respetiva capacidade. Verifica-se que os processos de armazenamento de energia com base na utilização de hidrogénio, bombagem hidroelétrica e ar comprimido têm uma elevada capacidade de armazenamento, contrariamente a tecnologias como a SMES, supercondensadores e volantes de inércia, que possuem um tempo de resposta muito curto. Já as baterias e o ar comprimido apresentam uma capacidade de armazenamento de energia mediana. (Rohit *et al.*, 2017).

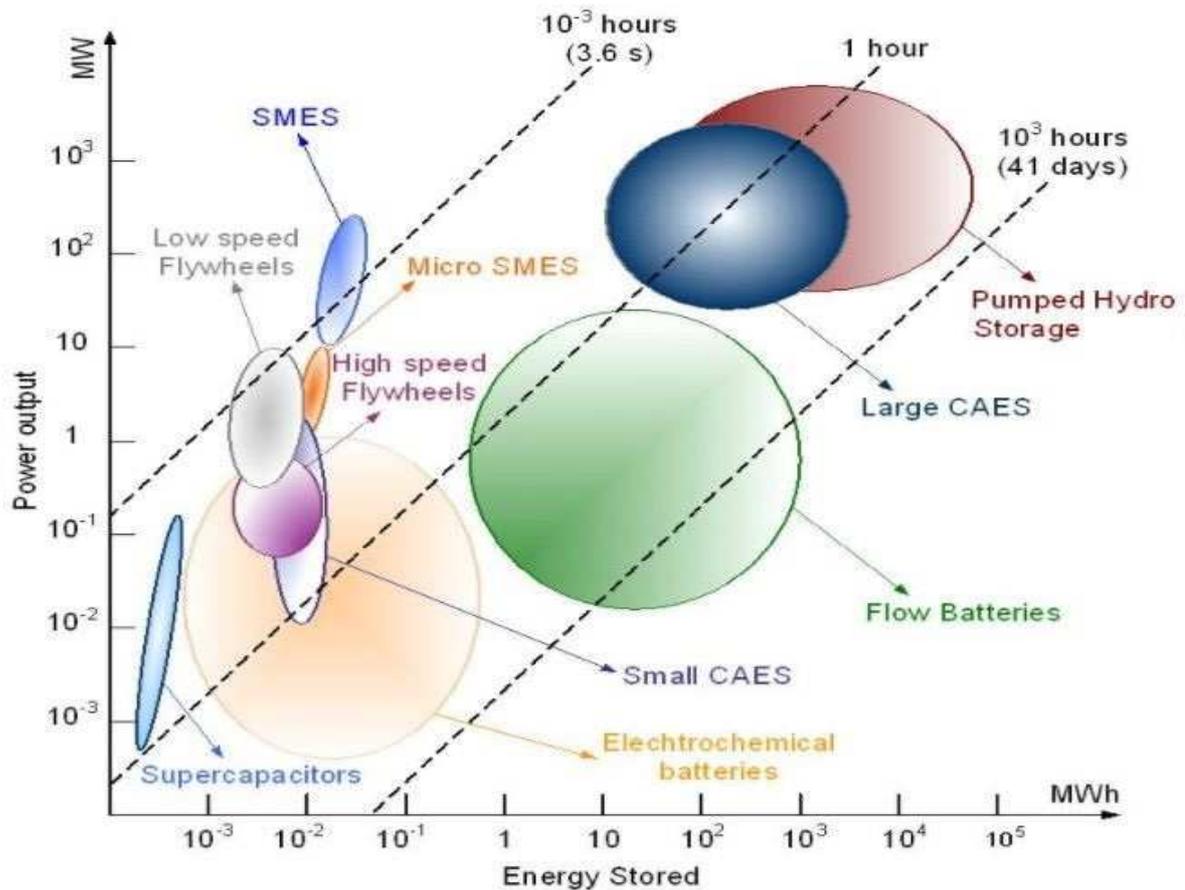


Figura 2.11- Diferentes métodos de armazenamento de energia de acordo com a sua capacidade e potência debitada (Ibrahim e Ilinca, 2013).

As tecnologias de bombagem hidroelétrica e gás comprimido são adequadas para gestão de geração de energia de larga escala, devido ao seu tempo de descarga. Sistemas de resposta rápida como é o caso do armazenamento magnético, os supercondensadores e os volantes de inércia, são ideais para inserir em sistemas cíclicos e que necessitem de atenuação de oscilações de corrente.

Relativamente aos custos, de sistemas como a bombagem hidroelétrica, gás comprimido, baterias e utilização de hidrogénio são mais dispendiosos do que a utilização de volantes de inércia, supercondensadores e armazenamento magnético.

Os sistemas como o gás comprimido e bombagem elétrica apresentam longos tempos de vida, contrastando com aplicações de armazenamento de energia como as baterias e o volante de inércia.

2.1.5 Armazenamento de Energia Térmica

Os métodos de armazenamento de energia térmica podem ser classificados tendo em conta o período da duração do armazenamento, Figura 2.12.

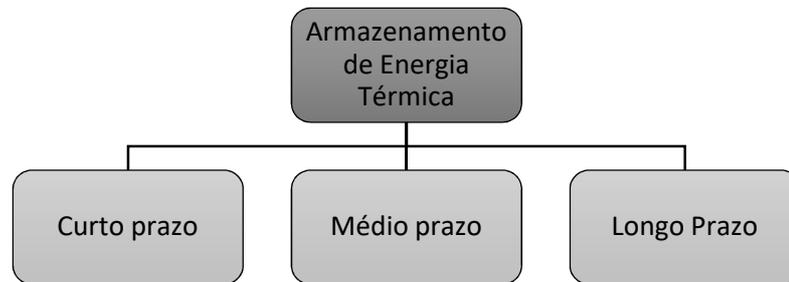


Figura 2.12- Classificação dos tipos de armazenamento de energia térmica.

O armazenamento de energia térmica de curto prazo é uma solução para armazenar a energia disponível nas horas de vazio e utilizá-la para eliminar os picos de procura entre algumas horas até um dia. O armazenamento de curto prazo é também apelidado de armazenamento diurno. O armazenamento de médio prazo é quando há a possibilidade de transferir calor residual ou cargas sazonais de energia com atraso de semanas ou vários meses. Armazenamentos de longo prazo tiram partido das variações climáticas sazonais e são normalmente referidos como armazenamento anuais ou sazonais. Este tipo de armazenamento é caracterizado pela grande capacidade que solicita (Costa, 2014).

Como ilustrado na Figura 2.13, o armazenamento da energia térmica pode ser atingido através de três modos distintos de calor: sensível, latente e termoquímico.

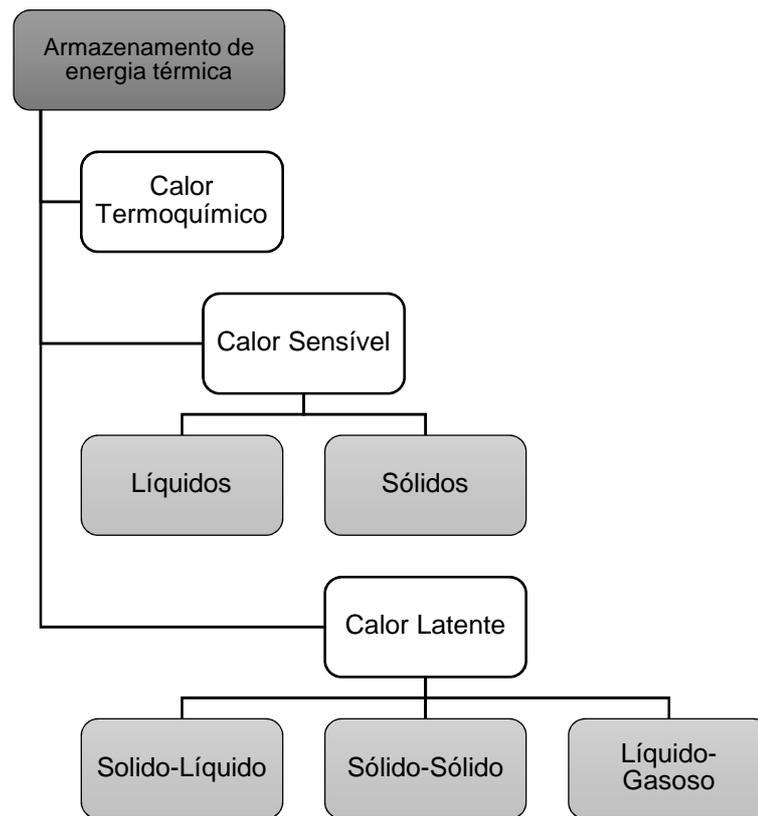


Figura 2.13- Tipos de armazenamento de energia térmica relativamente ao tipo de calor.

2.1.5.1 Sistemas de Armazenamento de Calor Termoquímico

O armazenamento de calor termoquímico utiliza uma fonte de calor que induz uma reação química reversível ou um processo de absorção e adsorção. Algumas das vantagens destes sistemas incluem alta energia específica volúmica (aproximadamente 1000 MJ/m^3) e perdas de calor desprezáveis (Lizana *et al.*, 2017).

Como ilustrado na Figura 2.14, esta forma de armazenamento envolve uma reação na qual o calor é armazenado durante a fase endotérmica da reação e libertado durante a fase exotérmica. Durante a fase de carga, a energia térmica é usada para desassociar um reagente químico em produtos numa reação que é endotérmica. Os produtos são armazenados separadamente até à necessidade de energia. Na fase de descarga, os produtos são misturados e reagem de forma a criar novamente os reagentes iniciais. Esta fase de descarga acontece numa reação que é exotérmica. O calor libertado durante a reação é utilizado como uma fonte de energia (Aneke e Wang, 2016).

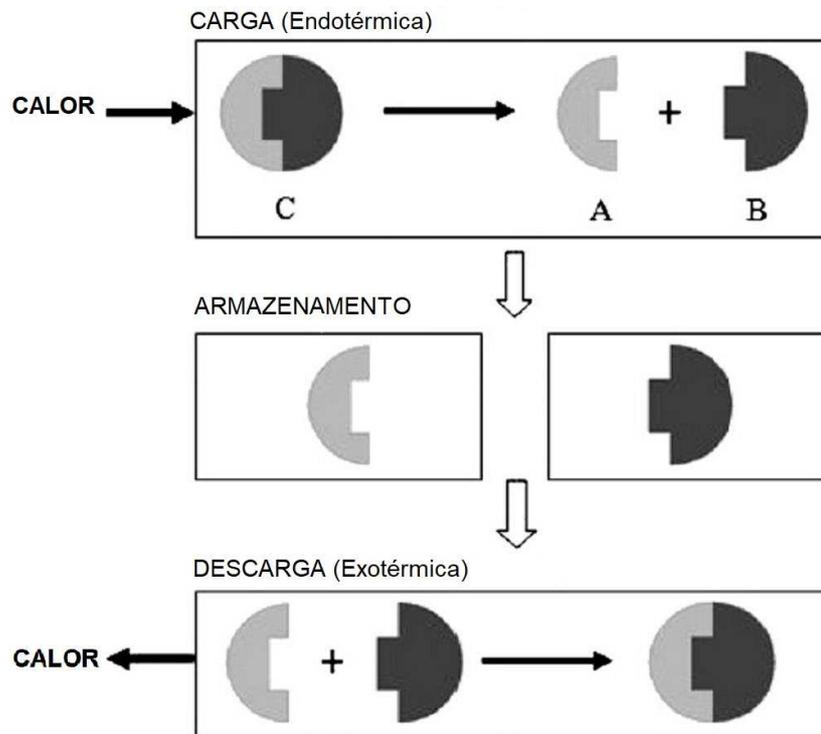


Figura 2.14- Representação esquemática de uma reação termoquímica (Aneke e Wang, 2016).

Adicionalmente, o armazenamento de energia térmica proveniente de processos termoquímicos pode incluir reações químicas, reações fotoquímicas, libertação de água de zeólitos e hidratos e produção de combustíveis.

Este tipo de método de armazenamento de energia térmica está ainda numa fase de investigação e estudo, sendo que alguns exemplos de materiais estudados incluem os materiais apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2- Materiais termoquímicos promissores (Mahlia *et al.*, 2014)

Material	Fórmula	A: reagente sólido B: fluido de trabalho	Energia específica volúmica [MJ/m ³]	Temperatura de carga [°C]
Sulfato de magnésio heptahidratado	MgSO ₄ · 7H ₂ O	A: MgSO ₄ B: H ₂ O	2800	122
Carbonato de ferro	FeCO ₃	A: FeO B: CO ₂	2600	180
Hidróxido de ferro	Fe(OH) ₂	A: FeO B: H ₂ O	2200	150

2.1.5.2 Sistemas de Armazenamento de Calor Sensível

O armazenamento de calor sensível consiste em fornecer energia a um determinado material para que este aumente a sua temperatura, sem que mude de estado. A quantidade de energia armazenada como calor sensível é dada pela equação 2.2.

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mc_p dT \quad (2.2)$$

Neste tipo de sistemas a quantidade de energia térmica armazenada depende da diferença de temperaturas, da capacidade térmica do material, e da quantidade de material aquecido. Os tempos de carga e descarga dependem da condutividade térmica, taxa de transferência de calor e da difusidade térmica. A difusidade térmica avalia a taxa a que uma determinada substância varia de temperatura e é dependente da condutividade térmica, da densidade e do calor específico. Pode ser calculada através da equação 2.3, em que, k , representa a condutividade térmica, ρ , representa a massa volúmica e c_p , o calor específico. (Lizana et al., 2017).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.3)$$

O meio de armazenamento pode ser um material no estado sólido ou líquidos. Alguns dos meios de armazenamento mais utilizados no armazenamento de calor sensível são água, tijolos, areia, leito de rochas, óleo e solo. Em sistemas de aquecimento solar, água é utilizada

como material de armazenamento em sistemas líquidos, enquanto que um leito de rochas é utilizado para sistemas de ar. A utilização de água como material de armazenamento tem inúmeras vantagens, como a sua disponibilidade e baixo custo, não ser tóxica nem inflamável, e apresentar boas características para transferência de calor. Contudo, a água a baixas temperaturas pode congelar e para temperaturas mais elevadas, entrar em ebulição. Por outro lado, a água é também corrosiva. Para combater estas desvantagens podem ser adicionados alguns químicos (Mahlia *et al.*, 2014).

Na Tabela 2.3 apresenta-se uma comparação de diversos materiais disponíveis para o armazenamento de calor sensível e as suas características.

Tabela 2.3- Materiais disponíveis para armazenamento sensível e as suas propriedades (Lizana *et al.*, 2017)

Material	Tipo	Massa volúmica [kg/m³]	Condutividade térmica [W/(m·°C)]	Calor específico [kJ/(kg·K)]
Óleo	líquido	888	0,14	1,88
Tijolo (cerâmico)	sólido	1800	0,73	0,92
Madeira	sólido	700	0,18	1,6
Gesso (estuque)	sólido	900	0,25	1
Betão	sólido	2000	1,35	1
Areia e gravilha	sólido	1700-2000	2	0,910- 1,180
Rochas	sólido	2800-1500	3,5-0,85	1
Pedra calcária	sólido	1600-2600	0,85-2,3	1
Barro	sólido	1200-1800	1,5	1670-2500
Água (80°C)	líquido	970	0,67	4,19
Água (40°C)	líquido	990	0,63	4,19
Água (10°C)	líquido	1000	0,6	4,19

2.1.5.3 Sistemas de Armazenamento de Calor Latente

O armazenamento de energia térmica através do calor latente baseia-se na quantidade de energia libertada e absorvida durante o processo de mudança de fase do material de armazenamento de sólido para líquido, líquido para gás ou vice-versa. O calor libertado ou absorvido num processo de mudança de fase é dado pela equação 2.4.

$$Q = m \times h_{mf} \quad (2.4)$$

Primeiramente o material é aquecido e a temperatura deste aumenta, absorvendo a energia térmica. Quando o material atinge uma gama específica de temperaturas, característica desse material, começa a fundir à medida que o material começa a experienciar uma transição de fase do estado sólido para líquido. Contudo, como se pode observar na Figura 2.15, este é um processo isotérmico, ou seja, durante o processo mudança de fase o material liberta e absorve calor a uma temperatura constante, contrariamente ao que acontece no armazenamento de calor sensível.

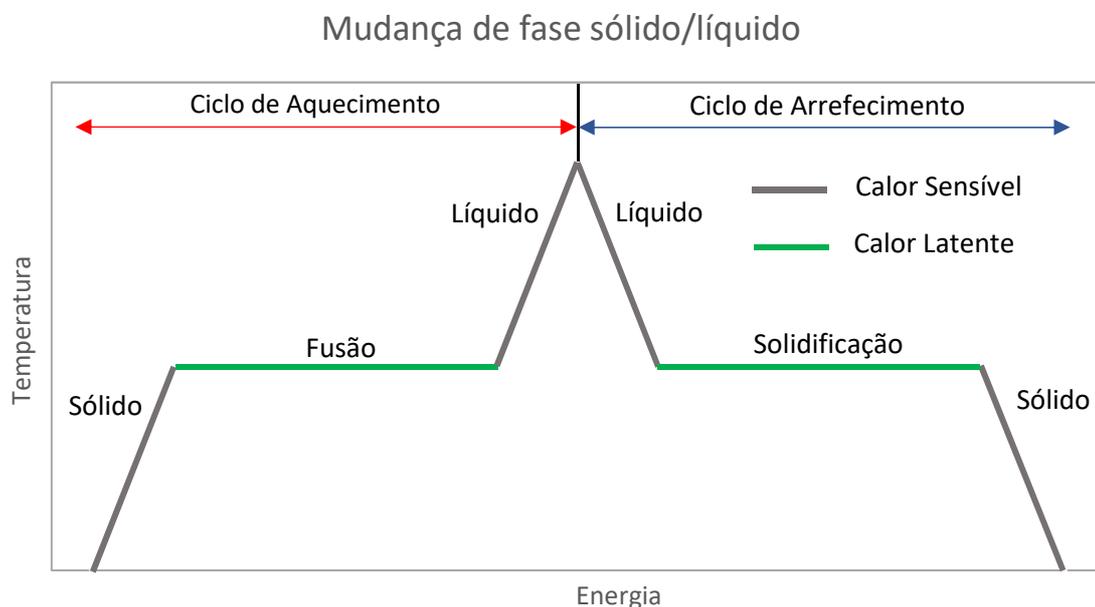


Figura 2.15- Temperatura para a mudança de fase sólido/líquido (Costa, 2014).

Existem vantagens evidentes no uso de materiais de mudança de fase ao invés de materiais de armazenamento sensível. Como ilustrado na Figura 2.16, o armazenamento de energia latente oferece uma energia específica de armazenamento térmico muito superior comparativamente à energia sensível, com uma diferença de temperatura praticamente nula.

Contudo algumas desvantagens podem ser apontadas no uso de materiais de mudança de fase como a baixa condutividade, principalmente na fase sólida, o fenómeno de sobreaquecimento, a instabilidade das propriedades destes materiais após vários ciclos e por vezes segregação de fase. A condutividade térmica é um elemento chave nos sistemas de armazenamento de calor latente, assim como a entalpia de mudança de fase, já que estes parâmetros determinam a capacidade de armazenamento.

Comparando então os três tipos diferentes de armazenamento de energia térmica, o calor sensível depende do calor específico do material em causa, e o armazenamento de calor latente está dependente da entalpia do material de mudança de fase e da capacidade de este armazenar energia térmica num justo intervalo de temperatura, obtendo-se assim maior densidade de energia do que seria possível obter com armazenamento de energia térmica sensível com o mesmo gradiente de temperatura. Contudo, no armazenamento de energia térmica latente, no processo de fusão podemos observar-se expansões volumétricas para alguns materiais da ordem dos 10-15% (Cunha e Eames, 2016).

O armazenamento termoquímico de calor é mais energético do que o armazenamento latente, mas uma vez que se baseia na absorção/libertação ou outras reações químicas, a cinética de reação e a geometria dos permutadores determinam a sua prestação, e requer temperaturas de carga e descarga distintas (normalmente entre 100°C e 300°C), sendo um método potencialmente interessante para aplicações de armazenamento sazonal (Cunha e Eames, 2016).

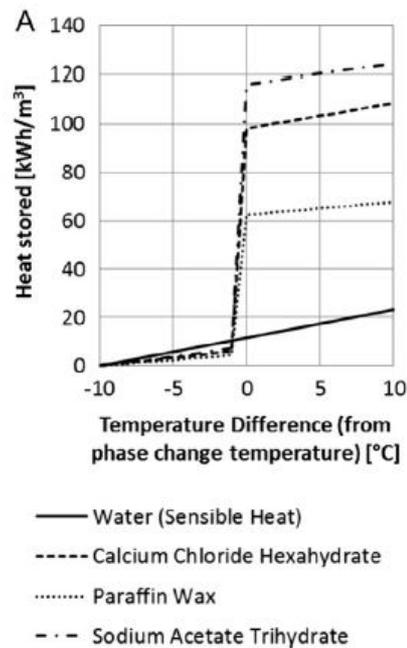


Figura 2.16- Diagrama energia térmica armazenada vs. temperatura para três materiais de mudança de fase e um sistema de armazenamento de energia sensível utilizando água (Cunha e Eames, 2016).

A Figura 2.16 expõe a capacidade de armazenamento térmico sensível com água, e três materiais de mudança de fase com mais de 20 °C de diferença. Constatou-se que o armazenamento de calor latente utilizando os materiais de mudança de fase armazena entre 2,5 a 6 vezes mais energia comparativamente ao uso da água.

2.2 Materiais de Mudança de Fase

2.3.1 Requisitos e Especificações

Dada a sua capacidade de libertar e absorver energia devido a sua mudança de estado físico, os materiais usados no armazenamento de calor latente são designados por materiais de mudança de fase (PCM – *Phase Change Materials*). Inicialmente o comportamento destes materiais é idêntico ao dos materiais de armazenamento de calor sensível, isto é, a temperatura aumenta linearmente com a entalpia do sistema. Contudo, quando se dá a mudança de fase, o calor é absorvido ou libertado num processo isotérmico se o material é puro ou numa gama mais ou menos estreita de temperaturas consoante o seu grau de pureza.

Tal como descrito na Figura 2.17, podem-se classificar os materiais de mudança de fase relativamente à transformação que estes sofrem podendo esta alteração ser do estado sólido para o estado líquido, de líquido para gás, de sólido para gás e ainda de sólido para sólido,

mudando a sua estrutura molecular. Destas quatro categorias, os materiais de mudança de fase líquido-gás e sólido-gás não são utilizados devido às elevadas expansões volumétricas e consequentes pressões elevadas devido à mudança para a fase gasosa (Khan *et al.*, 2017).

Como tal, neste trabalho dar-se-á mais ênfase ao estudo de materiais de mudança de fase sólido-líquido e sólido-sólido.

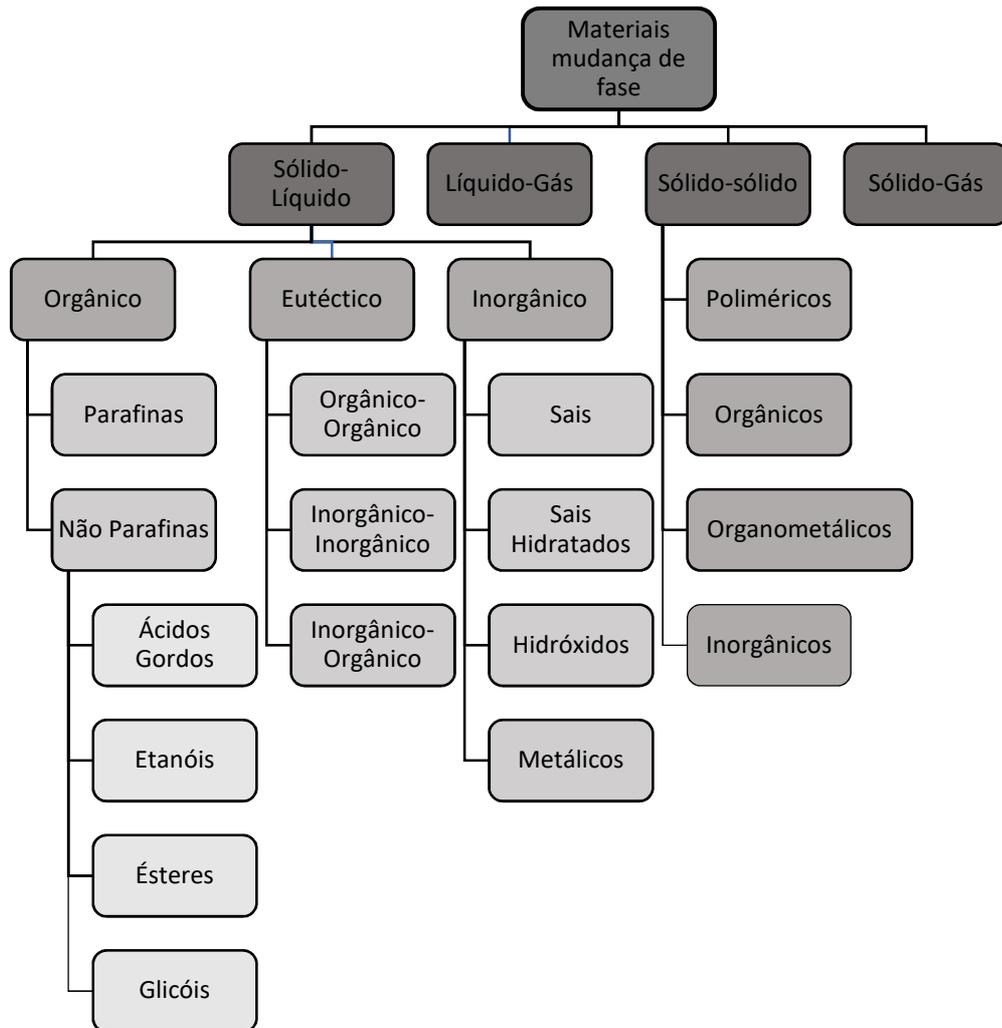


Figura 2.17- Classificação de materiais de mudança de fase (Khan *et al.*, 2017).

De maneira a que estes materiais possam ser aproveitados para a utilização em sistemas de armazenamento térmico é necessário que sejam dotados de determinadas características. As mais importantes são as propriedades térmicas, físicas, cinéticas, químicas e económicas, Figuras 2.18 a 2.21.

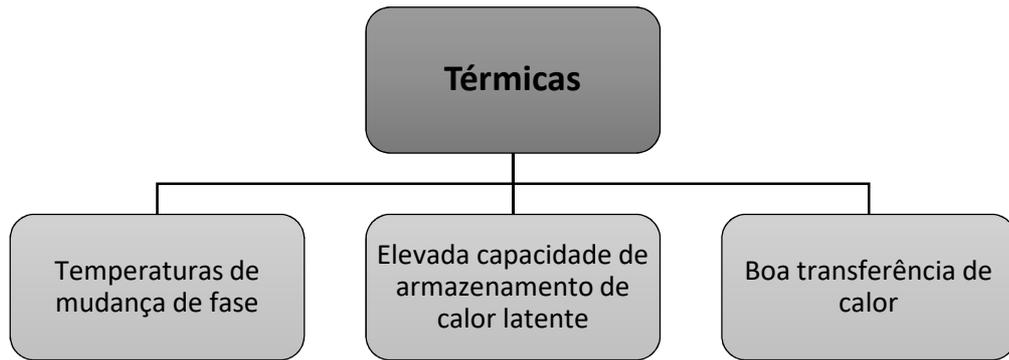


Figura 2.18- Requisitos térmicos de um material de mudança de fase.

A alta energia específica volúmica (MJ/m^3), diretamente relacionada com o alto calor latente por unidade de volume, possibilita que mais calor seja armazenado com menos material. A elevada condutividade térmica, em ambas as fases, acelera a transferência de calor, auxiliando no processo de carga e de descarga. A condutividade térmica é uma propriedade intrínseca ao material e quando a condutividade é baixa existem métodos para melhorar a transferência de calor. Como sumarizado na Figura 2.18.

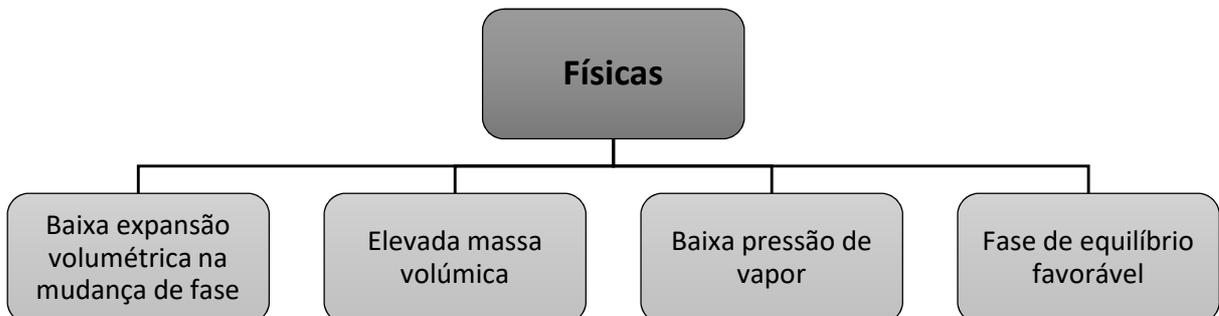


Figura 2.19- Requisitos físicos de um material de mudança de fase.

Na Figura 2.19 apresentam-se as características físicas desejáveis num material de mudança de fase. Uma baixa variação de volume na fase de transformação e uma reduzida pressão de vapor à temperatura de operação reduzem os problemas e o volume de armazenamento. Os materiais de mudança de fase podem sofrer degradação por perda de água, por decomposição química e ainda por incompatibilidade com os materiais de construção com os quais contactam.

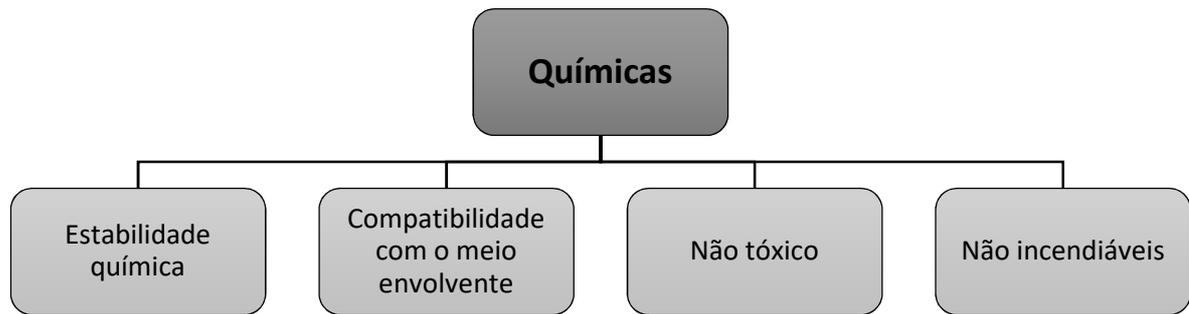


Figura 2.20- Características químicas favoráveis de um material de mudança de fase.

Relativamente as características químicas (Figura 2.20), a elevada estabilidade química permite que os materiais de mudança de fase consigam lidar com grandes oscilações de temperatura e que tenham mais durabilidade. Devem ser não tóxicos, não inflamáveis e não explosivos para não representarem um perigo para os habitantes ou para as propriedades. Os materiais devem ser não-corrosivos para serem mais facilmente armazenados e não requererem de recipientes ou armazenamento permutadores de calor com matérias especiais (Aydina *et al.*, 2015).

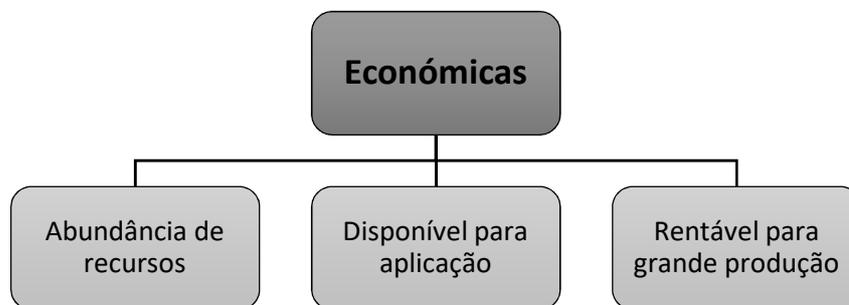


Figura 2.21- Características económicas favoráveis de um material de mudança de fase.

Tal como apresentado na Figura 2.21, as características económicas são também um fator decisivo na seleção de materiais de mudança de fase. O custo reduzido e a grande disponibilidade são dois fatores muito decisivos, por tornarem os sistemas mais atrativos para os utilizadores e possibilitarem a aquisição da substância aquando da primeira instalação e sempre que for necessária a sua substituição. Outro aspeto relevante necessário aos materiais de mudança de fase é uma vida útil longa, de modo que apresentem pouca ou nenhuma degradação após um grande número de ciclos de fusão. A nível ambiental é essencial que sejam recicláveis, pois não sendo o seu tempo de vida infinito, é importante verificar se os materiais podem ser reciclados quando acabarem o respetivo ciclo de vida (Sharma *et al.*, 2009).

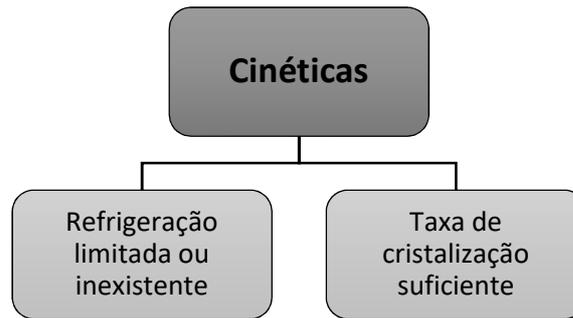


Figura 2.22- Propriedades cinéticas procuradas num material de mudança de fase.

No que diz respeito às propriedades cinéticas dos PCM's, Figura 2.22, os principais problemas encontrados na utilização de materiais de mudança de fase são os fenómenos de segregação de fase e sobrearrefecimento. Os materiais de mudança de fase devem derreter de modo congruente com o mínimo de sobrearrefecimento (Khan *et al.*, 2017).

Sobrarrefecimento

Alguns materiais de mudança de fase iniciam a sua cristalização apenas quando uma temperatura inferior à sua temperatura de fusão é atingida, Figura 2.23. Este fenómeno é denominado de sobrearrefecimento. O sobrearrefecimento é um problema sério na utilização destes materiais, já que torna necessário reduzir a temperatura do material abaixo da temperatura de mudança de fase, para que se inicie a cristalização e se liberte o calor latente armazenado no material. Se a nucleação não acontecer, o calor latente não é libertado e o material apenas armazena calor sensível. (Mohamed *et al.*, 2017)

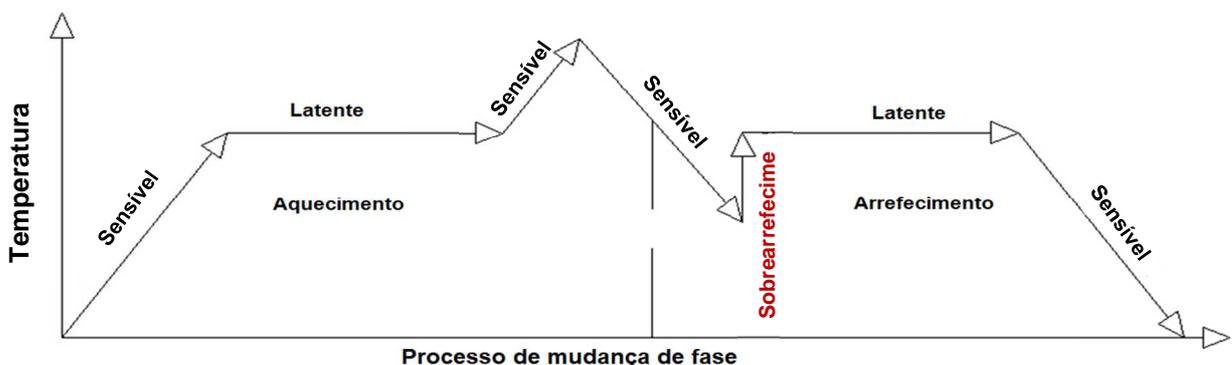


Figura 2.23- Degrau de sobrearrefecimento.

Fusão incongruente

No caso de materiais de mudança de fase como os sais hidratados existe a problemática da fusão incongruente. Este fenómeno ocorre quando o sal não é totalmente solúvel na sua água de hidratação à temperatura de fusão. Nestes casos a solução resultante permanece supersaturada à temperatura de fusão. O sal não dissolvido, detentor de maior densidade, deposita-se no fundo do recipiente e fica indisponível para intervir no processo inverso de arrefecimento, ocorrendo separação de fases. Isto resulta numa perda de reversibilidade do processo de mudança de fase do material em cada ciclo de carga-descarga (Xie *et al.*, 2017).

Alguns métodos adotados para combater estes fenómenos são:

- Adição de agentes espessantes;
- Agitação mecânica;
- Encapsulamento;
- Adição de agentes que ajudam na formação de núcleos de cristalização.

2.3.2 Classificação e propriedades

2.3.2.1 Materiais de mudança de fase sólido-sólido

Os materiais de mudança de fase sólido-sólido (SS-PCM's) absorvem e libertam calor através de transições de fase reversíveis entre uma fase (sólida) cristalina ou semi-cristalina e uma fase (sólida) amorfa ou semi-cristalina. A diferença entre os materiais de mudança de fase sólido-líquido e sólido-sólido é que os materiais de mudança de fase sólido-sólido mantêm as suas propriedades sólidas numa determinada gama de temperaturas. Este tipo de materiais é também apelidado de materiais de mudança de fase em estado sólido.

Materiais de mudança de fase sólido-sólido possuem um grande interesse prático para o armazenamento de energia térmica visto que evitam os problemas de fuga e contaminação que muitas vezes se tornam num desafio observado no caso dos materiais sólido-líquido. É possível a utilização de SS-PCM's sem necessidade de encapsulamento, como por exemplo para o armazenamento de energia térmica em materiais de construção como o betão ou estuque. Os SS-PCM's apresentam menos frequentemente segregação de fase e menores variações de volume o que prolonga a durabilidade deste material quando comparado com os materiais de mudança de fase sólido-líquido. (Fallahi *et al.*, 2017)

Dependendo da sua estrutura química e molecular, diferentes tipos de SS-PCM's apresentam diferentes transições de fases o que resulta numa vasta gama de entalpias, temperaturas de transição e de valores de condutividade térmica. Enquanto que para materiais de mudança de fase sólido-líquido existe uma vasta quantidade de informação e investigação na literatura, os materiais de mudança de fase sólido-sólido têm uma quantidade de informação extremamente escassa.

Existem quatro tipos de SS-PCM's tendo em conta as suas estruturas moleculares, os poliméricos, os orgânicos, os organometálicos e os inorgânicos. Os SS-PCM's poliméricos são concebidos através da ligação covalente de um composto de mudança de fase a uma cadeia polimérica. Moléculas orgânicas capazes de reorganizar as suas interações supramoleculares, tipicamente as ligações de hidrogénio, dependentemente da temperatura podem sofrer elevadas transições de fase endotérmicas. Exemplos deste tipo de materiais são o pentaeritritol, pentaglicerina, trimetilolpropano e o neopentil glicol. Os SS-PCM's organometálicos são organometálicos com camadas de perovskita (óxido de cálcio e titânio, CaTiO_3), são compostos por camadas inorgânicas e orgânicas alternadamente e possuem uma estrutura cristalina do tipo sanduíche como ilustrado na Figura 2.24.

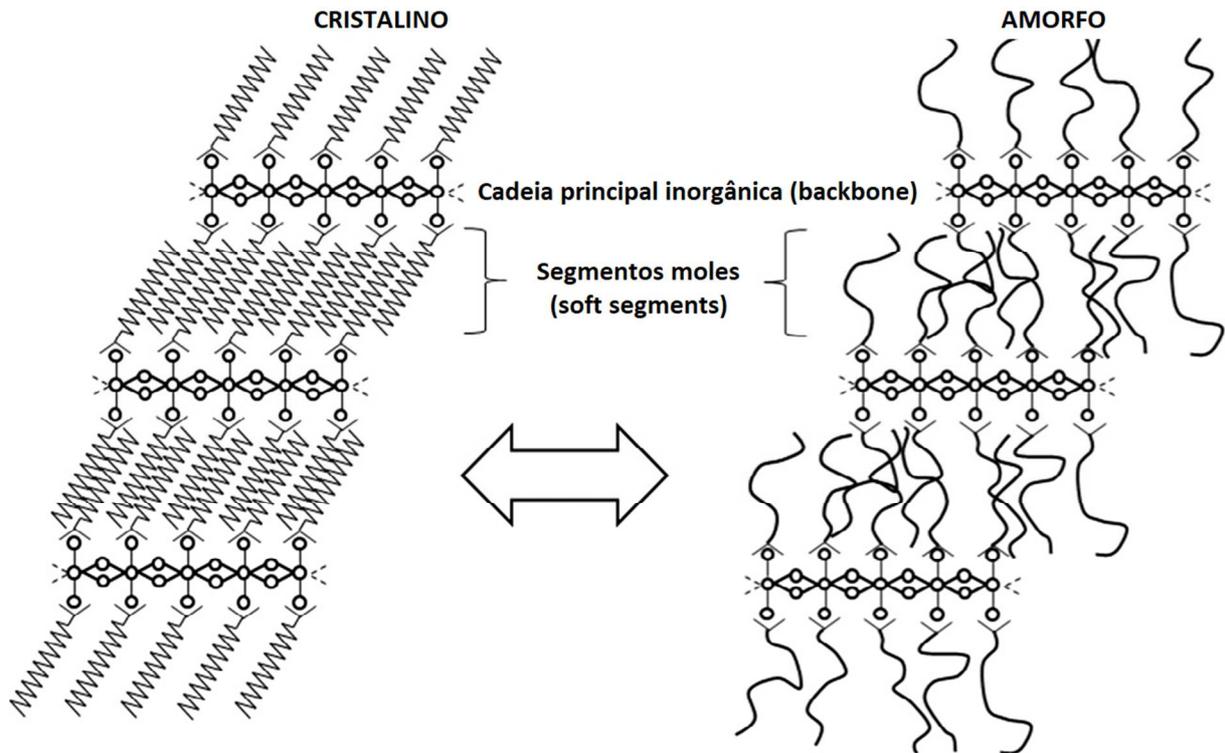


Figura 2.24- Representação esquemática de um SS-PCM's do tipo perovskita (Fallahi *et al.*, 2017, Ibrahim e Ilinca, 2013).

A transição de fase dos organometálicos apenas envolve as cadeias alquílica (isto é, a região orgânica ou as cadeias moles) enquanto as camadas inorgânicas permanecem estruturalmente iguais visto que são termicamente inertes. Quando absorvem energia as longas cadeias alquílicas derretem e sofrem uma transição de fase de uma formação ordenada para um estado desordenado. As regiões de hidrocarbonetos estão num estado líquido a altas temperaturas, mas o seu movimento lateral é restringido pela estrutura inorgânica e por isso todo o organometálico permanece no estado sólido.

Em geral o valor do calor latente dos SS-PCM's inorgânicos é inferior ao dos outros tipos de SS-PCM's. Na Tabela 2.4 é apresentada uma comparação relativa de diversas propriedades de diferentes tipos de materiais de mudança de fase solido-sólido.

Tabela 2.4- Comparação relativa das propriedades dos diferentes tipos de SS-PCM's (Fallahi *et al.*, 2017)

Propriedade	Polimérico	Orgânicos	Organometálicos	Inorgânicos
Temperatura de transição [°C]	11-65	25-190	32-160	680-988
Entalpia [J/g]	10-205	15-270	62-154	34-56
Condutividade térmica	+	+	+++	++++
Segregação de fase	++++	++	+++	++++
Estabilidade química e térmica	+++	+++	+++	++++
Variação volumétrica	++	++	++++	++++
Não-toxicidade	+++	+	++++	++++
Resistência ao fogo	+	+	++	++++
Facilidade de produção	+++	+++	+	++++

+ Baixa, ++ Satisfatória, +++ Boa, ++++ Excelente

2.3.2.2 Materiais de mudança de fase sólido-líquido

Após a classificação dos materiais de mudança de fase tendo em conta a mudança de estado que estes sofrem, os materiais sólido-líquido podem ainda ser classificados como orgânicos, eutéticos e inorgânicos.

Materiais de mudança de fase sólida para líquida modificam a sua estrutura molecular interna de um arranjo cristalino ordenado para uma estrutura amorfa quando a temperatura excede um valor crítico (temperatura de mudança de fase). Um aumento na vibração entre as moléculas, quebra ligações entre estas transformando o arranjo cristalino num estado líquido. Por outro lado, quando a temperatura desce para valores inferiores a temperatura de mudança de fase, inicia-se um processo de nucleação no qual as moléculas reorganizam-se numa estrutura cristalina. Estas mudanças de fase implicam uma expansão e contração volumétrica (Fallahi *et al.*, 2017).

Os materiais de mudança de fase orgânicos são assim denominados por terem átomos de carbono na sua estrutura. Estes compostos têm uma temperatura de mudança de fase estável sem segregação de fase, sem sobreaquecimentos, têm geralmente propriedades não corrosivas, tornando-se assim muito desejáveis em sistemas de armazenamento de energia solar. Os materiais orgânicos podem, por sua vez, ser classificados em parafinas e não-parafinas. As parafinas têm muitas características atraentes e alguns defeitos cruciais. Similarmente, as não-parafinas como ácidos gordos, etanóis, glicóis e ésteres também apresentam algumas propriedades não desejáveis. As parafinas são económicas e têm uma energia térmica específica de armazenamento de energia térmica moderada, possuem baixa condutividade térmica e por isso necessitam de métodos de melhoria da transferência de calor. Na Tabela 2.5 são apresentadas de uma forma sucinta, as vantagens e desvantagens das parafinas e das não parafinas.

Tabela 2.5- Características das parafinas e não-parafinas (Khan *et al.*, 2017).

	Vantagens	Desvantagens
Parafinas	Seguras Previsíveis Menos dispendiosas Não corrosivas	Elevadas variações volumétricas com mudança de fase
Não-Parafinas	Disponibilidade Durabilidade química Sobreaquecimento desprezável ou inexistente	Altamente inflamáveis Baixo calor de fusão Baixo ponto de fulgor Toxicidade Instáveis a altas temperaturas

Os materiais de mudança de fase inorgânicos são os mais usados em aplicações de altas temperaturas e o maior desafio que estes materiais apresentam é a sua manutenção. A baixas temperaturas estes materiais congelam e a altas temperaturas são difíceis de manusear. Estes materiais são sais e sais hidratados. Os sais e sais hidratados são os mais estudados e têm um elevado calor latente de fusão por unidade de volume, elevada condutividade térmica e menor variação volumétrica na transição de fase. Khan *et al.* (2017) enumeram algumas desvantagens dos sais hidratados como a ocorrência de sobreaquecimento, segregação de fase, a sua corrosividade e o seu elevado custo.

Os materiais eutéticos são composições de dois ou mais elementos que fundem e solidificam de modo congruente formando uma mistura cristalina. A percentagem mássica de cada material pode variar de modo a se obter a variação do ponto de fusão da mistura eutética resultante. Isto dota a mistura resultante de propriedades únicas permitindo alguma regulação da temperatura de fusão consoante o que se pretende para a aplicação.

Na Tabela 2.6 é feita uma comparação das vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de materiais de mudança de fase sólido-líquido. Os materiais de mudança de fase orgânicos possuem muitas vantagens face aos inorgânicos exceto o seu carácter inflamável e a baixa condutividade térmica. Por outro lado, os materiais inorgânicos são mais abundantes, não inflamáveis e apresentam alta capacidade de armazenamento de energia. Duas problemáticas na utilização de materiais inorgânicos são o sobreaquecimento e a segregação de fase. A maior vantagem na utilização de materiais eutéticos é a possibilidade de maior controlo e regulação da temperatura de mudança de fase da mistura (Farid *et al.*, 2004).

Tabela 2.6- Comparação dos diferentes materiais de mudança de fase sólido/líquido (Gao e Deng, 2013).

Classificação	Vantagens	Desvantagens
Orgânicos	Disponíveis numa vasta gama de temperaturas	Baixa condutividade térmica
	Estabilidade química e térmica	Inflamáveis
	Recicláveis	Elevada expansão volumétrica
	Não corrosivos	
	Sobrarrefecimento praticamente nulo ou inexistente	
Inorgânicos	Alta entalpia de fusão	Sobrarrefecimento
	Elevada condutividade térmica	Baixa entalpia de mudança de fase
	Baixa variação volumétrica	Corrosividade
	Disponibilidade e baixo custo	Segregação de fase
		Instabilidade térmica
Eutéticos	Temperatura de fusão precisa	Falta de informação sobre propriedades termofísicas
	Alta densidade de armazenamento de energia	

Tendo em conta as temperaturas que este trabalho tem como objetivo estudar, foi feita uma recolha bibliográfica de diferentes materiais de mudança de fase sólido-líquido para a gama de temperatura 120-180 °C e cujo resultado se pode observar na Tabela 2.7.

Tabela 2.7- Propriedades termofísicas de compostos selecionados (Jankowski e McCluskey, 2014, Cunha e Eames, 2016)

Composto	T_{mf} [°C]	h_{mf} [kJ/kg]	ρ_s [kg/m ³]	Cp_s [kJ/(kg·K)]	Cp_l [kJ/(kg·K)]	λ_s [W/(m·K)]	λ_l [W/(m·K)]	Energia específica volumica [MJ/m ³]	Custo [€/m ³]
Orgânicos									
Ácido adípico	152	275	1360	1,87	2,72			392	664
D-Mannitol	165	300	1490	1,31	2,36	0,19	0,11	500	1168
Hidroquinonas	172	258	1300	1,59	1,64			378	32883
Inorgânico									
MgCl ₂ 6 H ₂ O,	117	150	1570	2,00	2,40	0,70	0,58	260	64
Eutéticos (proporção mássica)									
LiNO ₃ -NaNO ₂ (62%-38%)	156	233	2296	1570	1910	0,11	0,066	515	31
LiNO ₃ -KCl (58%-42%)	160	272	2196	1260	1350	0,13	0,059	580	24
HCOONa- HCOOK (45%-55%)	176	175	1913	1150	930	0,063	0,043	331	5
LiOH-LiNO ₃ (19%-81%)	183	352	2124	1600	2000	0,13	0,069	727	30

2.3.3 Métodos de melhoria

A maioria dos materiais de mudança de fase possuem uma baixa condutividade térmica o que leva a uma taxa de carga e descarga muito lenta. Uma boa condutividade térmica permite o armazenamento e libertação de calor latente de um dado volume de armazenamento num curto espaço de tempo. Dada esta necessidade e face à baixa condutividade apresentada pelos materiais, uma solução é aumentar a transferência de calor entre a fonte de calor e o material de mudança de fase.

Existem inúmeros estudos que explicam métodos para melhorar a transferência de calor dos materiais de mudança de fase. Estes incluem o encapsulamento, o uso de alhetas e na adição de partículas com elevada condutividade térmica no material de mudança de fase (Ferrer *et al.*, 2015). Seguidamente irá ser feita uma exposição das diferentes soluções encontradas na literatura.

2.3.3.1 Encapsulamento

O encapsulamento dos materiais de mudança de fase consiste em envolver o material de modo a evitar o contacto direto com outros materiais, Figura 2.25. Este encapsulamento pode ser feito em pequena escala ou numa escala maior.

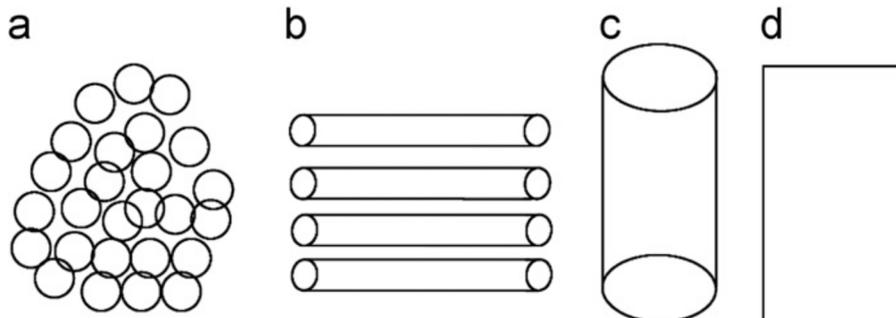


Figura 2.25- Diferentes geometrias para encapsulamento, esférico (a), tubular (b), cilíndrico (c) e retangular (d) (Salunkhe e Shembekar, 2012).

Relativamente ao tamanho da cápsula o encapsulamento pode ser dividido em 3 categorias da seguinte maneira:

Os métodos de encapsulamento mais populares são o micro e o macroencapsulamento, Figura 2.26 .

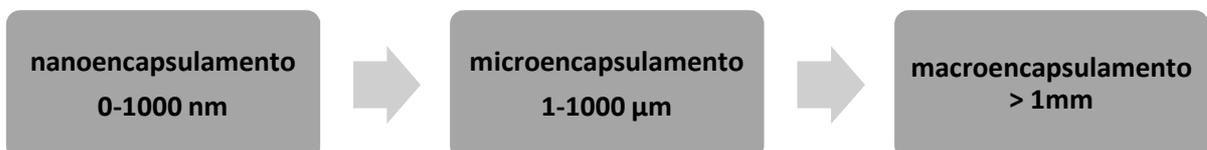


Figura 2.26- Tipos de encapsulamento relativamente à sua dimensão.

O macroencapsulamento consiste na incorporação de materiais de mudança de fase em recipientes, macrocápsulas, que podem apresentar variadas geometrias, como é ilustrado na Figura 2.25. Os materiais podem assim ser introduzidos em tubos, bolsas dispostas em matriz, em placas ou painéis. O microencapsulamento consiste no envolvimento de partículas de pequenas quantidades de material de mudança de fase, por microcápsulas com um tamanho entre 1 a 1000 μm .

As maiores vantagens do encapsulamento de materiais de mudança de fase são o aumento da área de transferência de calor, diminuição da reatividade com o meio envolvente e controlo das variações volúmicas dos materiais aquando da mudança de fase (Farid *et al.*, 2004). A estabilidade térmica é extremamente importante em cargas cíclicas e o sobrearrefecimento é o fenómeno mais problemático, visto que prejudica o desempenho térmico. A inflamabilidade de um material também pode ser diminuída através do encapsulamento.

Uma cápsula deve cumprir determinados critérios tais como, ser de um material compatível com o material a encapsular, ser estruturalmente e termicamente resistente ao processo de mudança de fase. O material da cápsula deve apresentar resistência à corrosão, atuar como barreira entre o ambiente e o material e não deve reagir com o material de mudança de fase encapsulado. A cápsula ou recipiente deve possuir área suficiente para que se dê a transferência de calor, fornecer estabilidade estrutural e ser de fácil manuseamento. E por último deve ter elevada condutividade térmica para facilitar o processo de transferência de calor entre o material de mudança de fase e o envolvente.

Ferrer *et al.* (2015) comparam a reatividade de diferentes materiais de mudança de fase em recipientes de alumínio, cobre, aço inoxidável e aço de carbono. Verificaram que recipientes de aço inoxidável e cobre demonstraram ser a melhor opção para encapsular material inorgânico. Já os recipientes de cobre mostraram sofrer corrosão quando utilizados para armazenar dois materiais eutéticos (ácidos gordos), por outro lado recipientes de alumínio, aço inoxidável e aço de carbono não mostraram qualquer tipo de corrosão ao armazenar estes ácidos. Testaram ainda um material orgânico, um éster, ao qual todos os metais se provaram resistentes.

O microencapsulamento de materiais de mudança de fase envolve a utilização de microcápsulas com uma dimensão típica entre 1-1000 micrómetros. Estes elementos albergam uma massa menor de material do que no caso macroencapsulamento, existindo com isso diversas vantagens. Uma delas é a facilidade na inserção estas microcápsulas noutros materiais sejam estes líquidos ou sólidos. A maior vantagem no uso do microencapsulamento é a elevada razão entre a área de superfície e volume. Este rácio elevado disponibiliza uma vasta área de

transferência de calor e uma rápida resposta térmica, diminuindo assim o tempo de fusão e solidificação do material.

A criação de materiais de mudança de fase microencapsulados pode ser feita recorrendo a diversas técnicas de polimerização incluindo polimerização interfacial, polimerização em suspensão e emulsão, Figura 2.27. Todos estes métodos baseiam-se na criação de uma reação química que proporciona a formação rápida de uma capa polimérica fina e flexível na superfície do material no estado líquido (Fleischer, 2015).

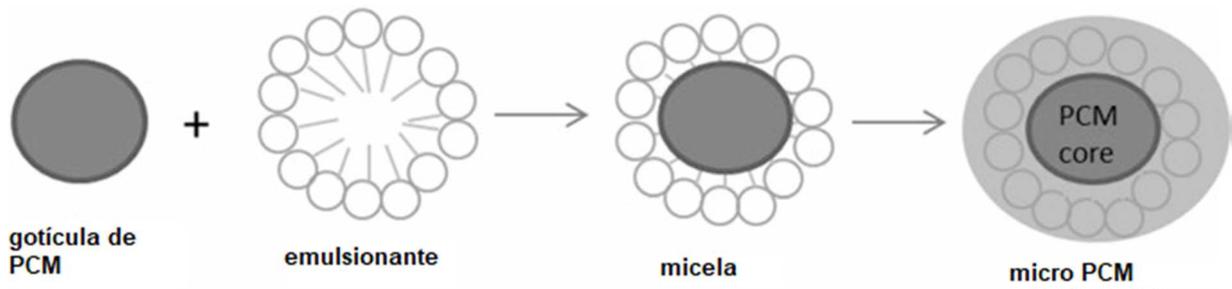


Figura 2.27- Esquema de polimerização de emulsão micro PCM's (Fleischer, 2015).

2.3.3.2 Alhetas

Existem dois tipos de alhetas amplamente utilizados, as radiais (circunferenciais) e as longitudinais, contudo as soluções passam muitas vezes por geometrias menos convencionais, Figura 2.28. Várias unidades de armazenamento com alhetas têm sido alvo de estudos tanto no processo de fusão como no processo de solidificação.

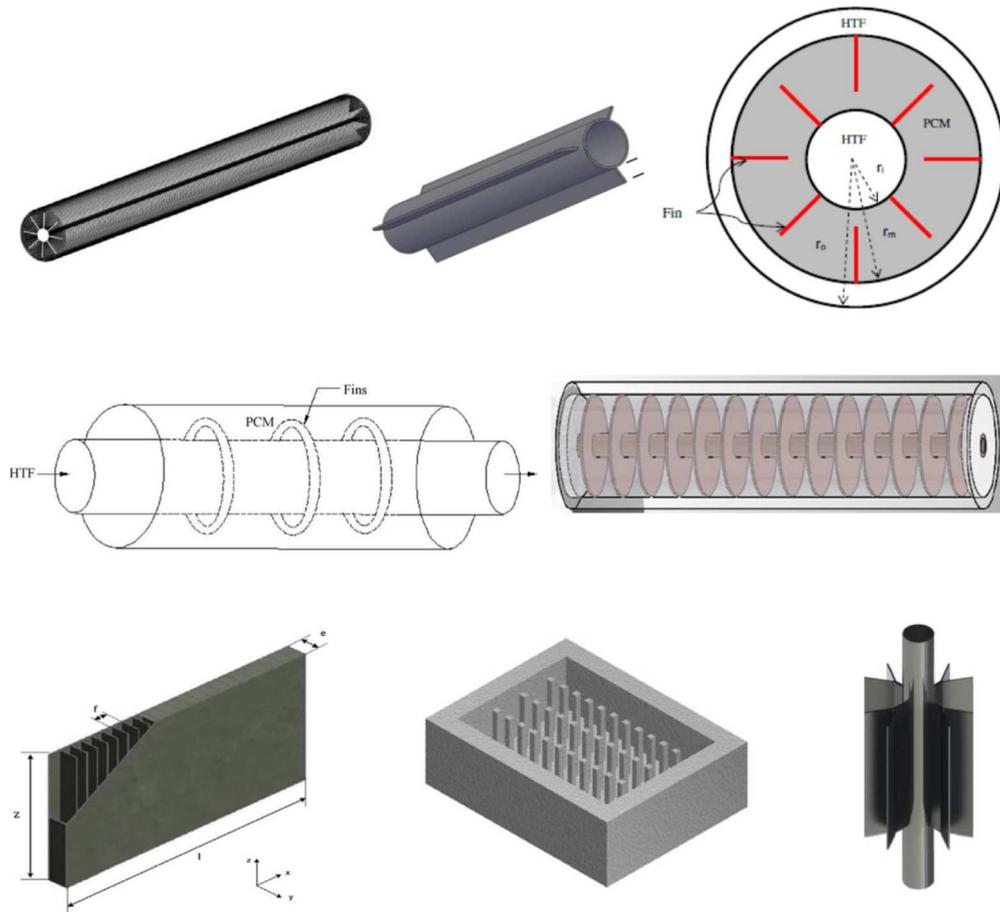


Figura 2.28- Alguns tipos de geometrias utilizadas para alhetas (Abdulateef *et al.*, 2018).

A fusão do material inicia -se na periferia das alhetas e do tubo, propagando-se no material de mudança de fase com o tempo. É possível diversos encontrar diversos estudos como o realizado por Tay *et al.* (2013) em que tubos com pinos (Figura 2.29) são utilizados para o aumento da área de transferência de calor. Unidades de armazenamento com alhetas longitudinais são também alvo de estudos de disposições verticais e horizontais.

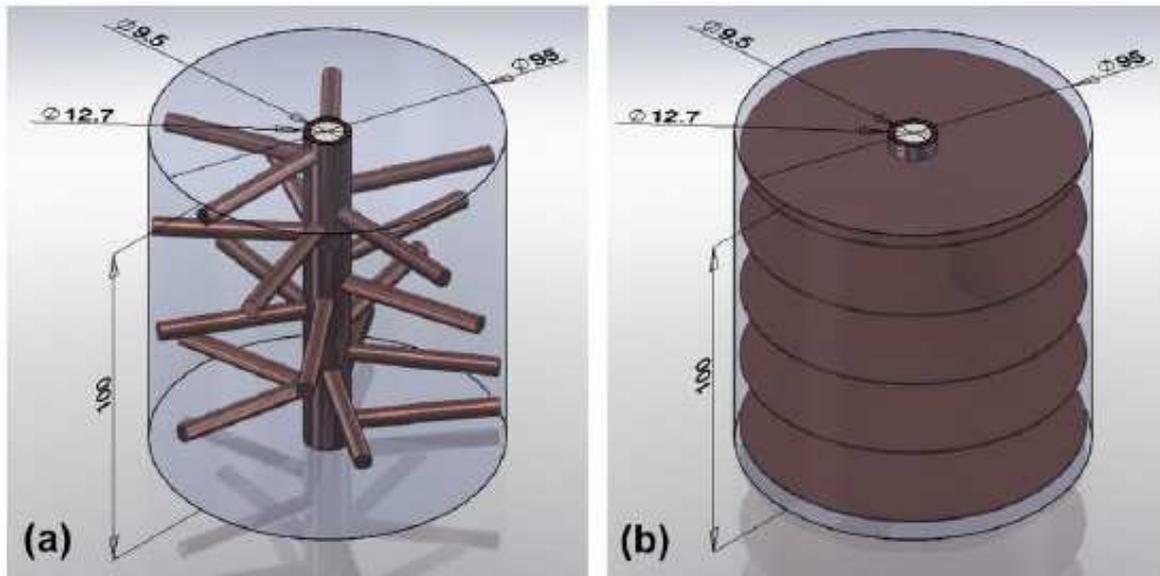


Figura 2.29- Alheta com pinos (a) e discos (b) (Tay *et al.*, 2013).

Abdulateef *et al.* (2018) analisaram um tubo horizontal alhetado em que a parte superior da unidade é dominada pela condução na parte inicial do processo de fusão, enquanto que a convecção assume um papel principal na transferência de calor no fim do processo. Na base desta unidade concluiu-se também que o papel da convecção diminui com o tempo.

Apesar de as alhetas aumentarem a transferência de calor, o material fundido entre as alhetas e o restante material ainda solidificado apresenta uma resistência térmica significativa que impede o processo. Como discutido por Rozenfeld *et al.* (2017), Figura 2.30, baseado em simulações e experiências, tanto alhetas radiais como longitudinais, a fração sólida em qualquer instante estava presa ao envelope no qual não existia fusão. Tornou-se óbvio que se o material no estado sólido se desprende das paredes da unidade de armazenamento, desce atingindo as superfícies quentes e levando à fusão por contacto.

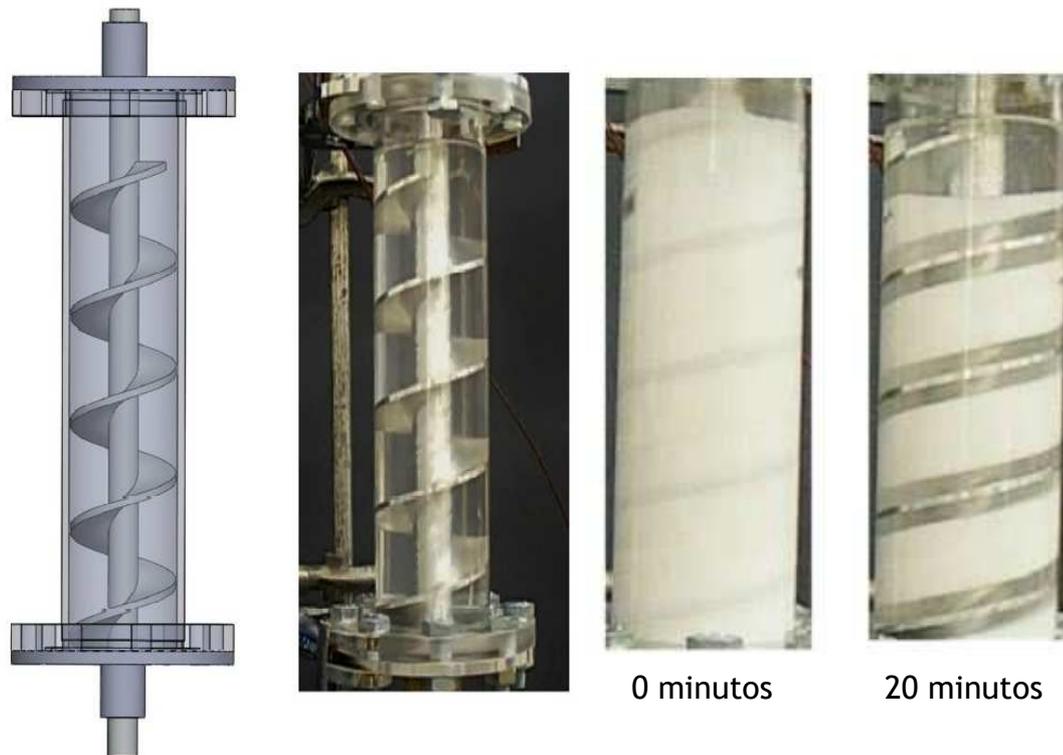


Figura 2.30- Unidade de armazenamento com alheta em hélice (Rozenfeld *et al.*, 2017).

Todos estes modelos apresentaram vantagens na utilização de alhetas na promoção da difusão de calor, contudo sistemas alhetados possuem algumas desvantagens como a adição de peso e a remoção de um volume considerável de material de mudança de fase da unidade de armazenamento, o que reduz a capacidade de armazenamento de energia. Por estes motivos, outros métodos com menos implicações de volume e massa adicionada foram explorados. A utilização de espumas metálicas ou matrizes metálicas que possuem elevados rácios de área de contato por unidade de massa também demonstrou ser uma solução efetiva na melhoria da condutividade. O comportamento do material de mudança de fase com as matrizes é idêntico aos dos sistemas alhetados, o fluxo de calor segue um caminho metálico, neste caso os ligamentos da espuma. Esta solução pode ser observada na Figura 2.31. Várias espumas metálicas, maioritariamente em alumínio, foram alvo de estudo, mas também espumas de cobre e níquel demonstraram melhorar a resposta térmica dos materiais de mudança de fase.

A utilização de espumas ou matrizes tornou em alguns casos o processo de transferência de calor dominado pela condução. A supressão da convecção natural na fusão pode levar ao aumento da temperatura da base, contudo o desempenho térmico é ainda significativamente melhorado com o uso de espumas ou matrizes do que sem o uso destas.

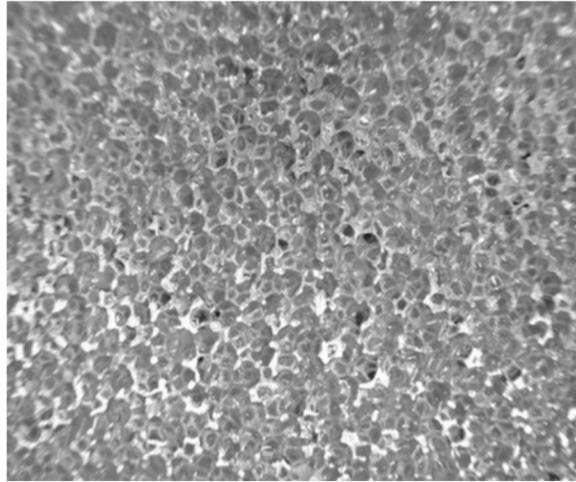


Figura 2.31- Matriz/espuma porosa de alumínio com material de mudança de fase (parafina), (Fleischer, 2015).

Apesar de os exemplos anteriores ilustrarem as vantagens claras na inserção de materiais metálicos no material de mudança de fase, a alta condutividade térmica da maioria dos materiais contendo carbono, faz destes uma escolha frequente para a melhoria do processo. Existem vários tipos de macropartículas à base de carbono para serem utilizadas, incluindo fibras de carbono e grafite. Em geral, as fibras de carbono têm elevada condutividade térmica ao longo do seu comprimento e são resistentes à corrosão ou ataque químico, tornando-as atrativas para longo uso.

Contrariamente às matrizes metálicas (Figura 2.31), com poros uniformes e facilmente controláveis, muitas matrizes de grafite possuem poros irregulares com bordas irregulares, como é possível observar na Figura 2.32.

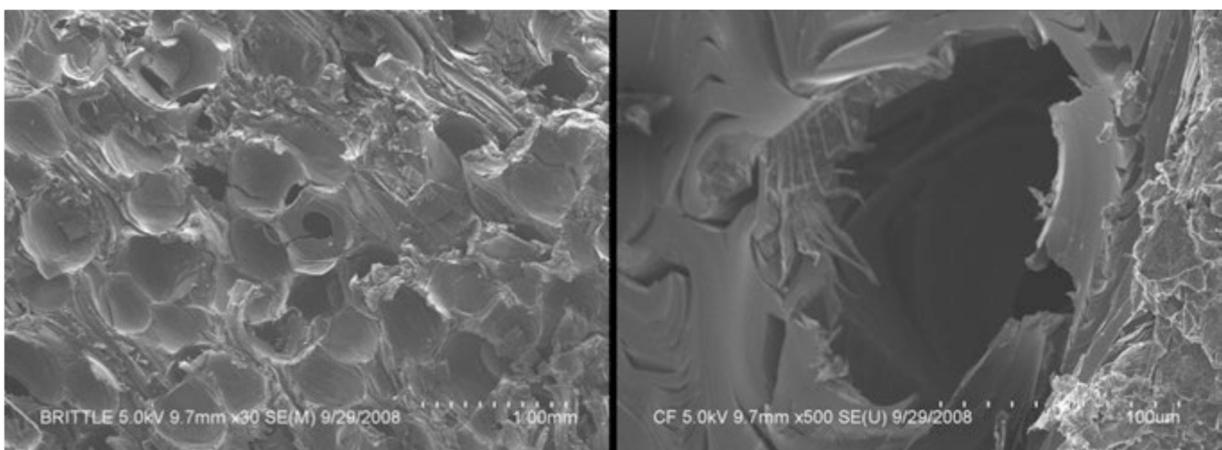


Figura 2.32- Imagens de uma matriz de grafite (Fleischer, 2015).

2.3.3.3 Utilização de micropartículas e nano partículas

Outra solução existente é melhorar a condutividade térmica através da inclusão de micro ou nanopartículas metálicas e de materiais à base de carbono no seio do PCM. Estes materiais geralmente de carbono, alumínio ou cobre, devido à sua reduzida dimensão, possuem elevadas razões de área de superfície por volume, fazendo com que melhorem excepcionalmente a condutividade térmica do compósito (Kibria *et al.*, 2015).

Na adição de nanopartículas a materiais de mudança de fase é necessário ter em conta densidade destas partículas, comparadas com a densidade do material, podendo haver segregação destas nanopartículas. Por outro lado, estudos mostram que a adição de nanopartículas pode aumentar a viscosidade da mistura e tornando imprevisível a condutividade térmica e o calor latente do compósito.

Shuying *et al.* (2010) realizaram uma comparação experimental na taxa de aquecimento/arrefecimento de uma parafina com diferentes nanopartículas metálicas (parafina-cobre, parafina-alumínio, parafina-carbono e cobre). O estudo concluiu que o compósito parafina-cobre tem melhor condutividade térmica do que a parafina com partículas alumínio e com partículas de carbono e cobre nas mesmas condições. Na utilização de partículas de cobre com parafina o valor da condutividade térmica aumentou não linearmente com a concentração de nanopartículas de cobre.

3 Instalação laboratorial

Nesta secção serão apresentadas as características dos diferentes elementos constituintes da instalação criada para teste do módulo/cápsula de armazenamento de energia térmica.

A instalação para realizar os testes experimentais aos materiais de mudança de fase foi adaptada, a partir de uma instalação disponível (Figura 3.1) no laboratório de combustão do INEGI (Esteves, 2016).



Figura 3.1- Instalação previamente instalada no laboratório (Esteves, 2016).

3.1 Bombagem

A circulação do termofluido é garantida por uma bomba centrífuga da *Kirkoskar Brothers* (Figura 3.3 e Figura 3.2) de 60 W, cujo acionamento é feito por um motor elétrico da *Weg*. As características desta bomba, incluindo a curva de altura manométrica estão presentes no Anexo A.

Uma limitação da instalação anterior era o elevado valor de perdas de carga face a baixa potência da bomba, o que proporcionava baixos caudais disponíveis. Contudo, foi possível utilizar a mesma bomba, visto que as perdas de carga da instalação diminuíram significativamente com a utilização do novo dispositivo de aquecimento do termofluido.



Figura 3.3- Grupo de bombagem.

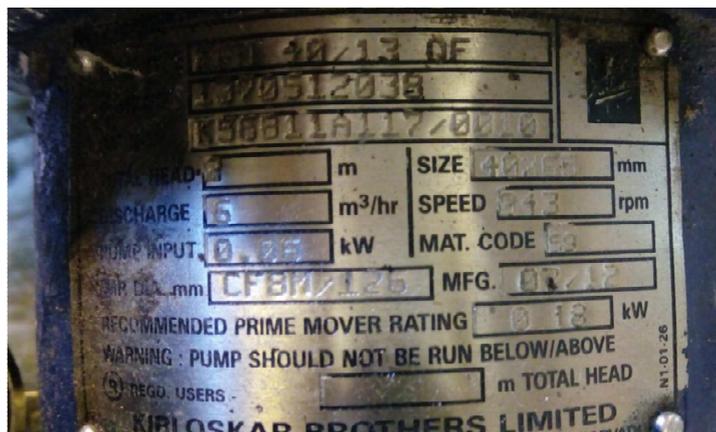


Figura 3.2- Características da bomba da instalação.

Para controlar o caudal no circuito utilizou-se um variador de frequência sincronizado com o motor de acionamento elétrico da bomba. O variador da ABB, ilustrado na Figura 3.4, permite regular a frequência de alimentação do motor elétrico o que se reflete na variação da sua velocidade de rotação.



Figura 3.4- Variador de frequência.

3.2 Fluido de transferência de calor

O fluido de transferência utilizado na instalação é o *Therminol 66*, comercializado pela empresa *Therminol* e as suas propriedades estão presentes do Anexo B.

3.3 Sistema de Arrefecimento

O sistema de arrefecimento é composto por um permutador da *PILAN*, modelo T-B5, este permutador é responsável pelo arrefecimento do termofluido durante o processo de solidificação do material de mudança de fase presente na cápsula. Este permutador possui uma potência máxima de dissipação de calor de 29 kW e uma área de contato de 1,16 m². O permutador, apresentado na Figura 3.5, já se encontrava inserido na instalação presente no INEGI e apresenta ótimas características dimensionais, nomeadamente a sua área de transferência de calor disponível, garantindo uma elevada potência térmica de arrefecimento.

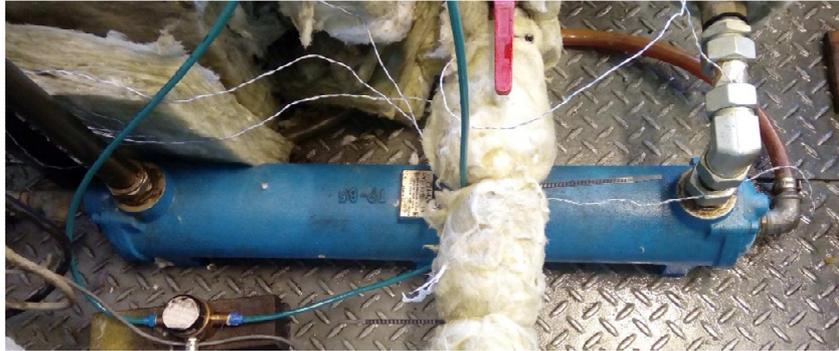


Figura 3.5- Permutador *PILAN*.

O fluido de arrefecimento utilizado pelo permutador é água, que provém diretamente da rede de distribuição. Entre a rede de distribuição e o permutador, a água é bombeada por uma bomba da *Wilo* (Figura 3.6) de maneira a vencer a perda de carga introduzida pelo permutador *PILAN* e pela tubagem.



Figura 3.6- Bomba da *Wilo* para o sistema de arrefecimento.

Para contabilização da energia que o permutador de calor retira ao termofluido é necessário conhecer o caudal em circulação. Este caudal de água foi medido por um rotâmetro, ilustrado na Figura 3.7. Para o caudal de água do sistema de arrefecimento utilizou-se o caudal que irá condicionar a potência máxima, o valor de 30 L/min.



Figura 3.7- Caudalímetro do circuito de arrefecimento.

3.4 Sistema de Aquecimento

A instalação anterior era constituída por um sistema de aquecimento, composto por um reservatório cilíndrico de 70 litros de capacidade incorporado com quatro resistências elétricas no seu interior. Uma das grandes limitações desta instalação era a baixa potência do equipamento de aquecimento face ao seu elevado volume, o que levava a uma grande inércia térmica da mesma.

Para colmatar esta dificuldade a instalação atual utiliza como dispositivo de aquecimento um aquecedor elétrico (Figura 3.8) com uma capacidade de 9 litros, integrado com uma resistência elétrica tubular de 24,7 Ohms alimentado a uma tensão de 230 Volts proporcionando assim uma potência de aquecimento de aproximadamente 2 kW.

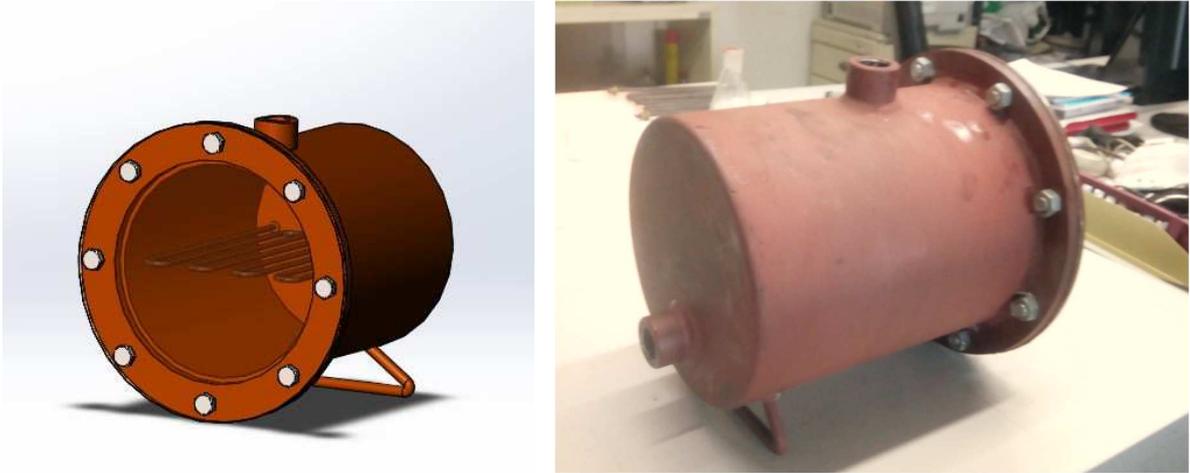


Figura 3.8- Esquema do aquecedor.

O sistema de aquecimento incorpora também um controlador do tipo PID (proporcional-integral-derivativo), ilustrado na Figura 3.9, que permite controlar a resistência, regulando assim o aquecimento do termofluido até uma temperatura definida.



Figura 3.9- Controlador PID para controlo da temperatura do aquecedor.

3.5 Medição de caudal

A medição de caudal é do termofluido é efetuada por um conjunto transdutor de pressão-placa orifício. O transdutor de pressão utilizado é o transdutor para óleo do tipo 482A da marca *Bailey & Mackey* (Figura 3.10). O transdutor é alimentado a 24 Volts pela fonte de alimentação da Figura 3.11, e a sua gama de saída é de 4 a 20 miliamperes. Foi inserida uma resistência de 468 Ohms obtendo assim uma gama de medição apresentada na Tabela 3.1.



Figura 3.10- Transdutor *Bailey & Mackey* do tipo 482A.

Tabela 3.1- Gama de medição transdutor de pressão (Bailey & Mackey, 2017)

Volts	Pa
1,872	0
9,36	3000

A equação do transdutor é dada pela equação 3.1.

$$\Delta P = 400,641 \times V - 750 \quad (3.1)$$



Figura 3.11- Fonte de alimentação do transdutor de pressão.

3.6 Vaso de expansão

Devido as expansões volúmicas do termofluido com a variação da temperatura é necessária a inclusão de um vaso de expansão na instalação. Este vaso está situado à cota mais alta e permite a ocupação deste pelo óleo quando se dá a sua expansão (Figura 3.12). Dado que o ponto de fulgor do *Therminol 66* é 170 °C e a temperatura de trabalho ronda os 185 °C este vaso de expansão, que em ensaios anteriores estava aberto para a atmosfera, passou a ficar tapado, sendo a ligação à atmosfera feita por uma tubagem cheia de palha-de-aço por forma a atuar como tapa-chamas. Este procedimento permitiu aumentar a segurança de operação sem comprometer o funcionamento do vaso de expansão.



Figura 3.12- Vaso de expansão da instalação.

3.7 Permutador de testes

Para efetuar os ensaios de fusão e de solidificação do material de mudança de fase em diversas condições foi projetado um novo permutador de testes que tem como objetivo proporcionar a permutação de calor entre o termofluido e o material de mudança de fase, sendo que este estará dentro de uma cápsula que por sua vez está colocada no interior do permutador de testes.

O novo permutador de testes foi projetado para ser testado na posição vertical e horizontal e albergar no seu interior a cápsula que contém o material de mudança de fase, como ilustrado pela Figura 3.13. Este permutador está equipado de duas tomadas de temperatura devidamente posicionadas e equipadas com termopares do tipo T, como ilustrado na Figura 3.13 uma permite monitorizar a temperatura do óleo à entrada do permutador (A) e outra na saída do permutador (B).

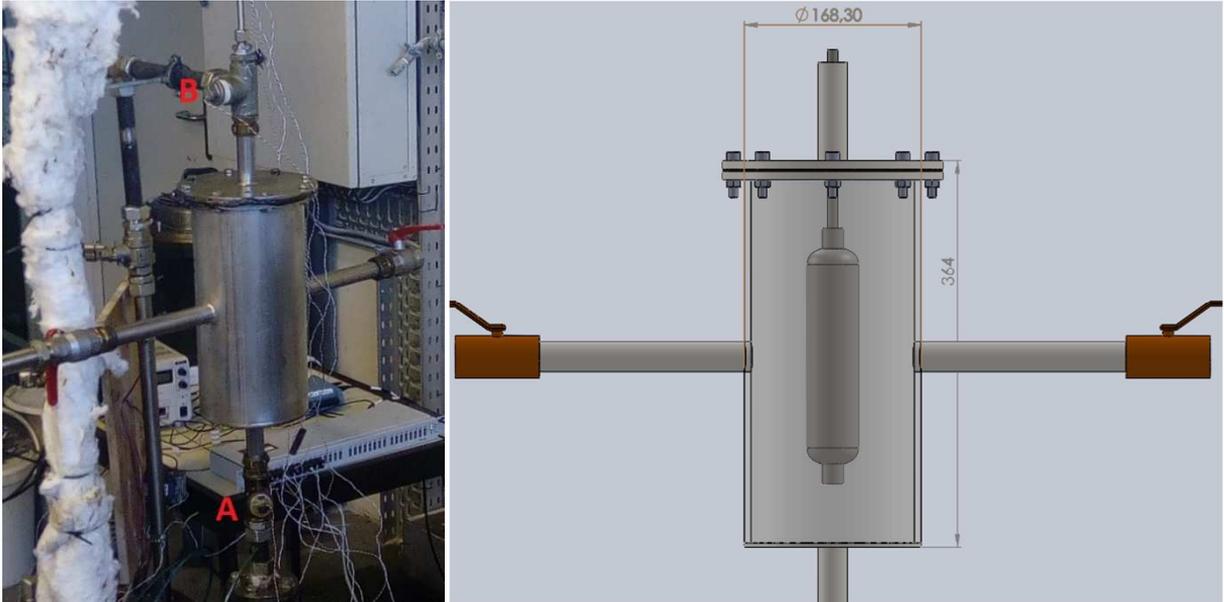


Figura 3.13- Esquema do permutador de testes.

3.8 Tubagem e válvulas

A tubagem presente na instalação foi mantida da instalação anterior e é constituída por tubos de aço ao carbono sem costura, com um diâmetro externo de 28 mm e um diâmetro interno de 24 mm.

De modo a possibilitar a calibração, a purga de óleo e separar os circuitos de aquecimento e arrefecimento a instalação está equipada com sete válvulas de macho esférico.

3.9 Aquisição de dados

De maneira a possibilitar o devido tratamento dos dados adquiridos em cada ensaio, foi utilizado um sistema de aquisição de dados composto por duas placas da *Measurement Computing*, que registavam as leituras de pressão e temperatura, e o programa de aquisição de dados *DASYLab* que, para além de permitir o armazenamento e pré-tratamento dos dados adquiridos, permitiu analisar graficamente a evolução de cada ensaio à medida que este decorria.

A placa TC-32 (Figura 3.14), com 11 canais de leitura foi utilizada para medição de temperatura. A placa USB-2416 (Figura 3.15) foi utilizada para registrar a variação de tensão do transdutor de pressão associado à placa orifício, destinada à mediação do caudal de termofluido em escoamento.



Figura 3.14- Placa de aquisição de dados TC-32.



Figura 3.15- Placa de aquisição de dados USB-2416.

No Anexo C podem ser consultadas as folhas de trabalho elaboradas para o processo de fusão e para o processo de solidificação.

3.10 Funcionamento

Após a conclusão do processo de calibração da placa orifício, a instalação foi isolada com duas camadas de lã de rocha para diminuir as perdas de calor pela superfície das tubagens e dos equipamentos para o exterior, como se pode ver na Figura 3.16. Foi assim possível apresentar uma instalação, pronta para testar as características de fusão e solidificação dos materiais de mudança de fase.



Figura 3.16- Aspeto final da instalação experimental.

Na Figura 3.17, apresenta-se o esquema da instalação e o seu funcionamento, em função do processo, será descrito nos parágrafos seguintes.

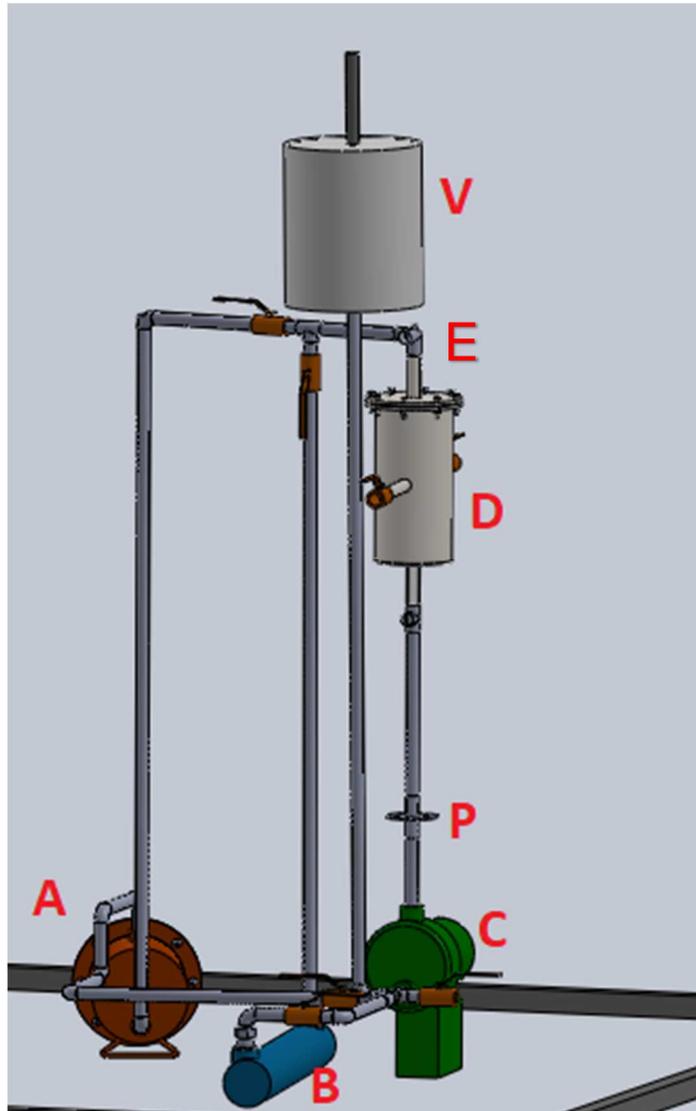


Figura 3.17- Esquema global 3D da instalação final. A- Dispositivo de aquecimento; B- Dispositivo de arrefecimento; C- Bomba centrífuga; D-Permutador de testes; E-Purga de ar, P- Placa orifício, V-Vaso de expansão.

Processo de fusão

Durante o processo de fusão do material de mudança de fase, o fluido de transferência de calor é aquecido no equipamento A da Figura 3.18, sendo a temperatura controlada por o controlador PID e lida por um termopar tipo K à saída do dispositivo de aquecimento. Durante o aquecimento, o fluido é colocado em circulação, em circuito fechado, com auxílio da bomba centrífuga (referência C da Figura 3.18), acompanhando-se a transferência de calor do fluido para o material de mudança de fase durante a sua fusão, que se encontra dentro da cápsula de testes, inserida no permutador de testes (referência D da Figura 3.18), até o PCM estar completamente liquefeito.

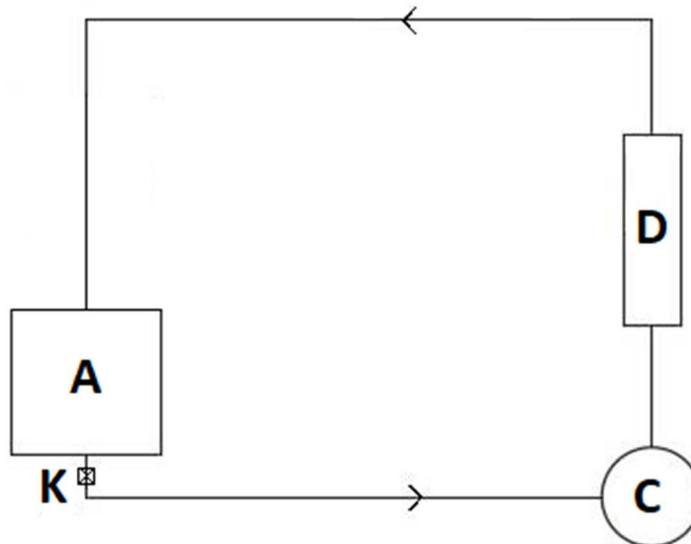


Figura 3.18- Esquema 2D do circuito de aquecimento.

Processo de solidificação

Durante o processo de solidificação do material de mudança de fase, o fluido de transferência de calor é arrefecido no permutador de calor *PILAN*, o equipamento B da Figura 3.19, com a circulação simultânea imposta pela bomba centrífuga (referência C da Figura 3.19), acompanhando-se a transferência de calor do fluido para o material de mudança de fase, durante a sua solidificação, no permutador de testes (referência D da Figura 3.19), até o PCM estar completamente sólido.

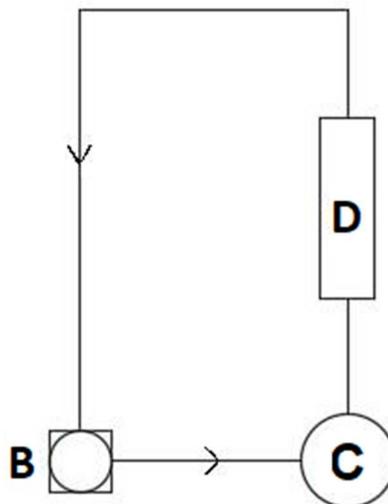


Figura 3.19- Esquema 2D do circuito de arrefecimento.

Com a instalação apresentada, foi então possível proceder aos testes do material de mudança de fase adquirido pelo INEGI.

4 Propriedades da cápsula e do material testado

A cápsula (Figura 4.1) que contém o material de mudança de fase a ser testado é feita de aço ao carbono e tem um comprimento total de 190 mm, um diâmetro externo de 48 mm e um diâmetro interno de 42 mm tendo uma capacidade de 0,223 L. A cápsula vazia possui uma massa de 0,825 kg.



Figura 4.1- Dimensões da cápsula.

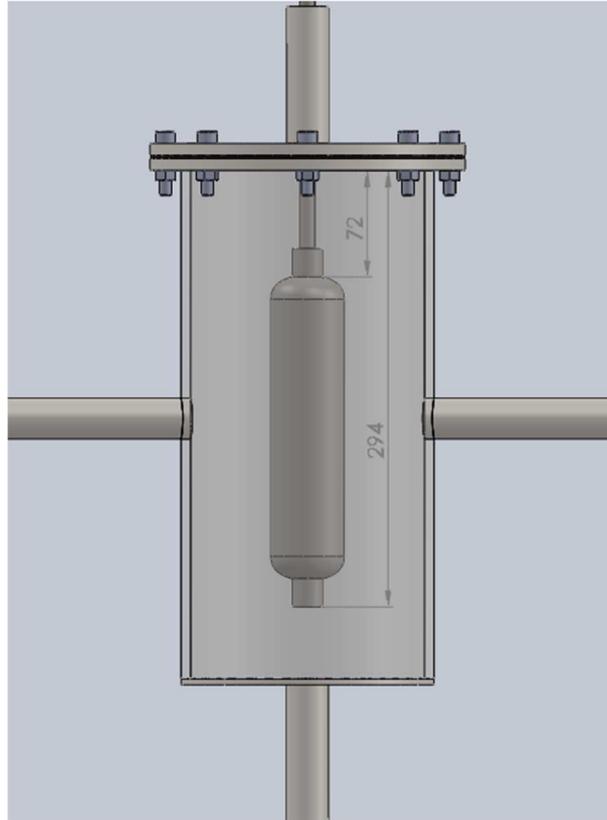


Figura 4.2- Desenho CAD do conjunto permutador de testes e cápsula.

A cápsula encontra-se centrada dentro do permutador de testes e é suportada pela flange do permutador. Na Figura 4.2 é possível observar a posição relativa da cápsula. Foi projetado um sistema alhetado para inserir na cápsula e testar a sua influência na transferência de calor. O sistema alhetado consiste num conjunto de 6 alhetas circulares com 4 furos (Figura 4.3) que

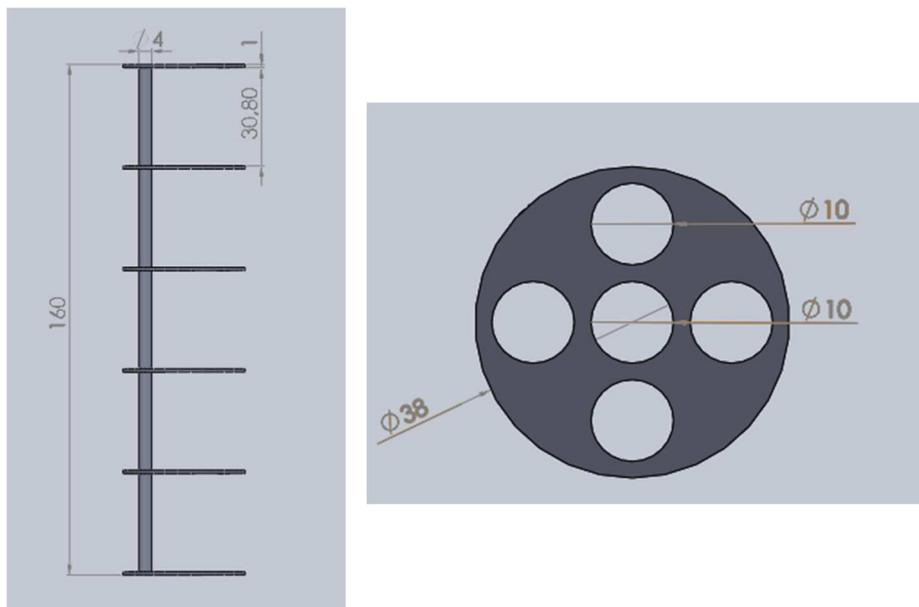


Figura 4.3- Desenho CAD com dimensões da alheta.

se encontram desfasadas entre si, facilitando desta forma a deslocação do material quando ocorrer a mudança de fase.

O volume que a alheta ocupa na cápsula é 0,00844 L, ou seja a redução do PCM com a sua utilização é pouco significativa. Na Figura 4.4 é possível ver a posição e o aspeto final da alheta inserida na cápsula que alberga o material de mudança de fase.

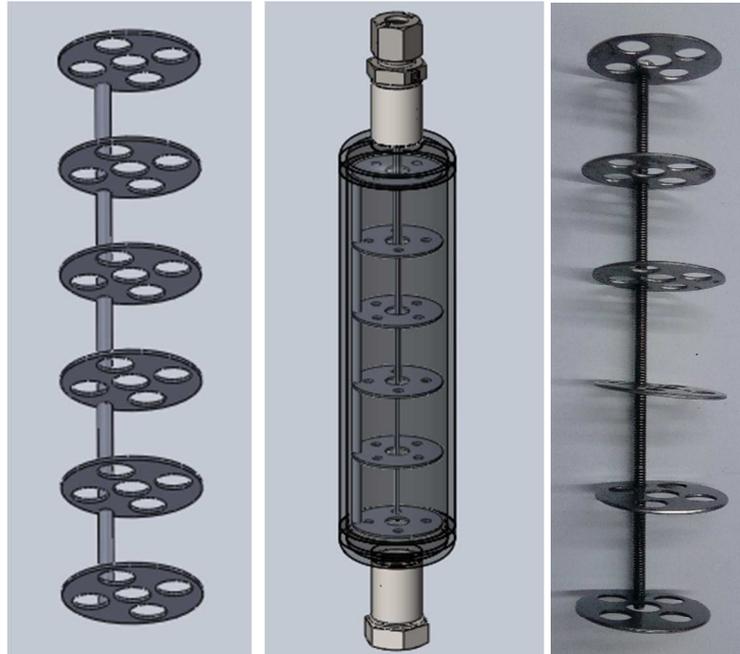


Figura 4.4- Desenho CAD da alheta com a cápsula.

A medição da temperatura do material de mudança de fase durante o processo de fusão e solidificação é feita recorrendo à utilização de 5 termopares do tipo K com revestimento de aço inoxidável, numerados no sentido do escoamento do termofluido, em que T1 corresponde ao termopar que mede a temperatura do material situado na base da cápsula e assim sucessivamente, Figura 4.5.

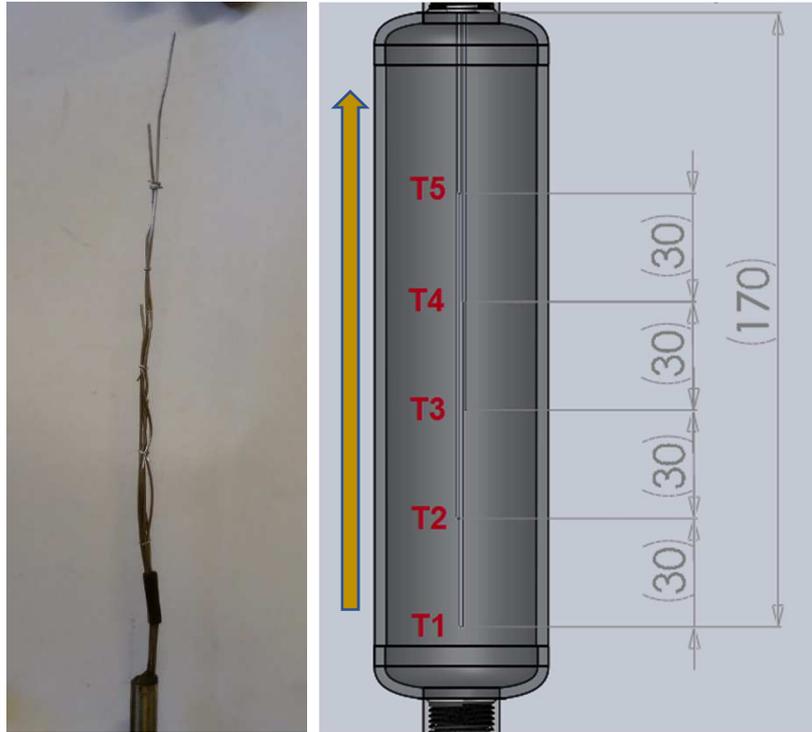


Figura 4.5- Posição das tomadas de temperatura do material de mudança de fase durante os ensaios.

Com o volume da cápsula é possível proceder ao cálculo da massa de material de mudança de fase necessário para encher o volume da cápsula. É necessário ter em conta a expansão térmica dos materiais no processo de mudança de fase.



Figura 4.6- Cápsula construída.

Na Tabela 4.1 estão apresentadas as características do segundo material a ser testado, o material de mudança de fase A164 (Figura 4.7).

Tabela 4.1- Propriedades do material de teste A164 (PCM, 2011, Trhlikova *et al.*, 2015)

Temperatura de mudança de fase [°C]	Massa volúmica [kg/m³]	Calor Latente [kJ/kg]	Energia específica [MJ/m³]	Calor Específico [kJ/(kg·K)]	Condutividade térmica [W/(m·K)]
164	1500	290	435	2,42	-



Figura 4.7- Material de mudança de fase A164.

Apesar de o fabricante não fornecer valores o calor específico e da condutividade térmica do material A164, Trhlikova *et al.* (2015) realizou testes utilizando um método transiente para medição de propriedades térmicas (*ramp-wise and step-wise transient method*) que permitiram completar o conhecimento das propriedades do material A164 de acordo com sua temperatura (Tabela 4.2).

Tabela 4.2- Características térmicas do material Plus ICE A164 (Trhlikova *et al.*, 2015)

Temperatura [°C]	Estado	α [mm²/s]	k [W/(m·K)]	c_p [kJ/(K·kg)]
30	sólido	0,054	0,06	0,68
100	perto da mudança de fase	0,049	0,18	2,45
260	líquido	0,078	0,24	2,07

Tabela 4.3- Variação das propriedades térmica do material PlusICE A164 com a temperatura (Trhlikova *et al.*, 2015)

Plus ICE A164			
T [°C]	α [mm ² /s]	k [W·(m·K)]	c_p [kJ/(kg·K)]
31,8	0,054	0,055	0,684
44,6	0,048	0,097	1,340
59,1	0,049	0,122	1,661
65,2	0,051	0,139	1,809
81,3	0,049	0,163	2,207
91,1	0,050	0,177	2,372
102,7	0,049	0,181	2,451
111,8	0,045	0,186	2,761
121,8	0,045	0,202	2,958
130,7	0,048	0,282	3,900
152,7	0,030	0,175	3,914
163,6	0,028	0,122	2,923
177,8	0,033	0,104	2,087
187,4	0,106	0,306	1,921
191,0	0,103	0,329	2,134
204,6	0,070	0,241	2,288
212,0	0,100	0,335	2,227
221,1	0,142	0,434	2,039
230,1	0,081	0,259	2,146
237,1	0,066	0,213	2,153
249,1	0,073	0,240	2,178

Durante a calibração da placa orifício foi possível observar que a instalação concebida atingia a temperatura máxima de 190 °C. Desta forma, a instalação adequa-se à gama de temperaturas necessárias para o teste do material de mudança de fase A164 para várias orientações da cápsula, com e sem alheta interior. O material de mudança de fase orgânico a utilizar nos ensaios, o material A164, é um açúcar alcoólico derivado do manitol ($C_6H_{14}O_6$).

Para a determinação da expansão térmica recorre-se à expressão seguinte,

$$\text{Expansão térmica [\%]} = \frac{\frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_s}}{\frac{1}{\rho_s}} \times 100 = \frac{v_l - v_s}{v_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Onde ρ_l , representa a massa volúmica na fase líquida, ρ_s , representa a massa volúmica na fase sólida, v_l , representa o volume específico na fase líquida e v_s , o volume específico na fase sólida.

Consultando a literatura, conclui-se que a expansão térmica do material orgânico sólido-líquido terá uma variação pela ordem dos 5-10%. Contabilizando o valor máximo de expansão térmica (10%), o volume da cápsula e a massa volúmica do material obteve-se uma massa de material correspondente a 0,351 kg.

De maneira a ter volume disponível para posteriormente inserir o sistema alhetado com alguma margem de segurança, foram pesados 0,300 kg deste material e este material foi aquecido numa mufla até 190 ° C dentro de um recipiente.



Figura 4.8- Mufla onde o material foi liquefeito.

Para este valor de temperatura existe uma liquefação total, ocorrendo desta forma uma fusão total do material (Figura 4.10). O material liquefeito foi vazado para a cápsula através do taco na base da cápsula (Figura 4.9). Neste processo de vazamento existe uma pequena quantidade de material, que é perdida como resíduo, que fica no recipiente. No caso da cápsula sem alheta e no caso da cápsula alhetada existiram perdas residuais de 2,3 e 2,6 gramas, respectivamente.



Figura 4.10- Material de mudança de fase A164 antes e após ativação.



Figura 4.9- Posição da cápsula em que o material foi vazado.

5 Testes ao material de mudança de fase

Foram previamente definidos todos os ensaios a realizar e todos os parâmetros a variar, de maneira a estudar os diferentes fatores que influenciam a energia térmica absorvida e libertada pelo material de mudança de fase. Os parâmetros variados foram a ausência e existência de alhetado interior, a orientação da cápsula que pode ser vertical (escoamento paralelo ou horizontal (escoamento cruzado)). Por último, os ensaios foram ainda realizados para duas frequências da bomba centrífuga (35 e 50 Hz) o que vai fazer variar o caudal mássico Figura 5.1.

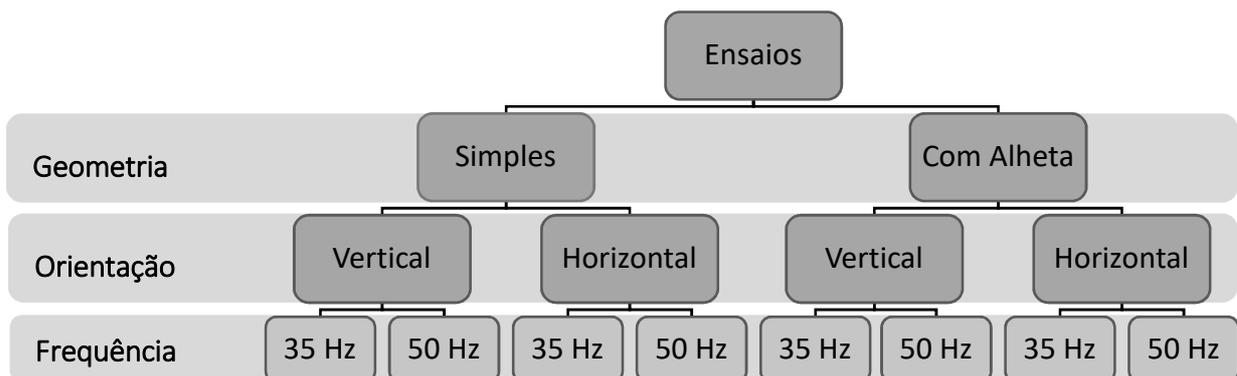


Figura 5.1- Esquematização dos parâmetros estudados nos ensaios laboratoriais.

A taxa de aquisição definida no programa *DASYLab* para registo dos dados foi de 2 minutos.

Com o decorrer do trabalho experimental achou-se pertinente diminuir o caudal de água do arrefecimento de maneira a tornar os patamares de arrefecimento mais visíveis. Realizou-se um ensaio com um caudal de arrefecimento de 15 L/min e outro ensaio com o caudal de 5 L/min.

Contudo, devido à elevada potência do permutador (29 kW) não foi possível encontrar variações notáveis. Estes dois ensaios encontram-se expostos no Anexo F. Relativamente aos caudais mássicos de fluido de transferência de calor, estes variaram ligeiramente de teste para teste, dependendo da frequência de alimentação do motor elétrico da bomba centrífuga. Estes caudais variaram também com os diferentes circuitos, de fusão ou solidificação, assim como com a disposição da cápsula (vertical ou horizontal) devido as diferentes perdas de carga características da geometria da instalação. Apesar disto, para cada ensaio foi registado o caudal mássico obtido.

Cada tipo de ensaio foi realizado duas ou mais vezes de maneira a eliminar erros. No total foram realizados 18 ensaios, sendo que os mais pertinentes serão apresentados na próxima secção. Cada ensaio teve uma duração média de 4 horas e meia, ou seja, 16 200 segundos. Os resultados não apresentados na secção a seguir estão apresentados no Anexo F.

Sempre que se realiza o primeiro ensaio após a inserção do material de mudança de fase na cápsula e sempre que o ensaio implica a mudança da orientação da cápsula (de vertical para horizontal ou vice-versa) efetuou-se um ensaio «zero» adicional com o objetivo de fundir completamente o material e para garantir que por ação da gravidade exista uma distribuição uniforme do material de mudança de fase no interior da cápsula. Após este ensaio zero foi possível iniciar os ensaios propriamente ditos com as respetivas especificações. Na Tabela F.1 presente no Anexo F encontra-se discriminada a notação utilizada para cada ensaio tendo em conta os parâmetros com que este se realiza.

5.1 Caraterização da evolução da temperatura

5.1.1 Processo de mudança de fase

O processo de mudança de fase estudado neste trabalho experimental envolve um processo de fusão e conclui-se com um processo de solidificação. No processo de fusão o termofluido fornece energia térmica ao material de mudança de fase na forma de calor sensível. O termofluido encontra-se em circulação e é aquecido por ação do aquecedor, e conseqüentemente cede energia ao material que se encontra na cápsula de testes. Desta forma, à medida que o termofluido aumenta a sua temperatura, também o material de mudança de fase incrementa a sua temperatura.

Na Figura 5.2 possível observar incremento simultâneo de temperatura do óleo e do material de mudança de fase por calor sensível entre os 0 e os 8000 segundos. Por outro lado, é também claro o patamar de mudança de fase do material, no qual o material absorve calor latente a uma temperatura constante. Observa-se também que este patamar é mais longo para o material que se encontra no cerne da cápsula, representado pelos termopares T3 e T4. Constatase que o material tem um ponto de fusão na ordem dos 164 °C, temperatura à qual se verifica o patamar isotérmico, como seria espectável. Nesta fase existe uma diferença de temperaturas na ordem dos 20 °C entre o material e o termofluido.

Quando o material liquefaz totalmente, e o processo de mudança de fase se conclui, o material começa a absorver calor sensível novamente. Devido ao diferencial de temperaturas existente entre o termofluido e o material, o material incrementa rapidamente de temperatura até entrar em equilíbrio térmico com o termofluido a uma temperatura de cerca de 182 °C.

Quando se atinge o equilíbrio térmico inicia-se o processo de solidificação e troca-se do circuito de aquecimento para o circuito de arrefecimento. É possível observar na Figura 5.2 um pequeno patamar de arrefecimento cerca dos 12500 segundos e dos 164 °C. Ou seja, o material de mudança de fase não demonstra qualquer fenómeno de sobrearrefecimento. Devida à elevada potência do permutador (29 kW) este patamar é pouco visível, verificando-se deste modo que o arrefecimento é um processo rápido com uma duração média de 3600 segundos. No fim do arrefecimento o par material de mudança de fase -termofluido atinge novamente o equilíbrio térmico terminando o ensaio com o material e o termofluido à mesma temperatura.

Na Figura 5.2 é possível observar a evolução da temperatura dentro da cápsula e no óleo, no ensaio t1_v_35_sa. Este ensaio foi realizado, como ilustrado na figura, num escoamento paralelo, com a cápsula na vertical e com frequência de alimentação da bomba de 35 Hertz. Por sua vez na Figura 5.3 observa-se a evolução da temperatura para o ensaio t1_v_50_sa, ou seja, para condições idênticas ao ensaio anterior salvo no respeitante à frequência de alimentação da bomba e consequentemente para um maior caudal de termofluido.

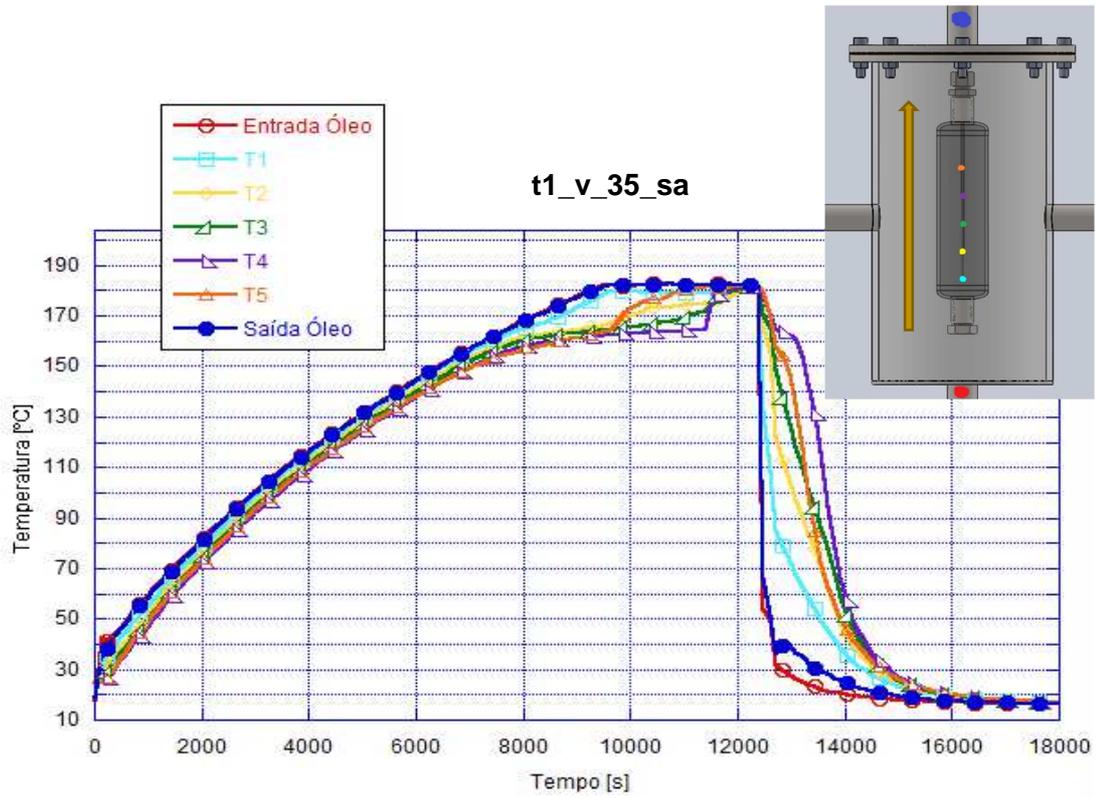


Figura 5.2- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_35_sa.

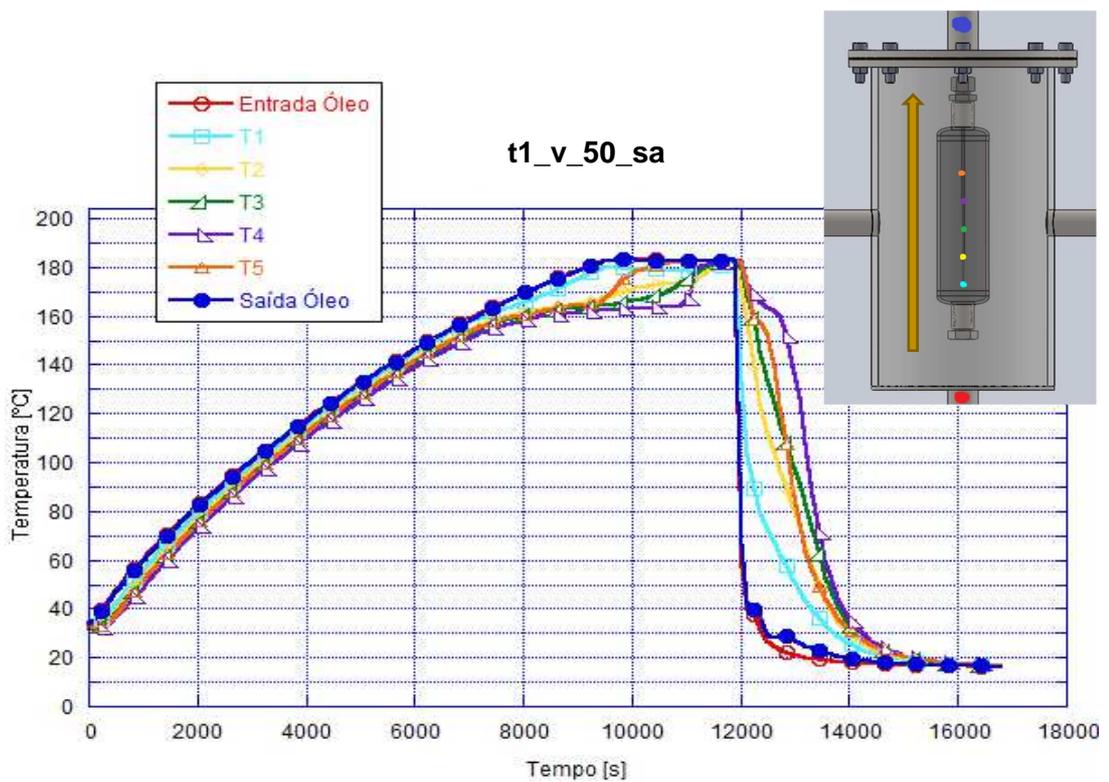


Figura 5.3- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_50_sa.

Nos ensaios em que a cápsula se encontra vertical e sem alheta verifica-se que o termopar T1 situado na base da cápsula acompanha intimamente a mudança de temperatura do termofluido, sendo o primeiro local onde o material liquefaz totalmente. O segundo termopar a acusar a mudança de fase do material é o T5. Após o material liquefazer na base da cápsula (T1) e nas paredes da cápsula, onde a área de contato é elevada e nela embate o termofluido quente, o material desloca-se para o topo da cápsula (T5) devido à diferença de densidade entre o material no estado sólido e no estado líquido. O material ainda no estado sólido continua a mudar de fase, liquefazendo assim o material em contacto com o termopar T2 e T3. Por último, no termopar T4 situa-se o material que liquefaz em último lugar, visto que para esta disposição da cápsula este é o local com maior resistência térmica.

Comparando o ensaio t1_v_35_sa e o ensaio t1_v_50_sa presentes na Figura 5.2 e Figura 5.3, respetivamente, é possível concluir que o aumento da frequência da alimentação da bomba que se reflete no aumento do caudal não influencia o comportamento do material de mudança de fase. Observa-se que, quer no primeiro ensaio, quer no segundo ensaio, a mudança de fase inicia-se aos 9000 segundos e o equilíbrio térmico do processo de aquecimento é atingido imediatamente antes dos 12000 segundos. Isto indicia desde logo que a resistência à transferência térmica, durante a fusão e para a cápsula na vertical, está no material de mudança de fase, ou seja, no interior da cápsula.

Já analisando os ensaios t1_h_35_sa e t1_h_50_sa, casos em que a cápsula se encontra na horizontal e os termopares estão colocados no eixo da cápsula, o material situado nos termopares atinge o equilíbrio térmico praticamente no mesmo instante. Isto apesar de o termopar T1 estar sempre mais próximo da temperatura do termofluido. Através da observação da Figura 5.4 e Figura 5.5 conclui-se que na disposição horizontal da cápsula sem sistema alhetado o aumento da frequência de alimentação da bomba centrífuga de 35 Hz para 50 Hz reflete-se na diminuição da duração do processo de mudança de fase. No ensaio t1_h_35_sa este patamar inicia-se aos 10000 segundos e termina aos 13000 segundos, enquanto que no ensaio t1_h_50_sa o material começa a mudar de fase também aos 10000 segundos, mas atinge o equilíbrio térmico por volta dos 12000 segundos. Nestes casos há alguma influência da velocidade do termofluido.

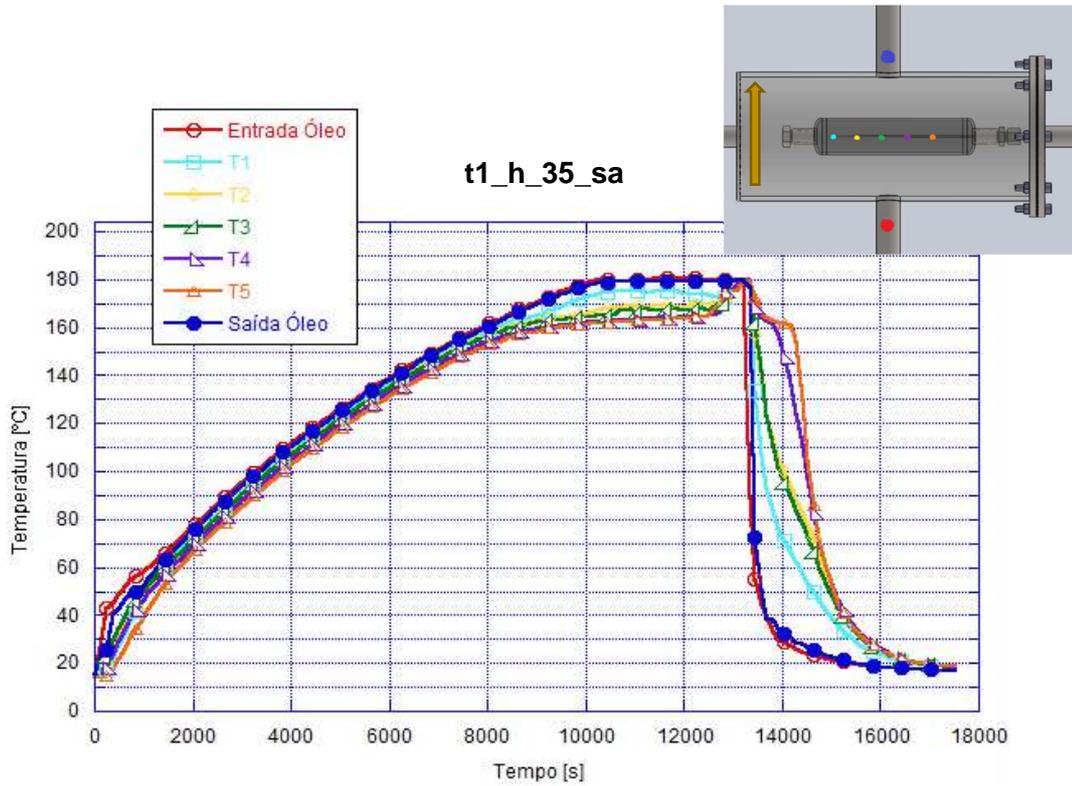


Figura 5.4- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_35_sa.

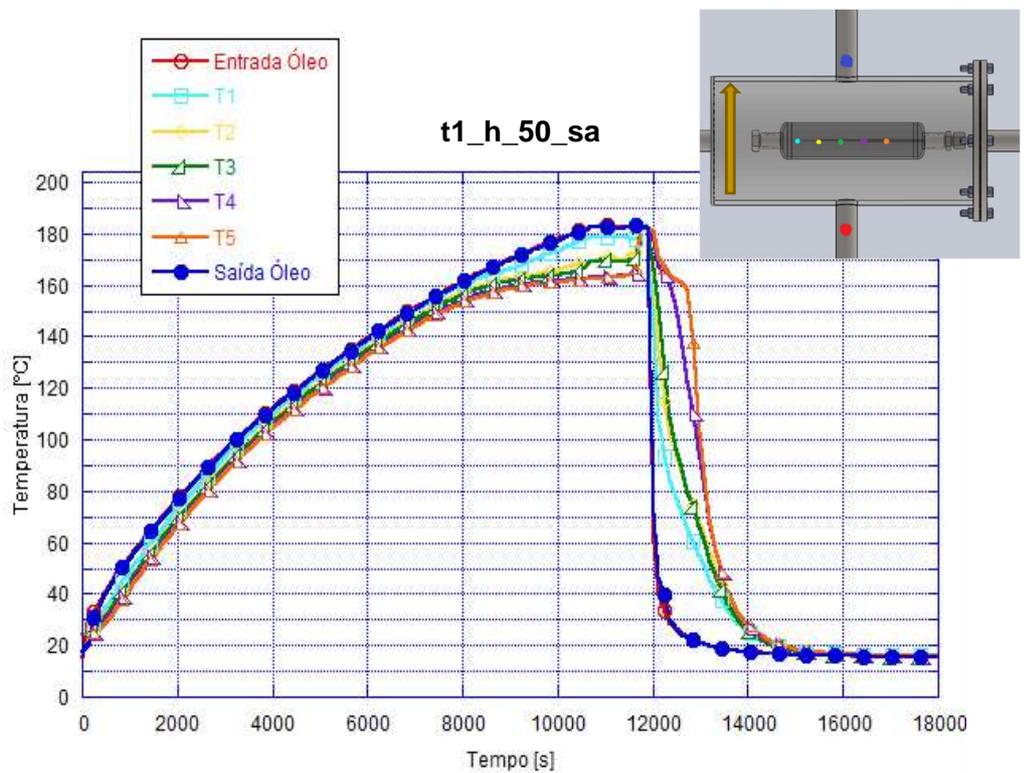


Figura 5.5- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa.

Tal como mencionado anteriormente, devido ao facto da potência de arrefecimento ser extremamente elevada (29 kW) comparativamente à potência do aquecimento (2 kW) foram realizados dois ensaios com a cápsula na disposição horizontal e sem alheta em que o caudal de arrefecimento foi diminuído de 30 L/min para 15 L/min (t1_180_50_sa_A15) e para 5 L/min (t1_180_50_sa_A5), com o intuito de tornar mais explícito o patamar de arrefecimento do material que é visível, por exemplo, na Figura 5.4 por volta dos 12500 segundos. Os gráficos resultantes destes dois ensaios estão apresentados na Figura 5.6 e na Figura 5.7. É possível concluir que apesar de ser possível identificar o patamar de mudança de fase do material no arrefecimento, este não é significativamente muito diferente. Sugere-se então a utilização de um permutador para o processo de arrefecimento com menor potência de maneira a prolongar e a tornar mais visível este patamar para o estudo do material de mudança de fase.

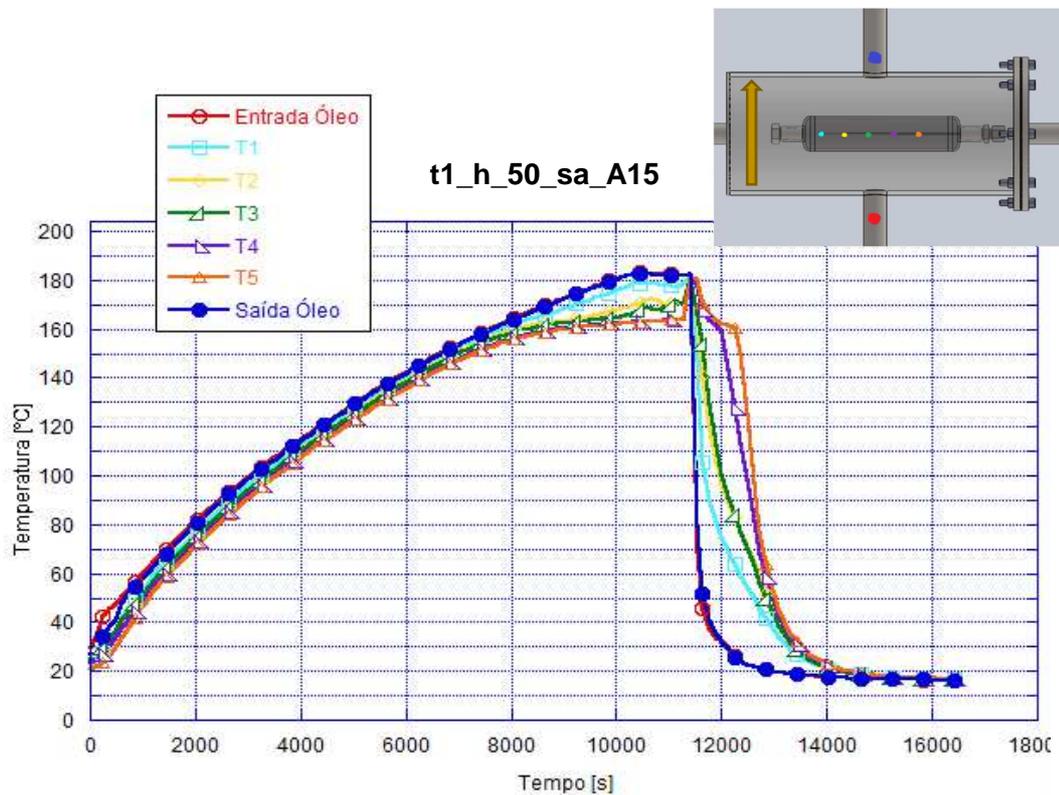


Figura 5.6- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa_A15.

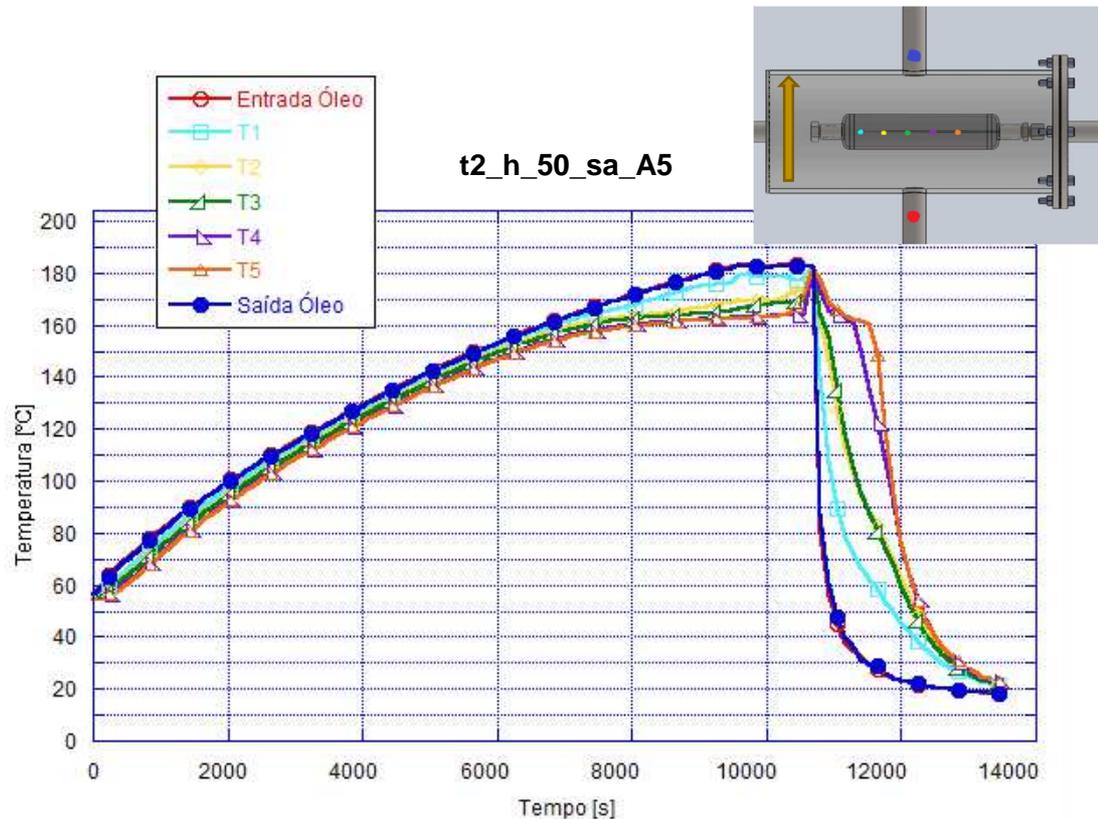


Figura 5.7- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_sa_A5.

Analisando agora os ensaios com cápsula com sistema alhetado t1_v_35_a e t1_v_50_a presentes na Figura 5.8 e Figura 5.9 verifica-se que relativamente aos ensaios realizados sem alheta, a temperatura do material é muito mais homogênea, o processo de mudança de fase é mais expedito e os valores de temperatura dos termopares muito mais próximos entre si e nesta configuração o termopar T5 é o primeiro a atingir o equilíbrio térmico no aquecimento.

No ensaio t1_v_35_a mudança de fase inicia-se por volta dos 12000 segundos e termina nos 13000 segundos. Enquanto que no ensaio t1_v_50_a esta mudança inicia-se aos 12000 segundos e termina antes dos 14000 segundos. Neste caso o aumento da frequência de alimentação, evidencia prolongar ligeiramente a mudança de fase do material. A inserção do sistema alhetado aumenta a capacidade de transferência térmica do sistema, permitindo uma maior homogeneidade na temperatura do material de mudança de fase.

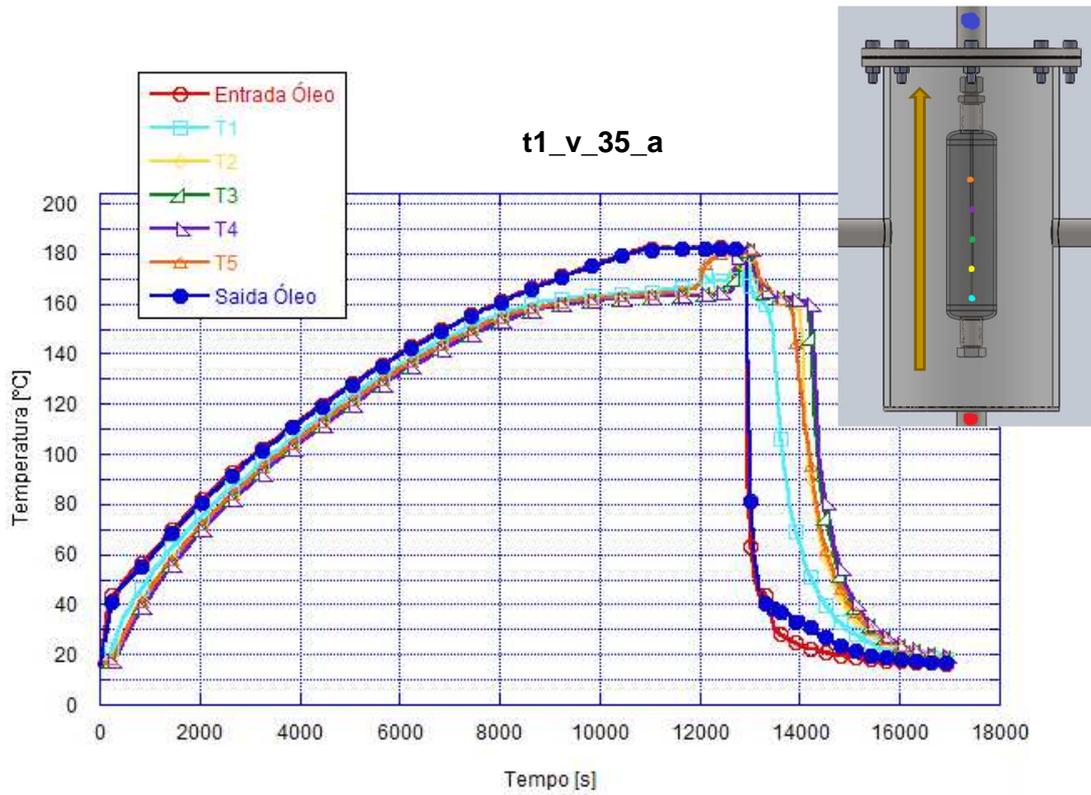


Figura 5.8- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_35_a.

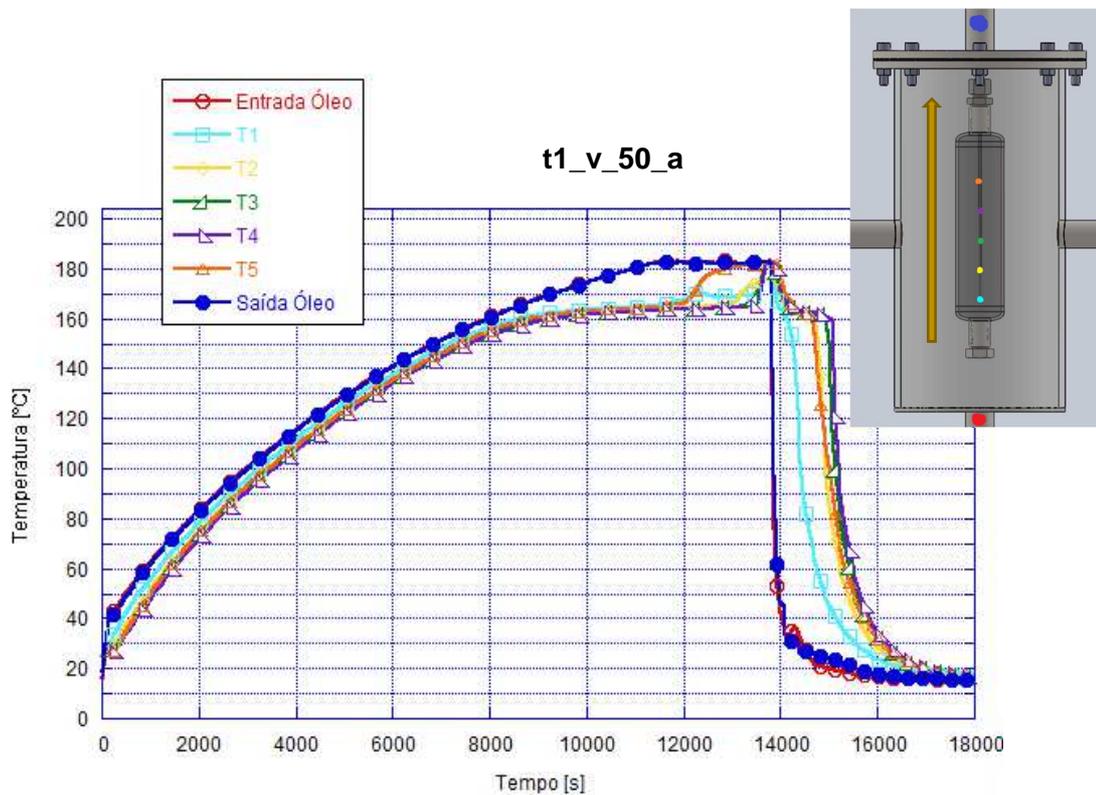


Figura 5.9- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_v_50_a.

Nos ensaios com a cápsula na disposição horizontal e com alheta, os ensaios t1_h_35_a e t1_h_50_a, apresentados na Figura 5.10 e na Figura 5.11 verifica-se mais uma vez que o patamar de mudança de fase tem uma duração inferior aos ensaios com as mesmas condições e sem sistema alhetado e que a temperatura do material dentro da cápsula é homogénea. Por outro lado, o material localizado no termopar T1 é o primeiro a liquefazer, após interpretação concluiu-se que este comportamento ocorre pois, devido à ligação da cápsula ao permutador de testes, existe uma maior perda de carga do lado direito da cápsula (T5) comparativamente ao lado esquerdo onde existe uma menor perda de carga, onde se situa o termopar T1, facilitando o escoamento do termofluido por esse lado da cápsula.

Os dois ensaios horizontais, t1_h_35_a e t1_h_50_a, com cápsula alhetada apresentam um comportamento do material de mudança de fase semelhante, Figuras Figura 5.10 e Figura 5.11.

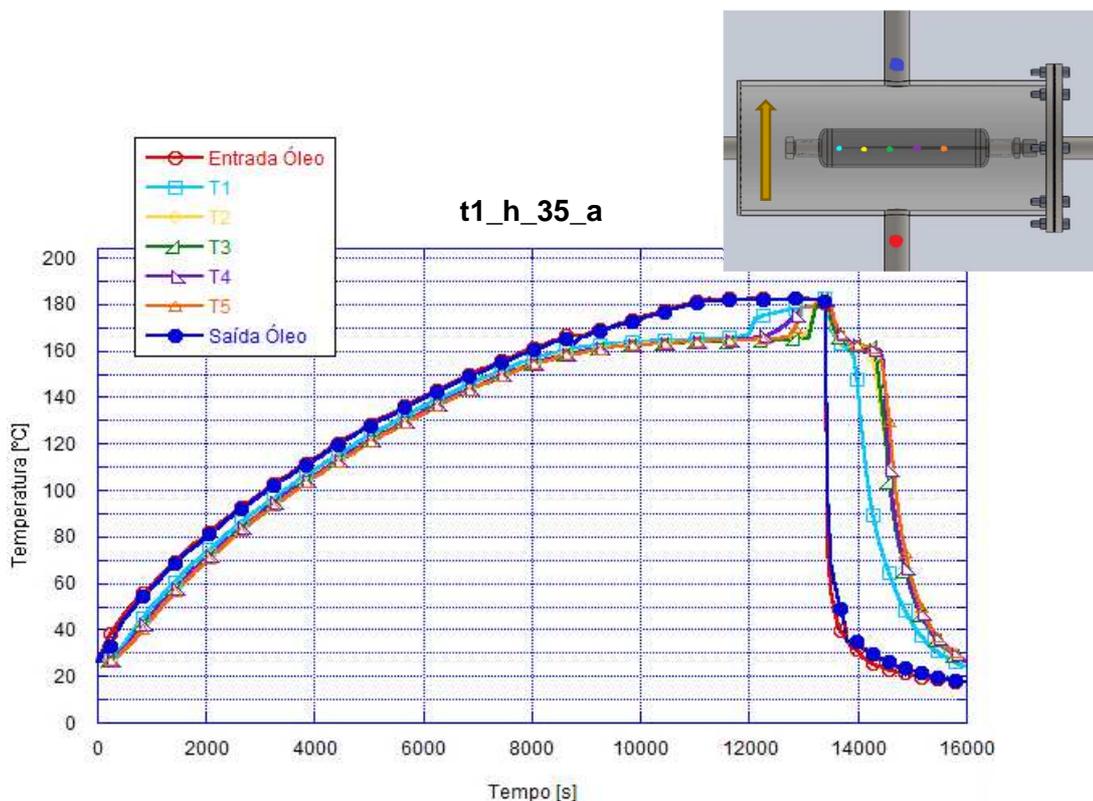


Figura 5.10- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_35_a.

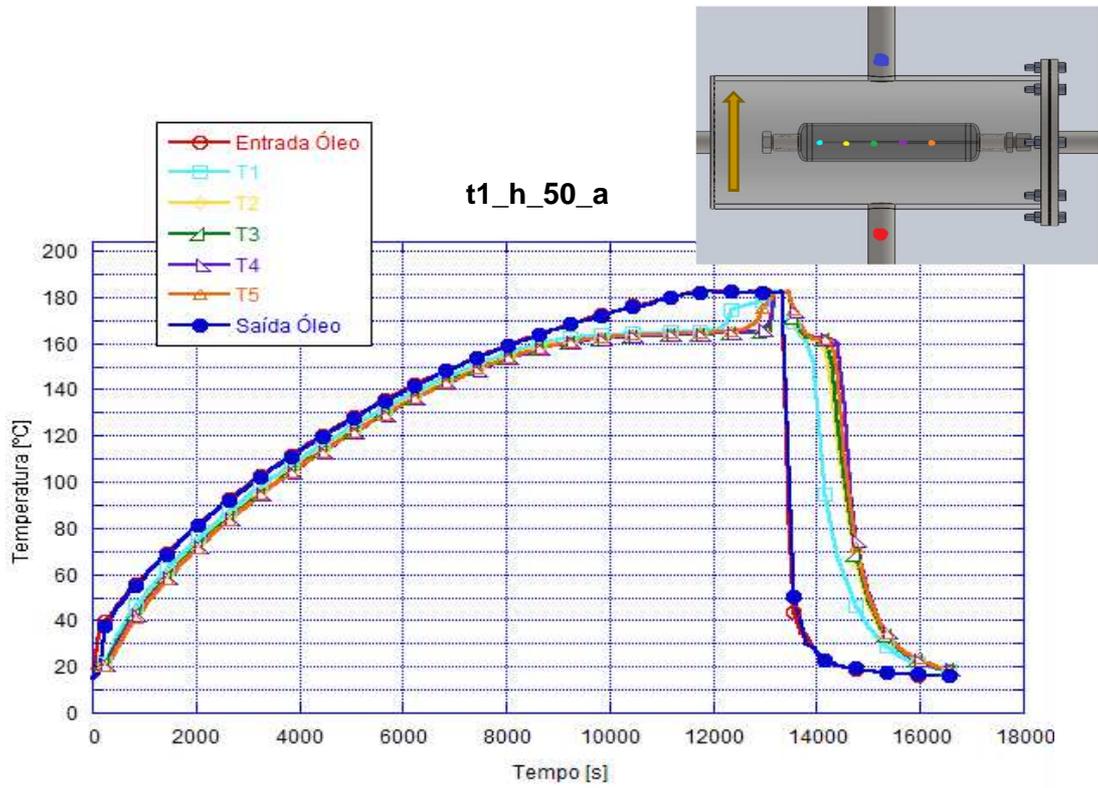


Figura 5.11- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t1_h_50_a.

5.2 Estudo dos coeficientes de transferência de calor

5.2.1 Análise do coeficiente global de calor

Tendo em conta o tratamento matemático realizado no anexo E o coeficiente global de calor, U é dado pela equação 5.1. Os valores médios para os diferentes valores de caudal mássico e velocidade do escoamento do termofluido para cada configuração e frequência de alimentação da bomba encontram-se expostos no Anexo G.

$$U = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T_{ml}} = \frac{\dot{m}c(T^{entrada} - T^{saída})}{A\Delta T_{ml}} \quad (5.1)$$

sendo que a temperatura média logarítmica é dada pela equação 5.2.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{T66}^{saída} - T_M) - (T_{T66}^{entrada} - T_M)}{\ln\left(\frac{(T_{T66}^{saída} - T_M)}{(T_{T66}^{entrada} - T_M)}\right)} \quad (5.2)$$

Desta forma, conhecendo já os valores de cada variável é possível obter o valor do coeficiente global de calor. Nos gráficos obtidos verificava-se a existência de alguns pontos díspares sem razão aparente. Como habitual nestes casos, foi utilizado o critério estatístico de *Chauvenet*. Este critério especifica que as leituras que devem ser mantidas são as leituras que se encontram numa banda em torno do valor médio a que corresponde uma probabilidade de P , descrita pela equação (5.3), assumindo uma distribuição normal, em que N representa o número de leituras (Holman, 2012).

$$P = 1 - \frac{1}{(2N)} \quad (5.3)$$

$$x_{max} = X_i - \bar{X} = \tau \times S_x \quad (5.4)$$

Assim a equação 5.4 em que, X_i representa a leitura, \bar{X} o valor médio das leituras, τ é o desvio normalizado em função do número de leituras e S_x o desvio padrão da amostra, permite-nos estabelecer o critério para invalidar certas leituras. Numa amostra com N leituras, valores que estejam afastados do valor médio mais do que $\tau \times S_x$ podem ser rejeitados.

Depois de aplicado este critério aos valores de U , foram obtidos os gráficos que se apresentam a seguir. No Anexo F apresentam-se os restantes ensaios realizados.

De maneira a eliminar a interferência dos fenômenos de transitoriedade do escoamento na análise dos dados, foram apenas analisados os dados correspondentes à própria mudança de fase. Não estão incluídos assim o início e fim de cada ensaio onde o escoamento e a camada limite térmica ainda não se encontra completamente desenvolvida. Isto foi tido em conta para o cálculo de todos os coeficientes de transferência de calor a seguir apresentados.

Na Figura 5.12 é possível observar o gráfico com os valores do coeficiente global de transferência de calor para a mudança de fase do material do ensaio t1_v_35_sa. É possível observar um patamar inicial correspondente à mudança de fase do material em que o coeficiente global possui um valor de cerca de 500 W/(m² ·K). Este patamar é seguido de um súbito aumento devido às correntes de convecção existentes na fase líquida que contribuem para a transferência de calor entre o termofluido e o material de mudança de fase.

Na fase de arrefecimento (a azul) o coeficiente global de transferência de calor tem valores elevados devido à elevada diferença de temperatura entre o material e o termofluido nesta fase. O valor do coeficiente decresce rapidamente pois o equilíbrio térmico é atingido depressa. Na análise dos coeficientes globais de transferência de calor no arrefecimento houve alguma dificuldade na análise devido ao arrefecimento ser um processo tão abrupto. O comportamento e os valores de U são idênticos para as duas frequências estudadas.

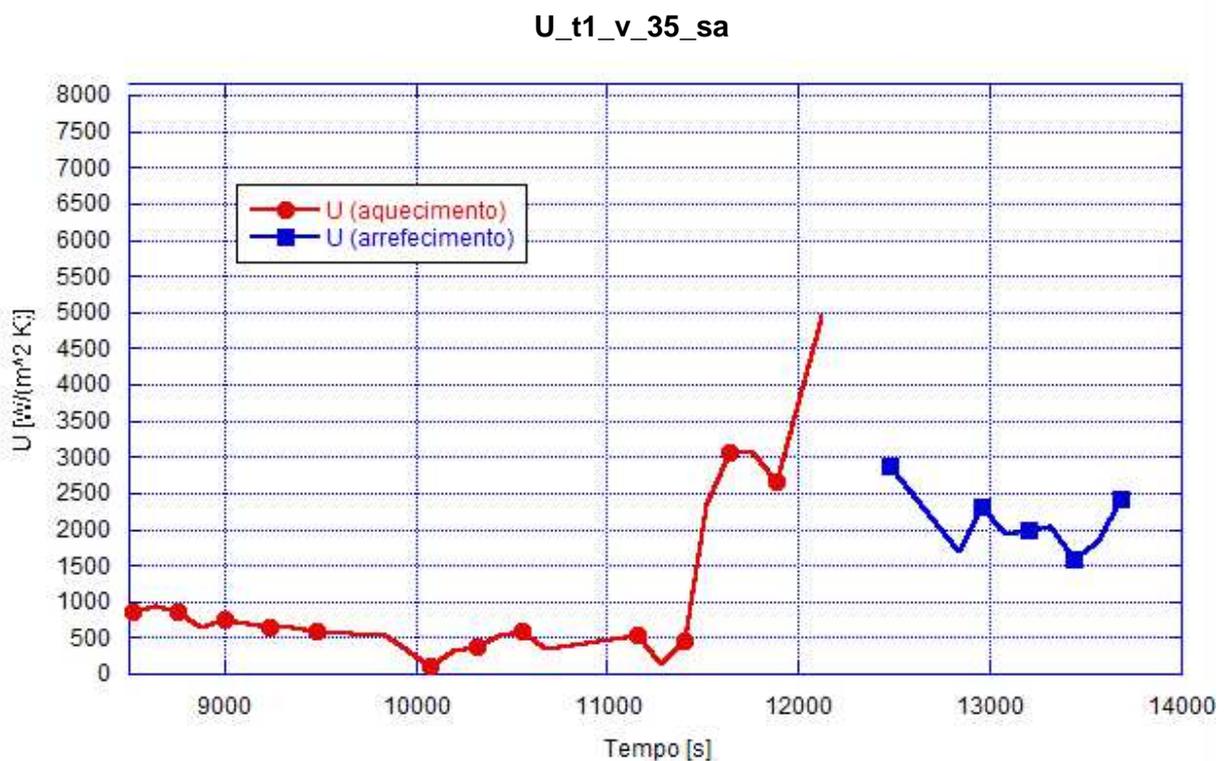


Figura 5.12- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_35_sa.

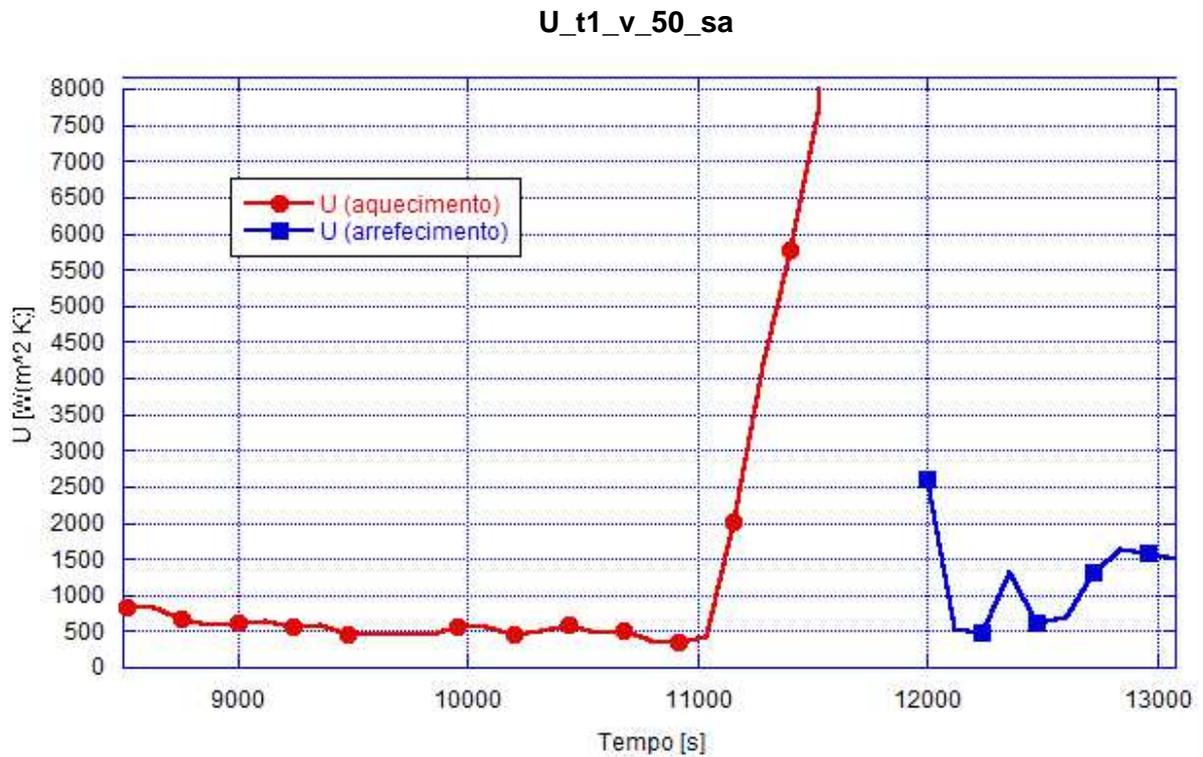


Figura 5.13- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_50_sa.

Nas Figuras 5.14 e 5.15 podem-se observar os gráficos com os valores do coeficiente global de transferência de calor para os ensaios t1_h_35_sa e t1_h_50_sa. Nestes ensaios os valores do coeficiente global para a mudança de fase rondam os 1000 W/(m²·K), o dobro do valor obtido nos ensaios com a cápsula vertical sem alheta.

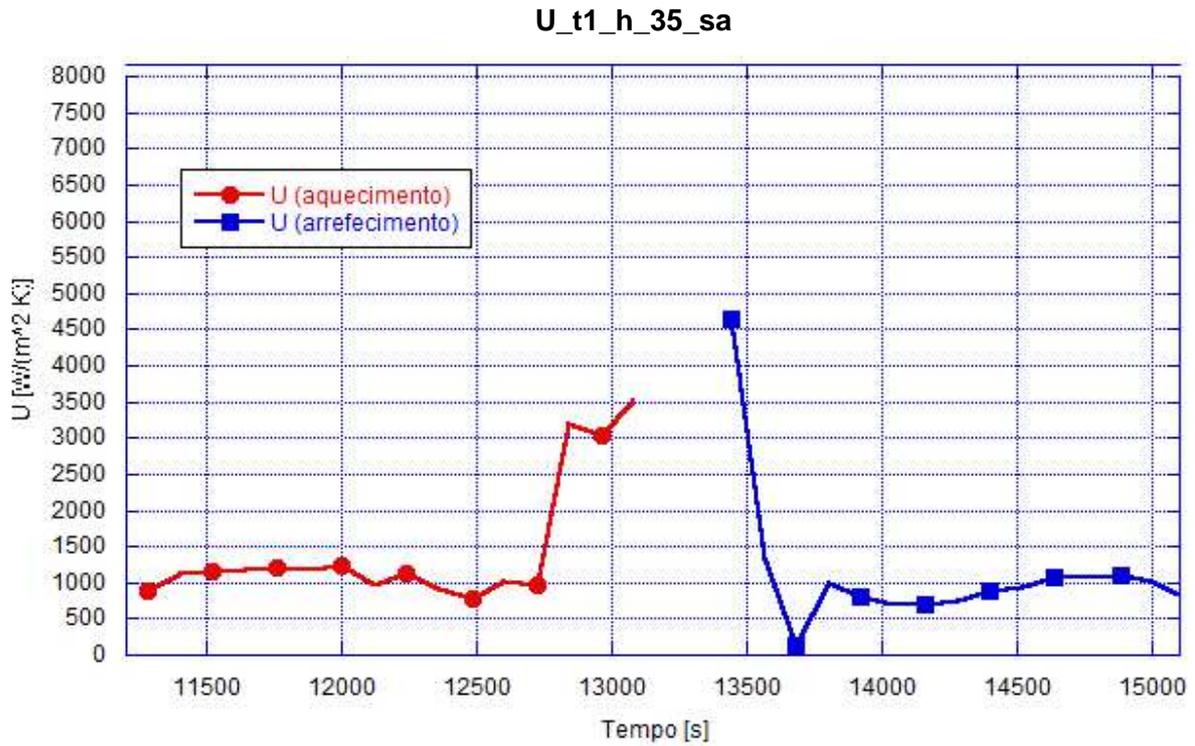


Figura 5. 14- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_35_sa.

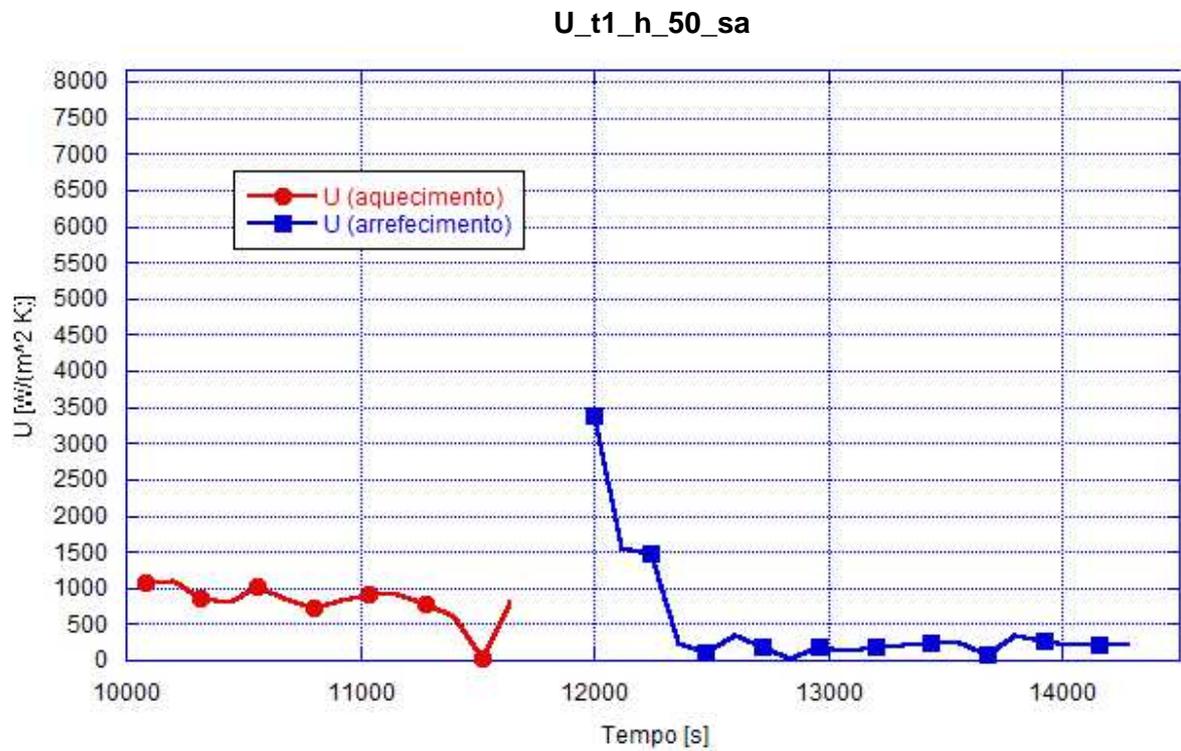


Figura 5. 15- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_50_sa.

Nos ensaios t1_v_35_a e t1_v_50_a apresentados na Figura 5.17 e na Figura 5.16 verifica-se um ligeiro aumento no valor do coeficiente global de transferência de calor, assim como nos ensaios horizontais com alheta apresentados na Figura 5.18 e na Figura 5.19. Sendo que os que apresentam melhor resultado são os ensaios com a frequência de alimentação da bomba de 35Hz, contudo as diferenças não são significativas.

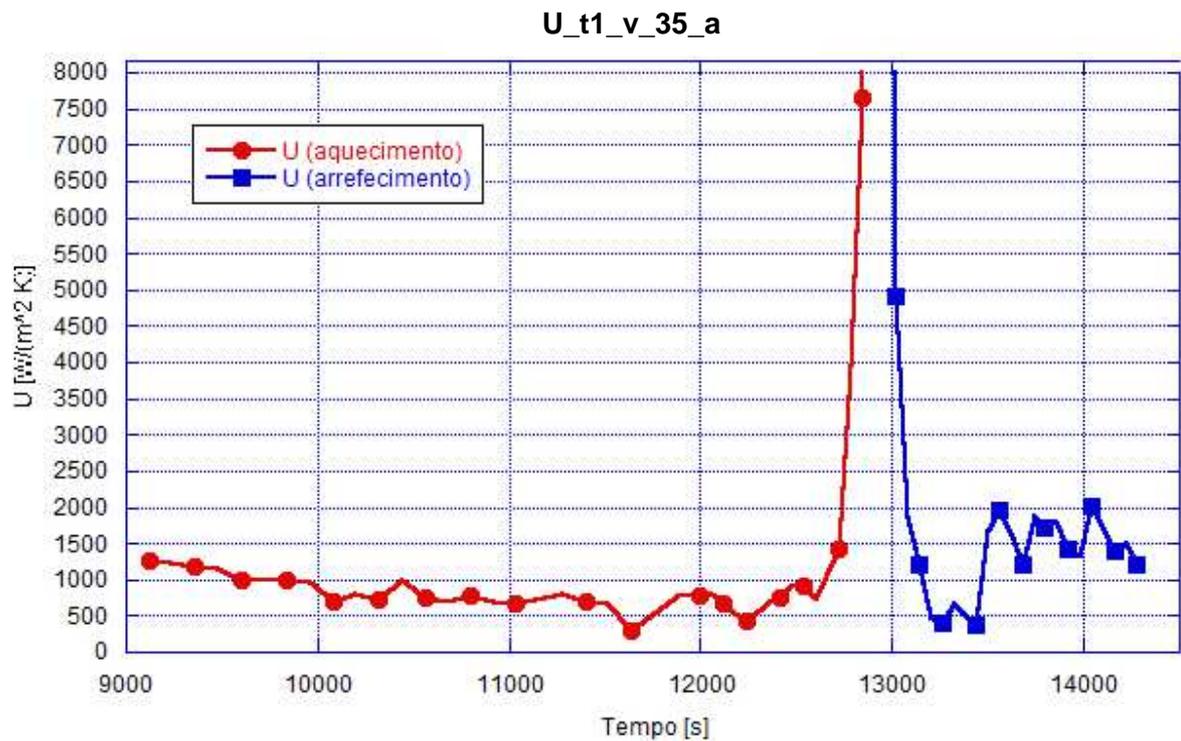


Figura 5.16- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_35_a.

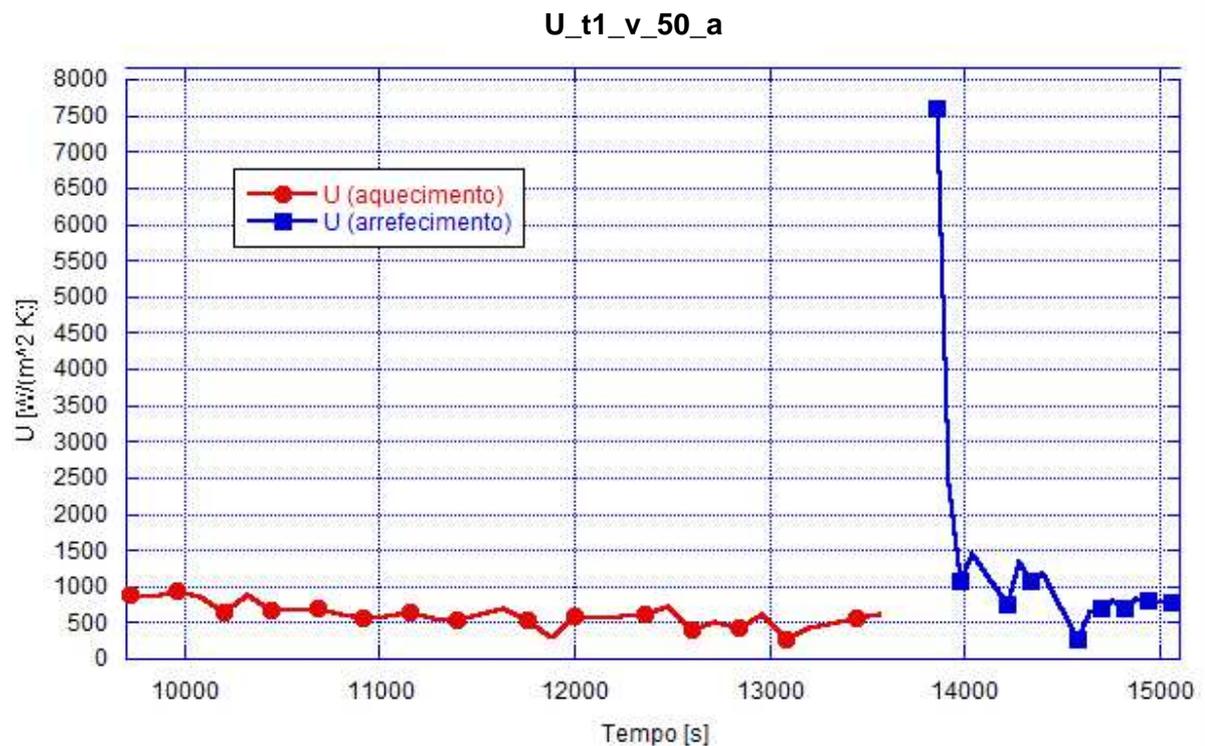


Figura 5.17- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_v_50_a.

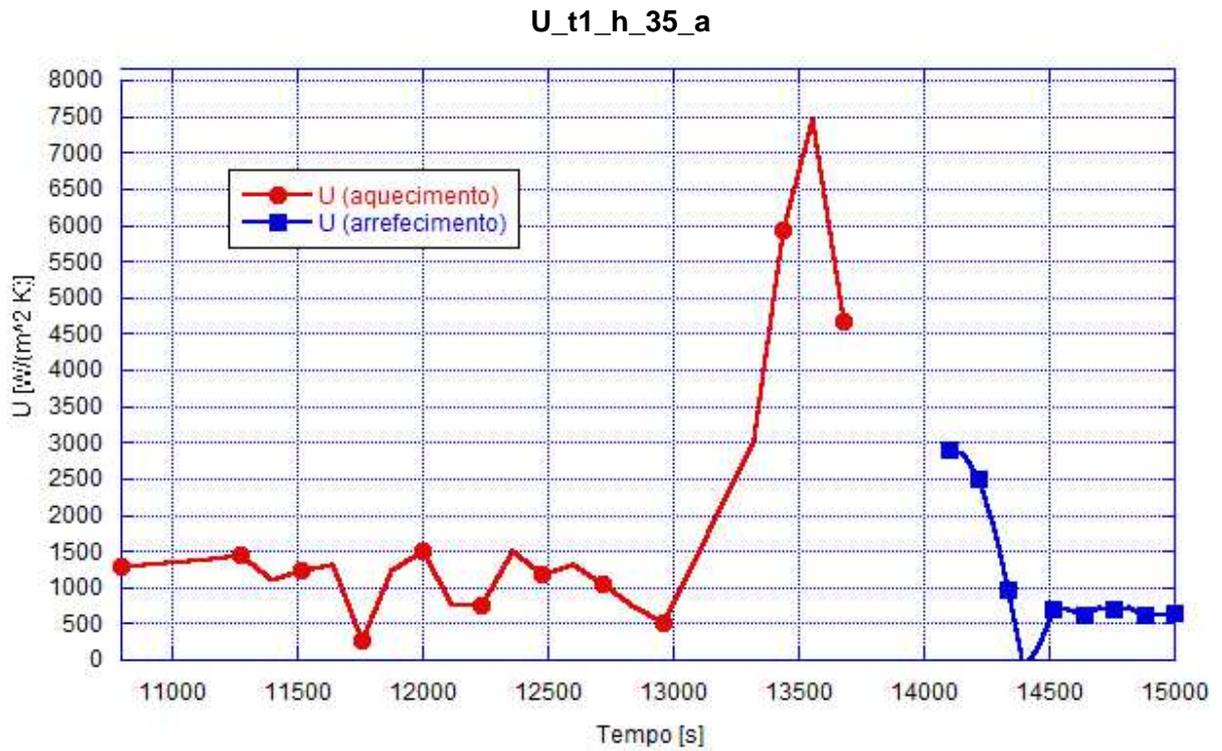


Figura 5. 18- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_35_a.

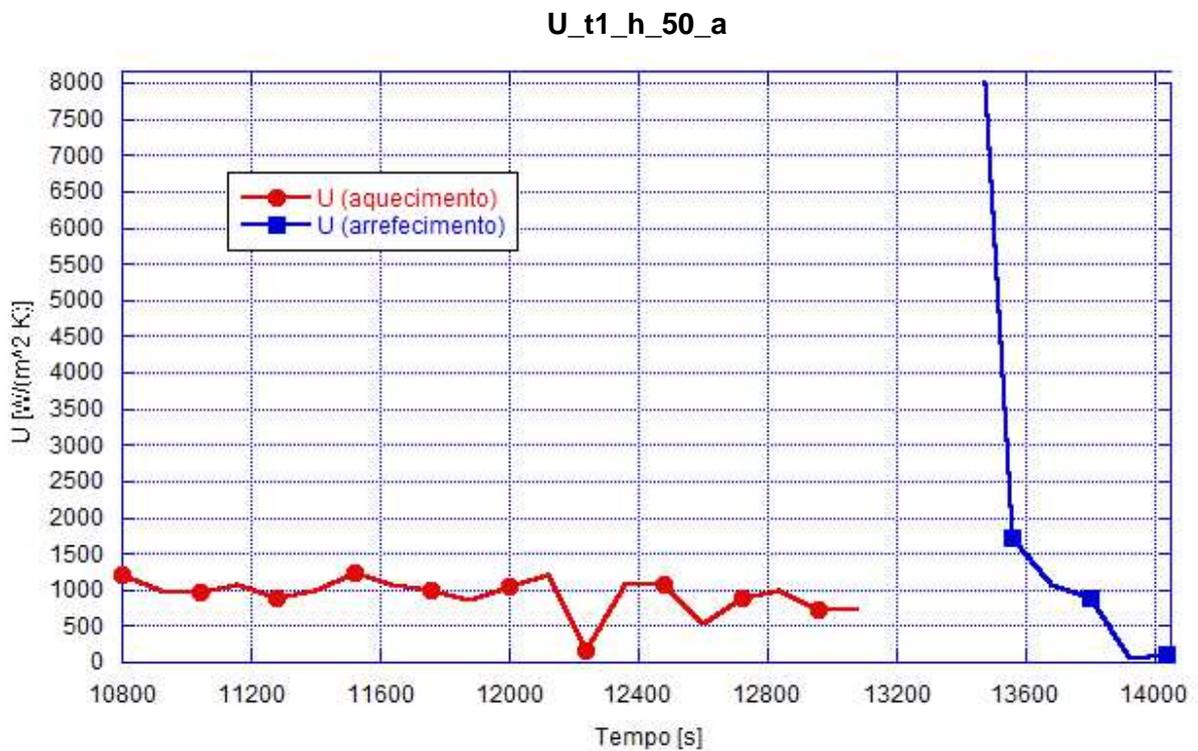


Figura 5. 19- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t1_h_50_a.

5.2.2 Análise do coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase

O valor do coeficiente global de calor é dado pela equação 5.5 e a análise matemática que permitiu chegar a esta equação encontra-se exposta no Anexo E. Na equação 5.6, r_{out} , representa o raio exterior da cápsula, r_{int} , o raio interior da cápsula, h_{out} , o coeficiente de transferência de calor do termofluido, k a condutividade térmica do material da cápsula (40 W/(m·K)) e h_{int} representa o coeficiente de transferência de calor do material. Como o valor do coeficiente global de transferência de calor, U , já é conhecido assim como todos os parâmetros da equação 5.6, é possível obtermos o coeficiente de transferência de calor, h_{int} no material de mudança de fase (Levenspiel, 2014).

$$U = [R_{cvint} + R_{cd} + R_{cvext}]^{-1} \quad (5.5)$$

$$U = \left[\frac{r_{out}}{r_{int}} \left(\frac{1}{h_{out}} \right) + \frac{r_{out} \ln(r_{out}/r_{int})}{k} + \frac{1}{h_{int}} \right]^{-1} \quad (5.6)$$

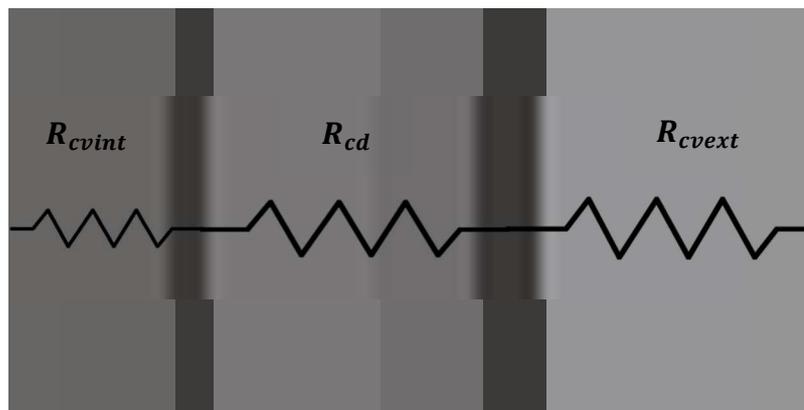


Figura 5.20- Esquemática das resistências térmicas do conjunto cápsula/permutador.

Visto que em alguns ensaios o escoamento do termofluido em torno da cápsula é escoamento paralelo e noutros escoamento cruzado, é necessário analisar cada situação separadamente. Nos ensaios em que a cápsula se encontra numa disposição vertical, o escoamento do termofluido em torno na cápsula é um escoamento paralelo. De maneira a simplificar os cálculos do coeficiente de transferência do termofluido aproximou-se o escoamento existente a um escoamento paralelo em torno de uma placa plana. Foi também utilizada uma correlação encontrada na literatura para um escoamento turbulento paralelo a um cilindro. De qualquer modo salienta-se que a informação sobre coeficientes de transferência de calor entre um fluido e um cilindro na posição longitudinal é escassa e mesmo inexistente

quando o fluido escoar no regime laminar. Daí a adoção do escoamento ao longo de uma placa para a definição do coeficiente de transferência de calor no exterior da cápsula. A outra situação, a de se usar uma correlação referente a um escoamento turbulento no exterior da cápsula para o caso do escoamento laminar do óleo ao redor da cápsula, é certamente muito criticável, pedindo-se, contudo, a compreensão do leitor pois a sua utilização tem apenas um caráter especulativo.

5.2.2.1 Escoamento Paralelo

Com a intenção de se conseguirem obter coeficientes de transferência de calor do óleo térmico para a cápsula foi colocado um termopar na parede exterior da cápsula de modo a permitir o cálculo do coeficiente de transferência de calor do termofluido. Inicialmente tentou-se soldar o termopar à parede da cápsula, mas sem sucesso. Então, o termopar foi fixado com fita de alumínio à parede exterior da cápsula. Contudo, depois de feita a montagem da cápsula no permutador de testes e aquecido o termofluido, o termopar deixou de funcionar. Ficou assim impossibilitado o cálculo direto do coeficiente de transferência de calor do termofluido para a cápsula. Não houve outra alternativa a não ser a de se usarem correlações disponíveis na literatura para o cálculo deste coeficiente de transferência de calor.

Com as correlações encontradas na literatura para um escoamento paralelo a uma placa plana e considerando um comprimento característico igual ao comprimento da parte cilíndrica da cápsula de testes (160 mm) procedeu-se ao cálculo do coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase. Os números de *Reynolds* atingidos para esta disposição variaram entre 40- 5200, tratando -se assim de um escoamento laminar.

Para cada valor de *Reynolds* e de *Prandtl*, através da equação 5.7 calculou-se o número de *Nusselt* com a correlação encontrada. As propriedades do filme foram avaliadas à temperatura do óleo, T_{∞} . Através da equação 5.7 obteve-se o coeficiente de transferência de calor do termofluido e em conjunto com a equação 5.6 apresentada anteriormente é então finalmente possível obter o coeficiente de transferência de calor do material (Incropera e Dewitt, 2011).

$$\overline{Nu}_L = 0,683 Re_L^{1/2} \times Pr^{1/3} = \frac{h_{out} L}{k} \quad (5.7)$$

De seguida serão apresentados os gráficos resultantes dos cálculos para o coeficiente de transferência de calor do material, com a correlação acima apresentada, para os ensaios

realizados. Os restantes gráficos do coeficiente de transferência de calor do material não apresentados nesta seção podem ser encontrados no Anexo F.

Como se constatar nos gráficos a seguir apresentados, o comportamento do coeficiente e transferência de calor do material é semelhante ao do coeficiente global de transferência de calor, mantendo se constante durante a mudança de fase e aumentando subitamente no final da fusão devido ao efeito das correntes de convecção, e estabilizando outra vez no final do ensaio. Por outro lado, verifica-se que para a frequência de 35 Hz o valor do coeficiente de transferência de calor do material, cerca de $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, é praticamente o dobro do valor deste coeficiente nos ensaios a uma frequência de 50 Hz, por volta de $250 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Isto é estranho porque o coeficiente de transferência de calor do lado do material de mudança de fase não deveria depender da velocidade do escoamento do óleo a menos que o tempo de residência do óleo junto à cápsula seja importante neste processo de transferência térmica. Esta situação também poderá ter a ver com um cálculo menos correto do coeficiente de transferência de calor do lado do óleo, devido à aproximação demasiado simplista que foi feita para a sua determinação.

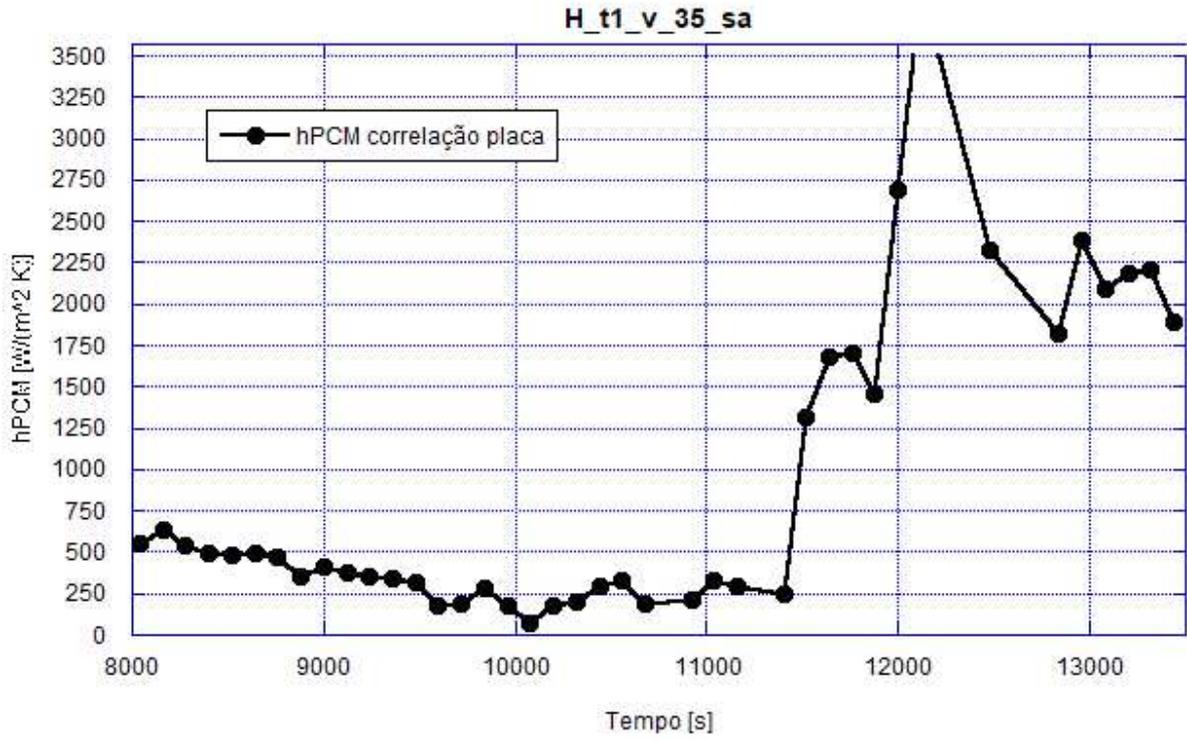


Figura 5.22- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_35_sa.

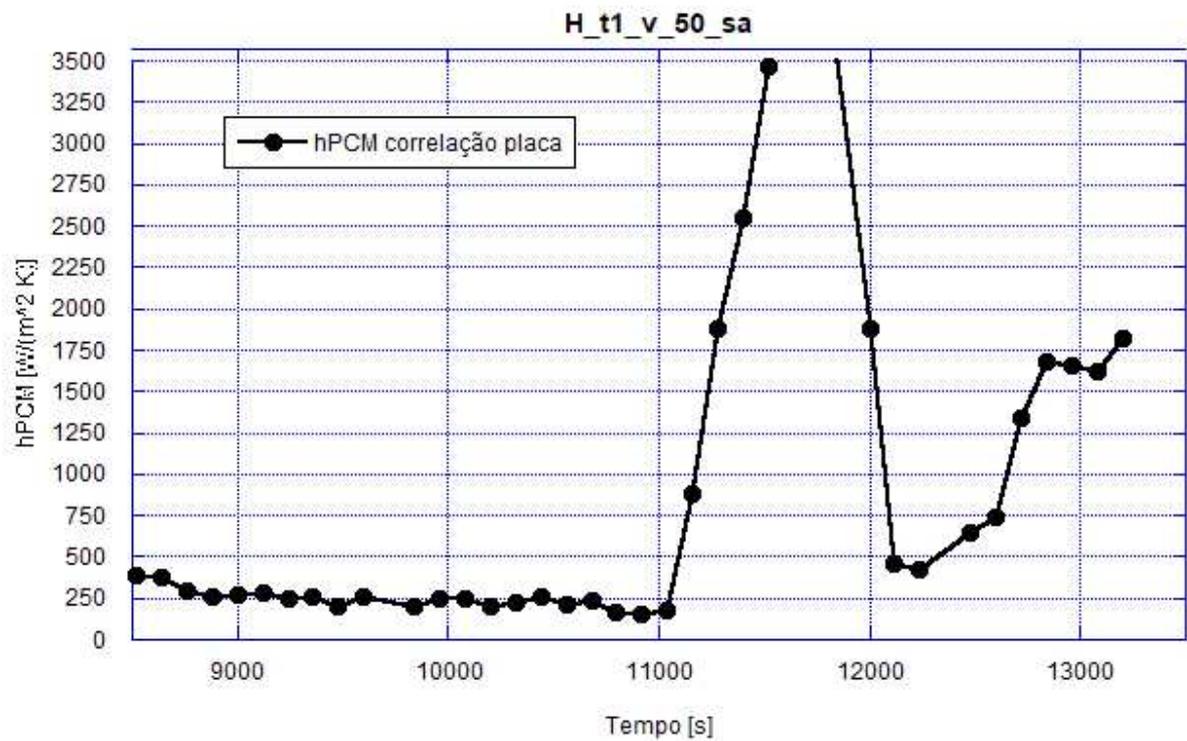


Figura 5.21- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_50_sa.

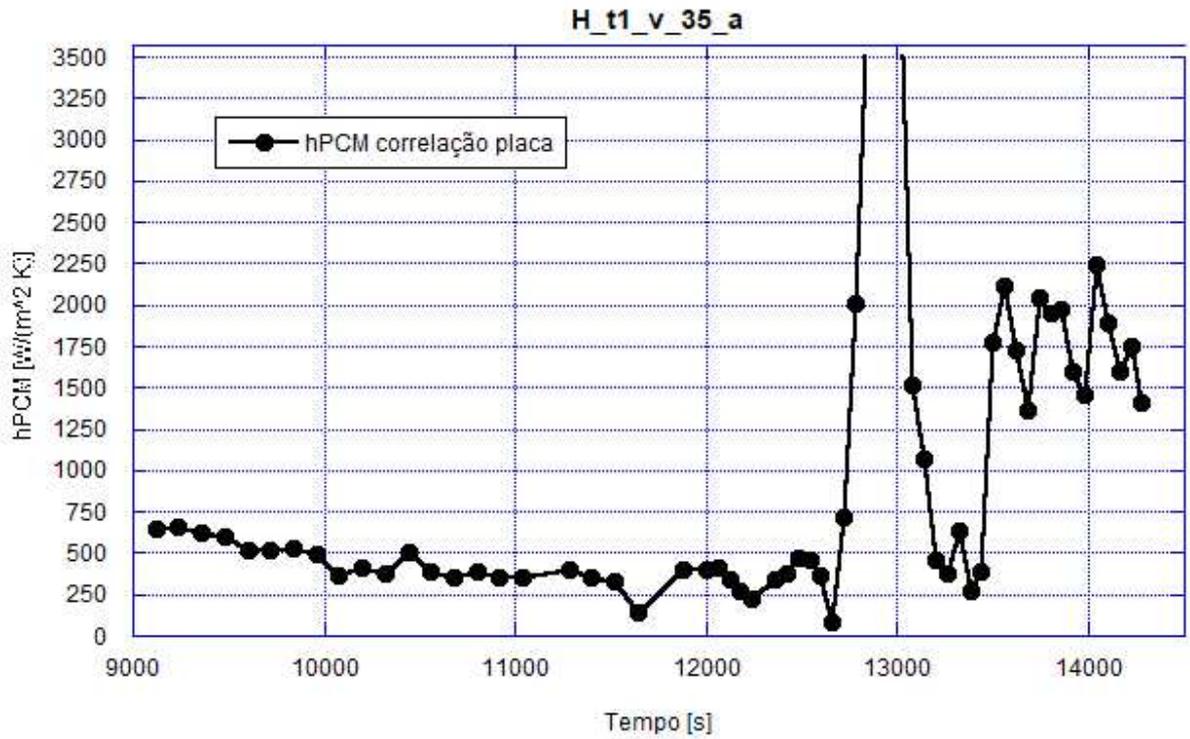


Figura 5. 23- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_35_a.

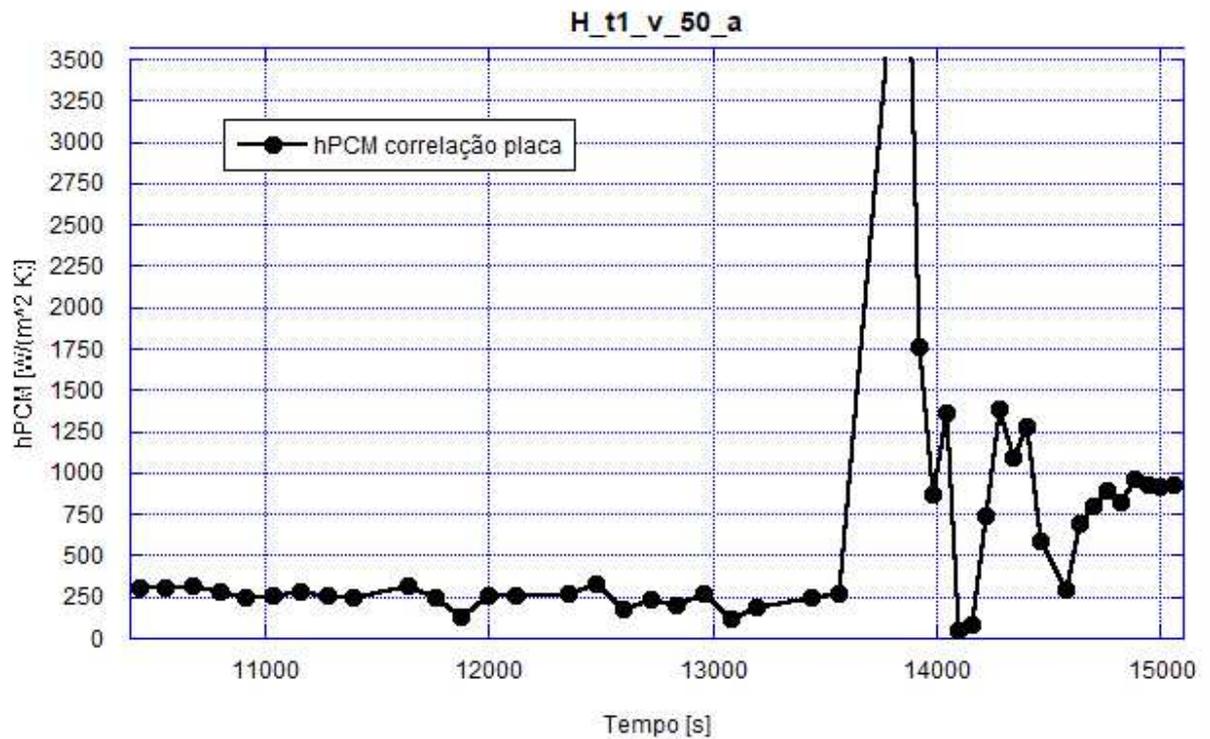


Figura 5. 24- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_v_50_a.

Como se constata os resultados obtidos a partir da correlação da placa plana são compatíveis com resultados obtidos anteriormente para outros materiais de mudança de fase (Esteves, 2016).

5.2.2.2 Escoamento Cruzado

Contrariamente ao caso do escoamento paralelo, o cálculo do coeficiente de transferência de calor com escoamento cruzado, com a cápsula na disposição horizontal, é de clara e fidedigna aplicação através de uma correlação usualmente utilizada.

Utilizando a equação de *Hilpert*, a equação 5.9 e substituindo os coeficientes *C* e *m* para as respectivas gamas de Reynolds, calculou-se o coeficiente de transferência de calor do termofluido e novamente com a equação 5.6 calculou-se o coeficiente de transferência de calor do material (Incropera e Dewitt, 2011).

$$\overline{Nu}_D = C Re_L^m \times Pr^{1/3} = \frac{h_{out} D}{k} \quad (5.9)$$

Tabela 5.1- Coeficientes da equação de *Hilpert* em função do número de *Reynolds* (Incropera e Dewitt, 2011)

<i>Re</i>	<i>C</i>	<i>m</i>
40-4000	0,683	0,466
4000-40000	0,193	0,618

De seguida serão apresentados os gráficos resultantes dos cálculos para o coeficiente de transferência de calor do material, com a correlação apresentada acima para os ensaios realizados. Os gráficos não apresentados nesta seção podem ser encontrados no anexo F. Os números de *Reynolds* atingidos para esta disposição variaram entre 40- 1500, tratando -se assim de um escoamento laminar.

Nos gráficos a seguir apresentados é possível observar que para a disposição horizontal o material de mudança de fase possui um valor de 500 W/(m²·K) para a frequência de 35 Hz e um valor de cerca de 250 W/(m²·K) para a frequência de alimentação da bomba de 50 Hz. Similarmente ao que se verificou nos ensaios verticais. Isto é o material de mudança de fase possui um coeficiente de transferência de calor superior para a frequência de alimentação da bomba menor. Ora esta concordância entre os valores do coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase para as duas orientações da cápsula permite constatar por um

lado que a opção da escolha da placa plana para a orientação vertical da cápsula estava correta e por outro lado que o uso da correlação de regime turbulento foi um erro.

Verifica-se também que a presença de alhetas não influencia de uma maneira significativa o valor do coeficiente de transferência calor do material.

A não influência das alhetas assim como a dependência do coeficiente de transferência de calor do tempo de residência do óleo térmico indiciam que o fator dominante neste processo de transferência de calor se verifica do lado do óleo térmico.

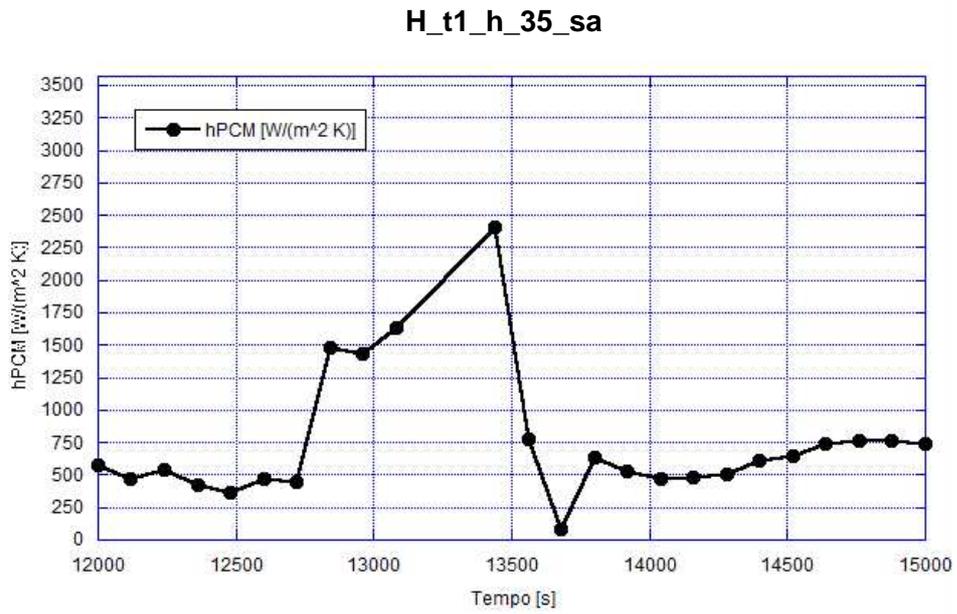


Figura 5.25- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_35_sa.

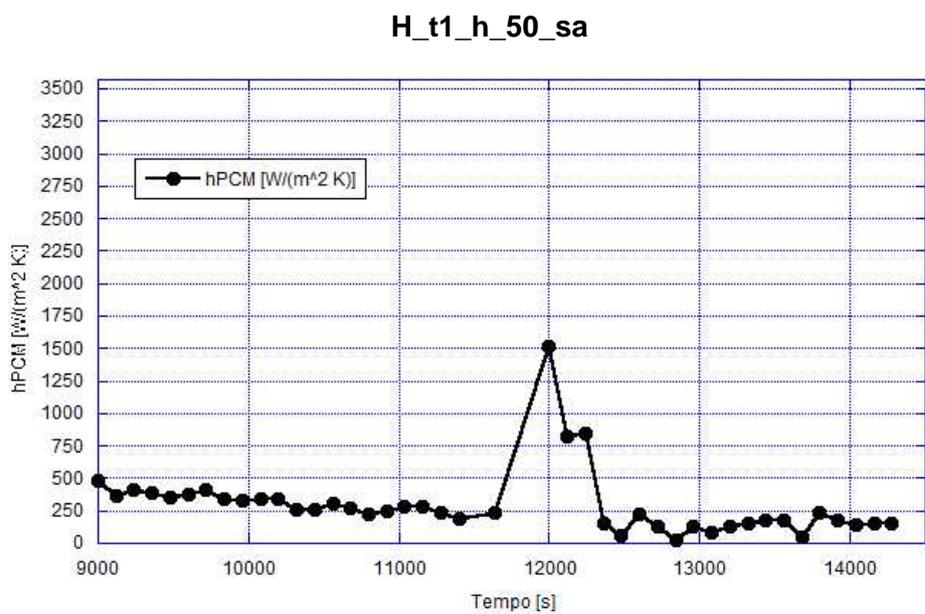


Figura 5.26- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_50_sa.

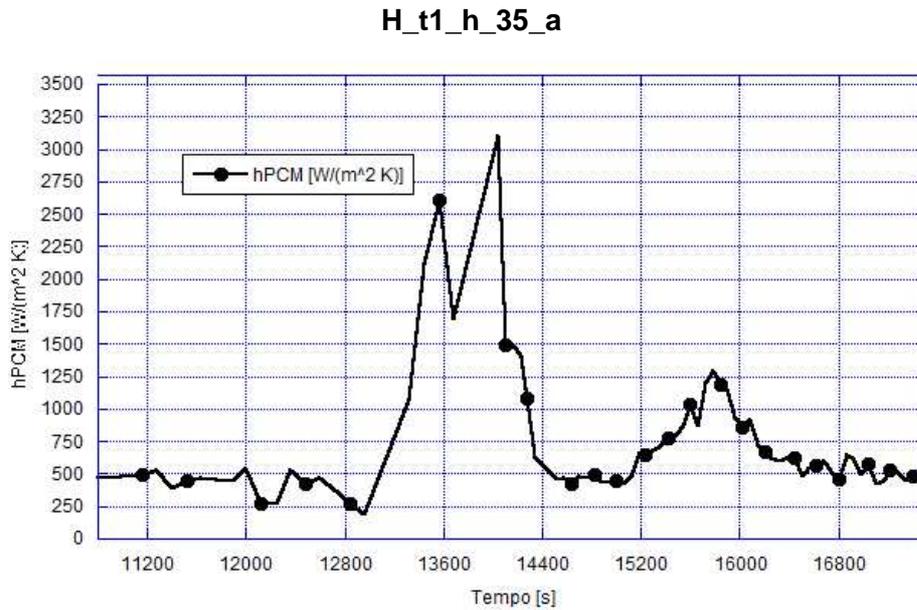


Figura 5.27- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_35_a.

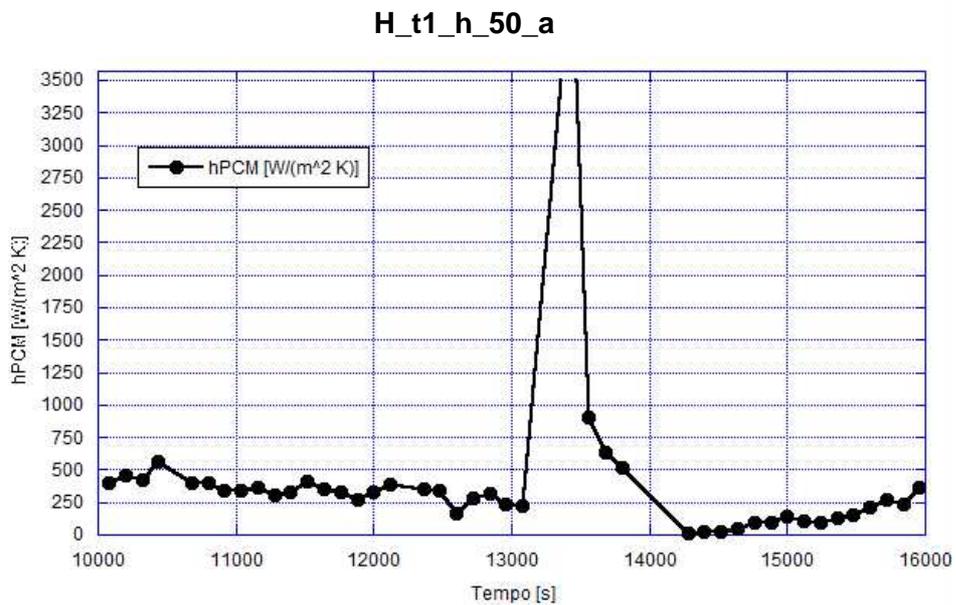


Figura 5.28- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t1_h_50_a.

É possível ainda acrescentar que, apesar da existência de maiores correntes de convecção na cápsula com orientação vertical, os valores do coeficiente de transferência de calor do material são da mesma grandeza para ambas as disposições da cápsula.

6 Conclusões

Com o trabalho efetuado desenvolveu-se e estudou-se o desempenho térmico de uma cápsula metálica para acumulação de energia térmica no interior da qual foi colocado um material de mudança de fase. Este material, um açúcar alcoólico derivado do manitol ($C_6H_{14}O_6$) com o nome comercial de PlusICE A164, passava da fase sólida à líquida a temperaturas da ordem dos 164 °C. Para conseguir este objetivo utilizou-se uma instalação laboratorial existente no Laboratório de Combustão do INEGI e na qual foram feitas algumas alterações. Concretamente implementou-se um novo sistema de aquecimento, um novo transdutor de pressão, um novo permutador de testes, alterou-se ligeiramente o vaso de expansão do termofluido e usou-se ainda um novo sistema de aquisição de dados. A cápsula de acumulação de energia térmica, com a forma cilíndrica tinha 0,844 L de capacidade. Adicionalmente foi construído um conjunto de alhetas que foi introduzido no interior da cápsula.

Foram realizados ensaios para diferentes condições de operação, nomeadamente foi estudada a influência da disposição da cápsula (vertical e horizontal), da geometria da cápsula (normal e alhetada) e da frequência de alimentação da bomba centrífuga (35 e 50 Hz). Foram obtidas as curvas da evolução da temperatura do material durante o processo de fusão e solidificação. Obtiveram-se ainda as evoluções do coeficiente global de transferência de calor associadas ao conjunto permutador de testes e cápsula.

Foi realizada uma análise ao coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase. Constatou-se que quer o coeficiente global de transferência de calor do conjunto, quer o coeficiente de transferência de calor do material, apresentaram melhores resultados para a frequência mais baixa (35 Hz), dando assim a entender que o tempo de residência do óleo térmico junto à cápsula condiciona a taxa de transferência de calor para esta.

Enquanto que os ensaios na disposição vertical demonstraram tornar o processo de mudança de fase mais rápido, foi com a cápsula horizontal alhetada e com a frequência mais baixa que se obtiveram os maiores coeficientes globais de transferência de calor pela ordem dos $1500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Já os piores cenários verificaram-se para os ensaios verticais com a frequência de alimentação da bomba mais alta (50Hz) com valores pela ordem dos $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

Apesar da inserção do sistema alhetado não se ter refletido notavelmente no aumento dos coeficientes de transferência de calor, otimizou o processo de mudança de fase, tornando o campo de temperatura no material de mudança de fase muito mais homogênea.

No caso do coeficiente de transferência de calor do material, os melhores resultados também foram atingidos para frequência mais baixa, na ordem dos $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, cerca do dobro face aos ensaios à frequência mais alta. Isto foi constatado quer nos ensaios verticais, quer nos ensaios horizontais.

Concluiu-se assim, que as condições que permitem alcançar um melhor desempenho térmico do processo de mudança de fase são com a cápsula na orientação horizontal, à frequência de alimentação da bomba mais baixa (35 Hz) e com o sistema alhetado.

7 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, no que diz respeito à instalação, será de todo o interesse adaptar a instalação para temperaturas da ordem dos 200° C, nomeadamente colocar tomas de pressão de aço e com tomadas mais longas, de maneira a evitar que as altas temperaturas inviabilizem o bom funcionamento do transdutor e da leitura do caudal mássico. Eventualmente, aconselha-se a substituição do transdutor utilizado para um transdutor adequado para uma gama mais alta de temperaturas.

Outro aspeto a considerar, para a análise do patamar de mudança de fase no processo de arrefecimento do material será necessária a incorporação de um permutador com uma potência térmica muito inferior ao atual, pois na instalação utilizada a potência do permutador do sistema de arrefecimento era cerca de 10 vezes superior à potência de aquecimento, o que permitiu analisar em grande detalhe o comportamento do material no processo de fusão, mas não permitiu estudar adequadamente o comportamento do material no seu processo de solidificação.

Seria, por outro lado, de todo o interesse a implementação de uma malha de termopares radial de maneira a estudar o comportamento do material de mudança de fase radialmente. Para facilitar o cálculo do coeficiente de transferência de calor do termofluido sugere-se a colocação de um termopar na parede exterior da cápsula, possibilitando assim um cálculo rigoroso do coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase. Também se sugere a adição ao material de mudança de fase de materiais com a grafite e a aplicação alhetas de diferentes geometrias de maneira a aumentar a taxa de transferência térmica no interior da cápsula.

Recomenda-se ainda o estudo do comportamento térmico de leitos fixos compostos por cápsulas cheias de material de mudança de fase de modo a se avaliarem eventuais diferenças de desempenho entre as cápsulas isoladas e em grupo.

Referências

- ABDULATEEF, A. M., MAT, S., ABDULATEEF, J., SOPIAN, K. & AL-ABIDI, A. A. 2018. Geometric and design parameters of fins employed for enhancing thermal energy storage systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 1620-1635.
- ALOTTO, P., GUARNIERI, M. & MORO, F. 2014. Redox flow batteries for the storage of renewable energy: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 325-335.
- ANEKE, M. & WANG, M. 2016. Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review. *Applied Energy*, 179, 350-377.
- ASLANI, M. 2012. Electrochemical Double Layer Capacitors (Supercapacitors). Stanford University.
- AYDINA, D., UTLUB, Z. & KINCAY, O. 2015. Thermal performance analysis of a solar energy sourced latent heat storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1213-1225.
- BAILEY & MACKEY, L. 2017. Pressure Transducers; Keeping pressure under control Birmingham, UK.
- BARBOUR, E., WILSON, I. A. G., RADCLIFFE, J., DING, Y. & LI, Y. 2016. A review of pumped hydro energy storage development in significant international electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 421-432.
- CHEN, H., CONG, T. N., YANG, W., TAN, C., LI, Y. & DING, Y. 2009. Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Progress in Natural Science*, 19, 291-312.
- COLEMAN, H. W. & STEELE, W. G. 2009. *Experimentation, Validation and Uncertainty Analysis for Engineers.*, Hoboken, NJ, USA, Wiley.
- COSTA, S. P. L. 2014. *Armazenamento de Energia Térmica Através de Materiais de Mudança de Fase* Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- CUNHA, J. P. D. & EAMES, P. 2016. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials- A review. *Applied Energy* 177, 227-238.
- EASTMAN 2015. Therminol Fluidos de troca térmica da Eastman. In: COMPANY, E. C. (ed.).
- ENERGY STORAGE COUNCIL 2015. *Global Energy Storage Market Overview & Regional Summary Report.*

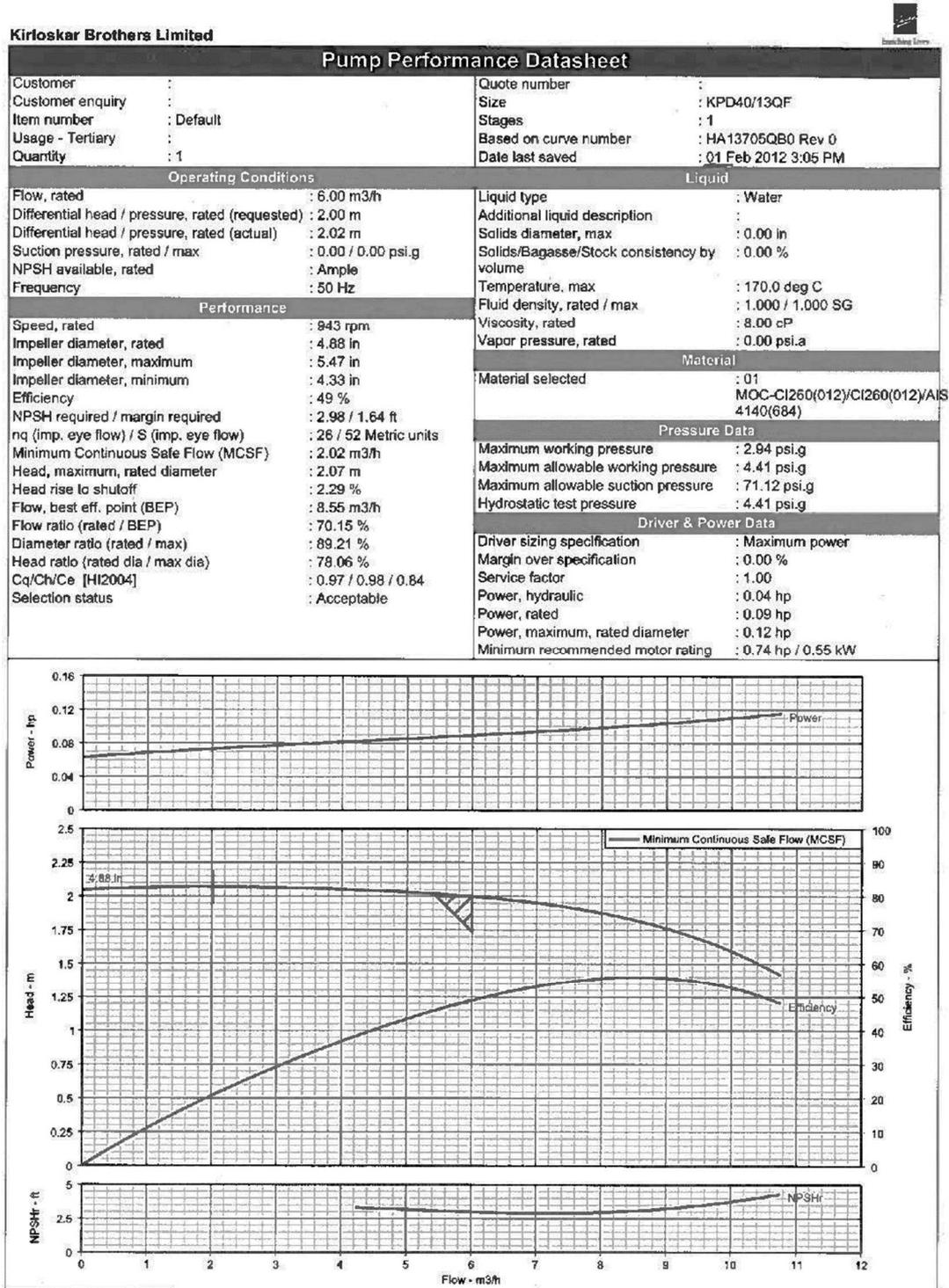
- ENERGY SAGE, I. 2017. *Solar Energy Storage- Benefits of solar bateries* [Online]. Available: <https://www.energysage.com/solar/solar-energy-storage/benefits-of-solar-batteries/> [Acedido em Outubro de 2017].
- ESTEVEZ, L. P. F. 2016. *Testes a Dois Materiais de Mudança de Fase para Armazenamento de Energia Térmica*. Universidade do Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- EUROPEAN COMMISSION 2016. An EU Strategy on Heating and Cooling
- FALLAHI, A., GULDENTOPS, G., TAO, M., GRANADOS-FOCIL & VAN DESSEL, S. S. 2017. Review on solid-solid phase change materials for thermal energy storage: Molecular structure and thermal properties. *Applied Thermal Engineering*, 127, 1427-1441.
- FARID, M. M., KHUDHAIR, A. M., RAZACK, S. A. K. & AL-HALLAJ, S. 2004. A review on phase change energy storage: materials and applications. *Energy Conversion and Management*, 45, 1597-1615.
- FERRER, G., SOLÉ, A., BARRENECHE, C., MARTORELL, I. & CABEZA, L. F. 2015. Corrosion of metal containers for use in PCM energy storage. *Renewable Energy*, 76, 465-469.
- FLEISCHER, A. S. 2015. *Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials; Fundamentals and Applications*, Minneapolis, MN, USA.
- GAO, D. & DENG, T. 2013. Energy storage: Preparations and physicochemical properties of solidliquid Phase change materials for thermal energy storage.
- GUNEY, M. S. & TEPE, Y. 2017. Classification and assement of energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 75, 1187-1197.
- HOLMAN, J. P. 2012. *Experimental Methods Fors Engineers*, McGraw-Hill.
- IBRAHIM, H. & ILINCA, A. 2013. Techno-Economic Analysis of Different Energy Storage Technologies. In: ZOBAA, A. F. (ed.) *Energy Storage- Technologies and Applications*. InTech.
- INCROPERA, F. P. & DEWITT, D. P. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, USA.
- INEGI. 2011. *A Instituição* [Online]. Available: <http://www.inegi.up.pt/instituicao.asp?idm=1&idsubm=5&LN=> [Acedido em Outubro de 2017].
- INEGI. 2017. *Consultoria-Energia, Sustentabilidade e Economia Circular* [Online]. Available: <https://servicos.inegi.up.pt/pt/consultoria-areas/energia-sustentabilidade-e-economia-circular/> [Acedido em Janeiro de 2018].
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. 2014. Technology Roadmap: Energy Storage. *Paris, France*, 64
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. 2016. Energy Policies of IEA Countries 2016 Review.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, I. 2017. World Energy Balances 2017.
- JANKOWSKI, N. R. & MCCLUSKEY, F. P. 2014. A review of phase change materials for vehicle component thermal buffering. *Applied Energy*, 113, 1525-1561.
- KHAN, M. M., SAIDUR, A. R. & AL-SULAIMAN, F. A. 2017. A review for phase change materials (PCMs) in solar absorption refrigeration systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 105-137.

- KIBRIA, M. A., ANISUR, M. R., MAHFUZ, M. H., SAIDUR, R. & METSELAAR, I. H. S. C. 2015. A review on thermophysical properties of nanoparticle dispersed phase change materials. *Energy Conversion and Management*, 95, 69-89.
- LEVENSPIEL, O. 2014. *Engineering Flow and Heat Change*, Oregon State University, Corvallis, OR, USA, Springer.
- LIZANA, J., CHACARTEGUI, R., BARRIOS- PADURA, A. & VALVERDE, J. M. 2017. Advances in thermal energy storage materials and their applications towards zero energy buildings: A critical review. *Applied Energy*, 203 219-239.
- MAHLIA, T. M. I., SAKTISAHDAN, T. J., JANNIFAR, A., HASAN, M. H. & MATSEELAR, H. S. C. 2014. A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 33, 532-545.
- MOHAMED, S., AL-SULAIMAN, F. A., IBRAHIM, N., ZAHIR, M., AL-AHMED, A., SAIDUR, R., YILBAŞ, B. S. & SAHIN, A. Z. 2017. A review on current status and challenges of inorganic phase change materials for thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1072-1089.
- NAULT, R. M. 2005. Basic research needs for solar energy utilization, Report of the basic energy sciences workshop on solar energy utilization. *Argonne National Laboratory*, 18-21.
- NIAZ, S., MANZOOR, T. & PANDITH, A. H. 2015. Hydrogen storage: materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 457-69.
- PARFOMAK, P. W. 2012. Energy Storage for Power Grids and Electric Transportation: A Technology Assessment In: SERVIVE, O. R. (ed.).
- PCM, P. L. 2011. PlusICE® Phase Change Materials. Yaxley, UK.
- PG&E, P. G. A. E. C. 2017. *Compressed air energy storage* [Online]. Available: https://www.pge.com/en_US/about-pge/environment/what-we-are-doing/compressed-air-energy-storage/compressed-air-energy-storage.page [Acedido em Novembro de 2017].
- ROHIT, A. K., DEVI, K. P. & RANGNEKAR, S. 2017. An overview of energy storage and its importance in Indian renewable energy sector
Part I – Technologies and Comparison. *Journal of Energy Storage*, 13, 10-23.
- ROZENFELD, A., KOZAK, Y., ROZENFELD, T. & ZISKIND, G. 2017. Experimental demonstration, modeling and analysis of a novel latentheat thermal energy storage unit with a helical fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 110, 692-709.
- SALUNKHE, P. B. & SHEMBEKAR, P. S. 2012. A review on effect of phase change material encapsulation on the thermal performance of a system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5603-5616.
- SBQ, S. B. D. Q. 2017. *Pilhas e Baterias: Funcionamento e Impacto Ambiental-* [Online]. Available: http://qnint.s bq.org.br/qni/popup_visualizarConceito.php?idConceito=45&semFrame=1 [Acedido em Outubro de 2017].
- SHARMA, A., TYAGI, V. V., CHEN, C. R. & BUDDHI, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13, 318-345.

- SHUYING, W., ZHU, D., ZHANG, X. & HUANG, J. 2010. Preparation and melting/freezing characteristics of Cu/Paraffin Nanofluid as Phase-Change Material (PCM). *Energy Fuels*, 24, 1894-1898.
- TAY, N. H. S., BRUNO, F. & BELUSKO, M. 2013. Comparison of pinned and finned tubes in a phase change thermal energy storage system using CFD. *Applied Energy*, 104, 79-86.
- TRHLIKOVA, L., ZMEŠKAL, O., PŘIKRYL, R. & FLORIAN, P. 2015. Thermal Properties of Mannitol Derivative. *Advanced Materials Research*, 1126 181-186.
- XIE, N., HUANG, Z., LUO, Z., GAO, X., FANG, Y. & ZHANG, Z. 2017. Inorganic Salt Hydrate for Thermal Energy Storage. *Applied Sciences*, 7, 1317.

ANEXO A: Características da bomba centrífuga

Neste anexo apresenta-se a informação complementar relativamente à bomba centrífuga utilizada na instalação de testes.



ANEXO B: Propriedades do termofluido-*Therminol 66*

Therminol 66 é um fluido sintético destinado para a transferência de calor, altamente estável e com um longo tempo de vida para temperaturas até 345 °C. Na Figura B.1 observa-se a variação da viscosidade dinâmica em função da temperatura, conclui-se que a partir dos 100°C a viscosidade dinâmica mantém-se aproximadamente constante com o aumento da temperatura. Na Tabela B.1 apresentam-se as diversas propriedades do termofluido. Na Tabela B.1 apresenta-se a variação das propriedades do termofluido *Therminol 66* com a temperatura.

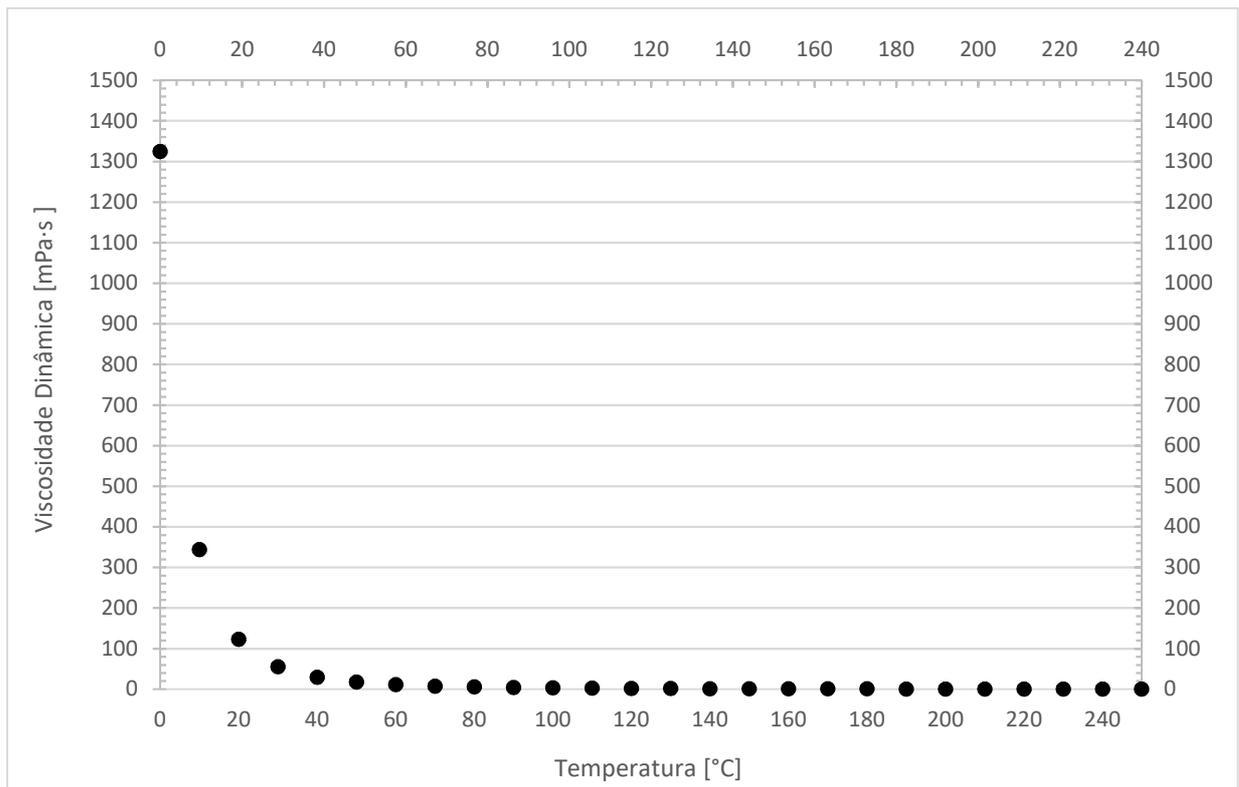


Figura B.1- Variação da viscosidade dinâmica do *Therminol 66* com a temperatura.

Tabela B.1- Propriedades do termofluido *Therminol 66* (Eastman, 2015)

Composição	Terfenilo hidrogenado	
Aparência	Líquido amarelo pálido límpido	
Temperatura max. da massa	345°C	
Temperatura max. do filme	375°C	
Visc. Cinemática (v) @ 40 °C	DIN 51562- 1	mm ² /s (cSt)
Massa volúmica @ 15°C	DIN 51757	1011 kg/m ³
Ponto de fulgor	DIN EN 22719	170°C
Ponto de combustão	ISO 2592	
Temperatura de autoignição	DIN 51794	
Ponto de fluidez	ISO 3016	
Ponto de ebulição @ 1013 mbar		
Coefficiente de expansão térmica	0,0009/°C	
Humidade	DIN 51777-1	
Acidez total	DIN 51558 -1	
Conteúdo de Cloro	DIN 51577- 3	
Corrosão ao cobre	EN ISO 2160	<1a
Peso médio molecular	252	

Tabela B.1- Propriedades do termofluido *Therminol 66* em função da temperatura (Eastman, 2015)

Temperatura [°C]	Massa volúmica [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Calor específico [kJ/(kg·K)]	Viscosidade		Pressão de vapor (abs.) [kPa]
				Dinâmica [mPa·s]	Cinemática [mm ² /s]	
0	1021,5	0,118	1,495	1324,87	1297,01	-
10	1014,9	0,118	1,529	344,26	339,20	-
20	1008,4	0,118	1,562	123,47	122,45	-
30	1001,8	0,117	1,596	55,60	55,51	-
40	995,2	0,117	1,630	29,50	29,64	-
50	988,6	0,116	1,665	17,64	17,84	-
60	981,9	0,116	1,699	11,53	11,74	-
70	975,2	0,115	1,733	8,06	8,26	0,01
80	968,5	0,115	1,768	5,93	6,12	0,02
90	961,8	0,114	1,803	4,55	4,73	0,03
100	955,0	0,114	1,837	3,60	3,77	0,05
110	948,2	0,113	1,873	2,92	3,08	0,08
120	941,4	0,112	1,908	2,42	2,58	0,12
130	934,5	0,111	1,943	2,05	2,19	0,18
140	927,6	0,111	1,978	1,75	1,89	0,27
150	920,6	0,110	2,014	1,52	1,65	0,40
160	913,6	0,109	2,050	1,34	1,46	0,58
170	906,6	0,108	2,086	1,18	1,30	0,83
180	899,5	0,107	2,122	1,06	1,17	1,17
190	892,3	0,107	2,158	0,95	1,06	1,62
200	885,1	0,106	2,195	0,86	0,97	2,23
210	877,8	0,105	2,231	0,78	0,89	3,02

220	870,4	0,104	2,268	0,72	0,82	4,06
230	863,0	0,103	2,305	0,66	0,77	5,39
240	855,5	0,102	2,342	0,61	0,71	7,10
250	847,9	0,100	2,379	0,57	0,67	9,25
260	840,3	0,099	2,417	0,53	0,63	11,95
270	832,5	0,098	2,455	0,49	0,59	15,31
280	824,6	0,097	2,492	0,46	0,56	19,46
290	816,6	0,096	2,531	0,44	0,54	24,55
300	808,5	0,095	2,569	0,41	0,51	30,73
310	800,3	0,093	2,608	0,39	0,49	38,22
320	792,0	0,092	2,647	0,37	0,47	47,20
330	783,5	0,091	2,686	0,35	0,45	57,94
340	774,8	0,089	2,726	0,34	0,43	70,68
350	765,9	0,088	2,766	0,32	0,42	85,74
360	756,9	0,086	2,806	0,31	0,41	103,42
370	747,7	0,085	2,847	0,30	0,39	124,09
380	738,2	0,084	2,889	0,28	0,38	148,13

ANEXO C: Sistema de aquisição de dados

Para o sistema de aquisição de dados experimentais obtidos na instalação foram utilizadas duas placas de aquisição de dados e o *software DASYLab*.

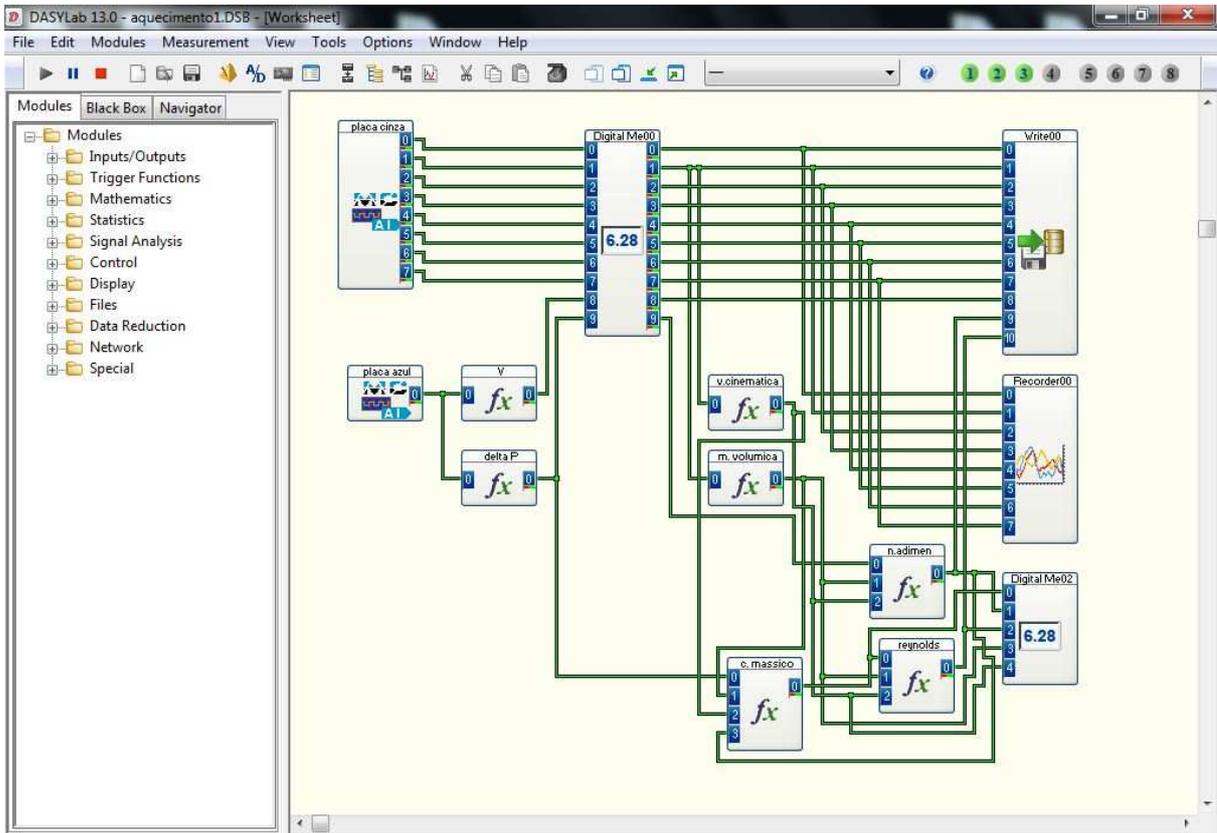


Figura C.1- *Esquema* do processo de aquecimento.

Foram criadas duas folhas de trabalho, uma para o processo que fusão (aquecimento) outra para o processo de solidificação (arrefecimento).

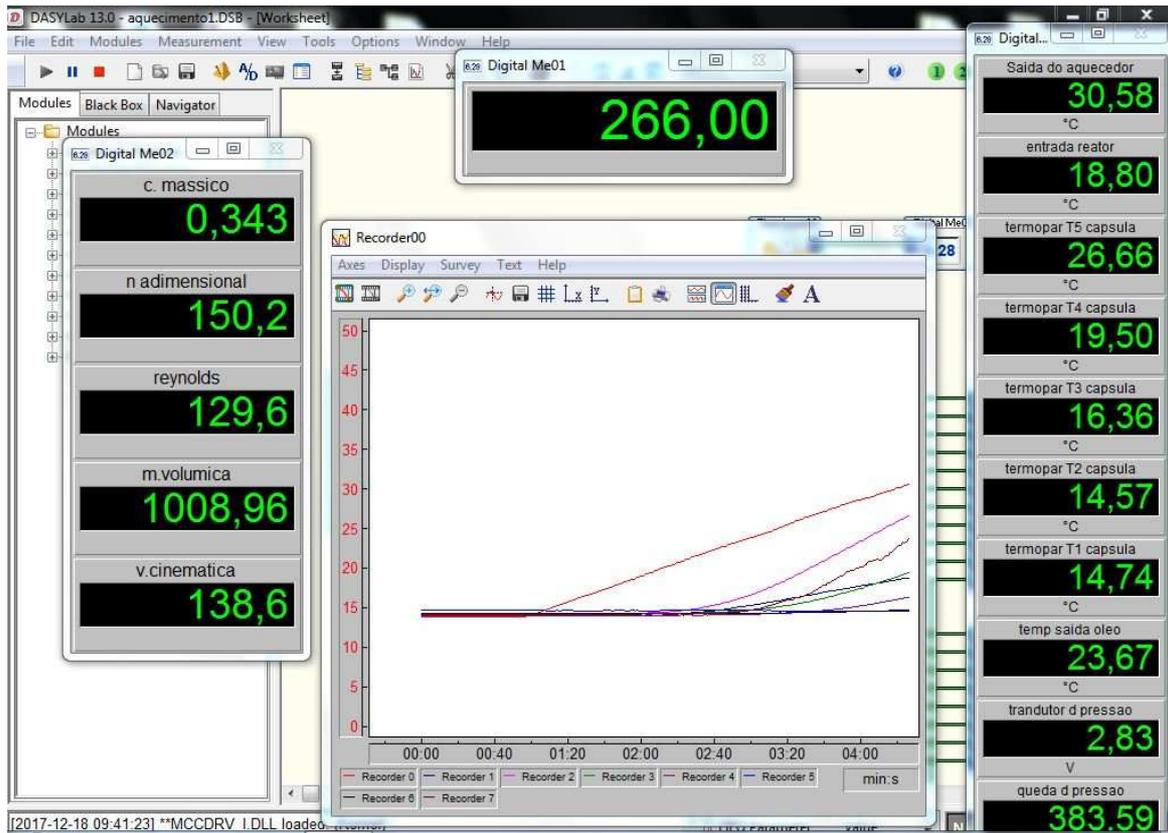


Figura C.2- Imagem do programa *DASYLab* no processo de aquecimento.

Como se pode observar na Figura C.1 o programa *DASYLab* permite inserir fórmulas para o tratamento de dados (viscosidade cinemática, diferencial de pressões, massa volúmica, caudal mássico, número adimensional e número de Reynolds), assim como gráficos que uma vez iniciado o ensaio permitem observar a variação temporal dos diversos parâmetros (Figura C.2).

Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase

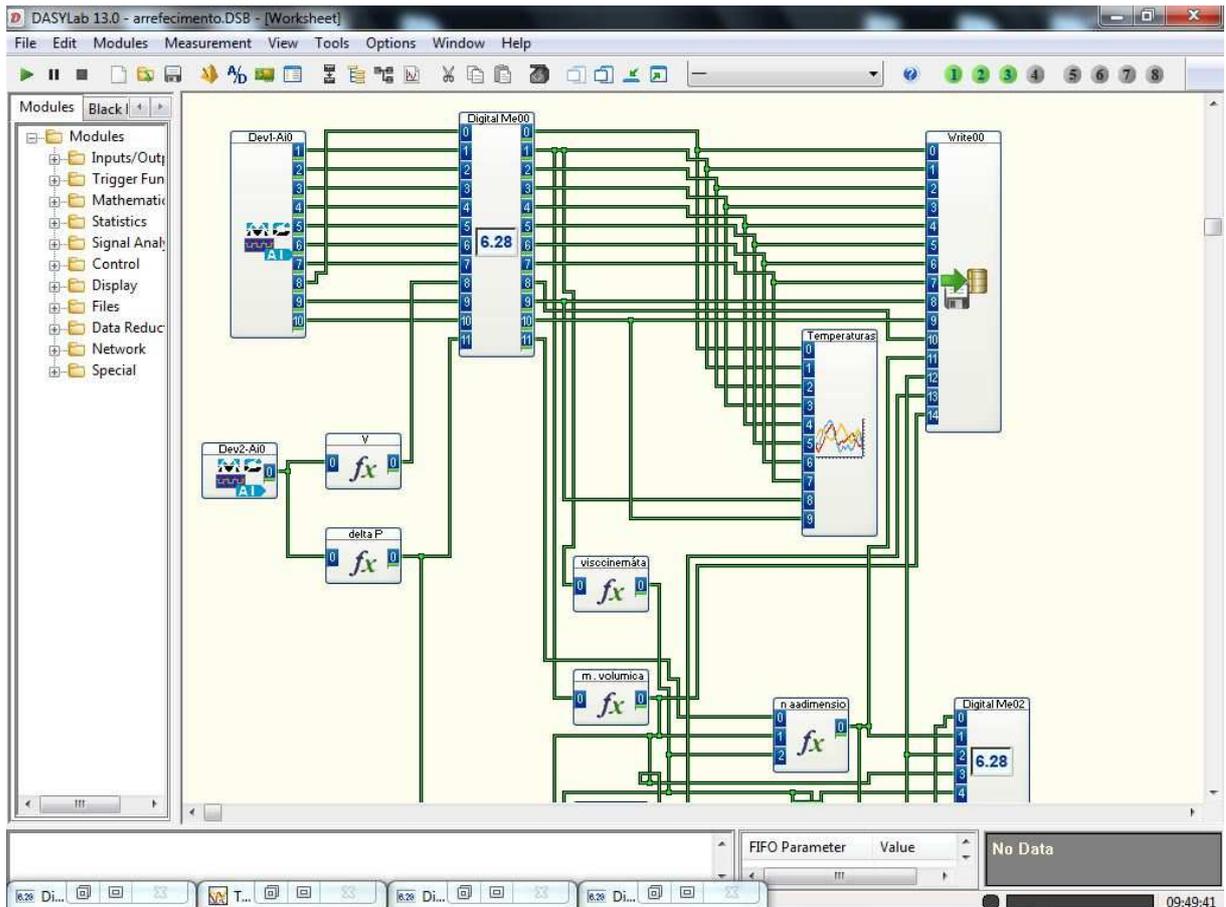


Figura C.3- Esquema do processo de arrefecimento.

ANEXO D:Caraterísticas e calibração da placa orifício

A placa orifício presente na instalação, cujo desenho se encontra na Figura D.1, foi previamente projetada para a instalação presente anteriormente no laboratório.

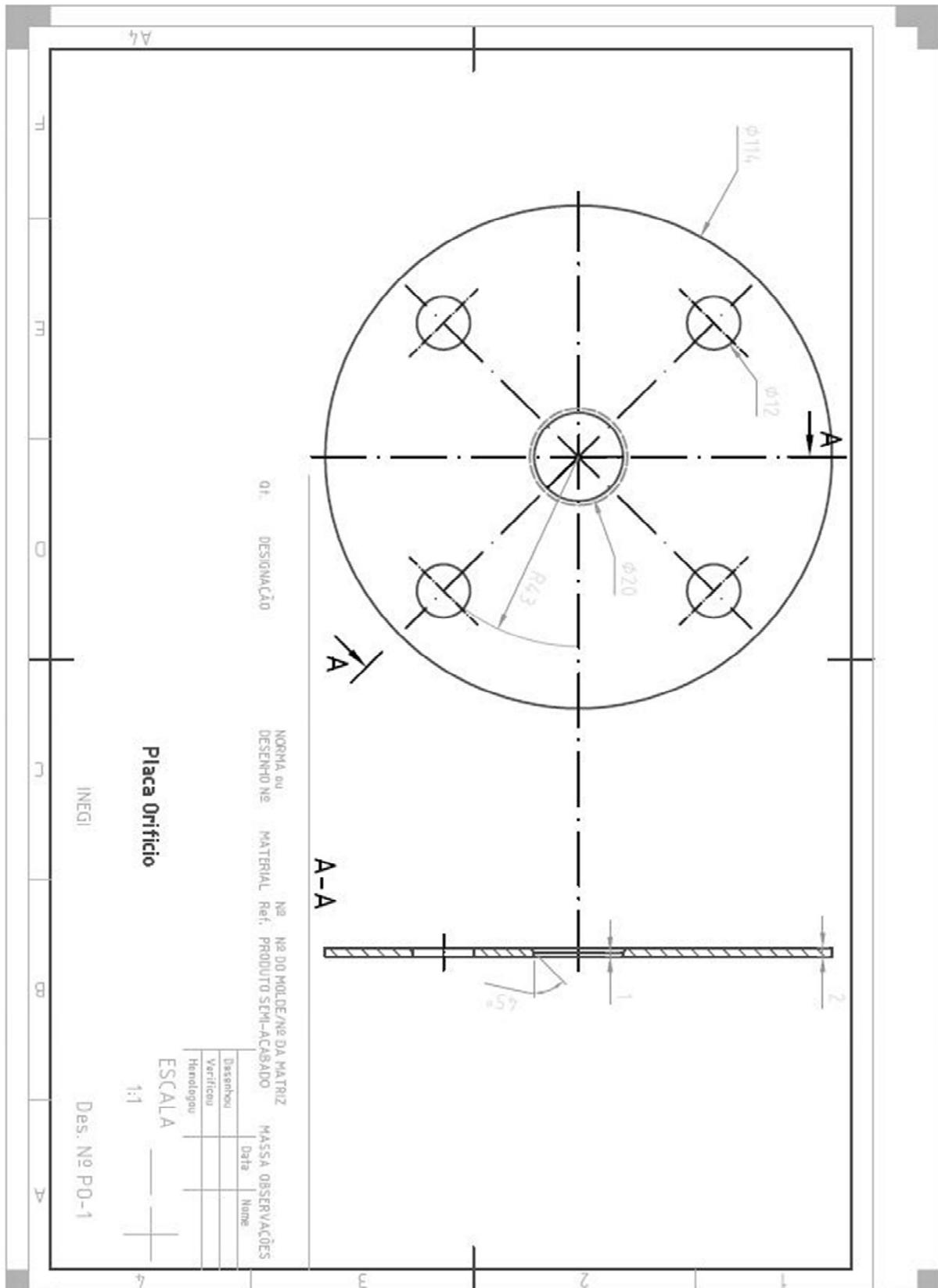


Figura D.1- Desenho de construção da placa orifício. (Esteves, 2016)

Assim, a equação D.1, permite-nos calcular o caudal mássico com o diferencial de pressões lido, a razão de diâmetro do diafragma e o coeficiente de descarga da placa.

$$\dot{m} = C_d F_{et} F_{eg} \frac{\sqrt{2}\pi D^2}{4} \frac{\beta^2}{\sqrt{1-\beta^4}} \sqrt{\Delta P \rho} \quad (D.1)$$

Tabela D.1- Características da placa orifício

Parâmetro	Valor
β [-]	0,833
D [m]	0,024

Sendo as características da placa orifício conhecidas passou-se à recalibração da mesma visto que a instalação sofreu alterações desde a sua última calibração. Para se realizar o processo de calibração foi imprescindível compreender que seria necessário simular várias situações de utilização normal e, simultaneamente, observar o diferencial de pressão obtido, correlacionando-o com a massa escoada através da placa orifício ou diafragma, num determinando intervalo de tempo.

Tendo em conta a experiência do laboratório de combustão em calibração de placas orifícios e analogamente ao método utilizado a instalação anterior, o procedimento consiste em extrair para pesagem o fluido, que num determinado intervalo de tempo atravessa a placa através de uma derivação em circuito aberto, paralela ao circuito principal.

Foi essencial compreender previamente quais as variáveis a medir e que influenciam o resultado. Dado que a massa volúmica e a viscosidade do termofluido *Therminol 66* variam notavelmente com a sua temperatura, esta torna-se assim, para além do caudal e da pressão, uma variável crucial a registar durante esta calibração.

Como a temperatura passa a ser uma variável indispensável na caracterização do caudal, é preciso arranjar um parâmetro que contabilize o caudal e a influência da temperatura sobre a massa volúmica e a viscosidade do termofluido. O parâmetro que relaciona estas variáveis é o número de *Reynolds*. Este número adimensional é dado pela equação D.2 e permite relacionar a influência da temperatura do termofluido com o caudal.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{4\dot{m}}{\mu \pi D} \quad (D.2)$$

É também de todo o interesse caracterizar a queda de pressão na placa orifício através de um número adimensional. É possível de chegar a este número com a manipulação matemática da equação D.1 com a equação D.2.

Na equação D.1 é possível identificar parâmetros geométricos como o diâmetro interior da tubagem D , a razão entre o diâmetro do furo do diafragma e o diâmetro interior da tubagem β , parâmetros corretivos como o fator de expansão térmica F_{et} e o fator de correção do gás F_{eg} que neste caso assume o valor 1, visto que o termofluido pode ser considerado incompressível.

$$F_{et} = 1 + \frac{2}{1 - \beta^4} (\alpha_{em} - \beta^4 \alpha_{et})(T_c - 20) \quad (D.3)$$

Com a equação D.3 é possível caracterizar o fator corretivo associado às diferenças na expansão térmica do elemento medidor e da tubagem, em função da razão de diâmetros. Sendo o elemento medidor fabricado em alumínio e a tubagem em aço o valor de F_{et} apresenta valores sempre próximos de 1.

É possível identificar também variáveis mensuráveis como o caudal mássico \dot{m} e a variação de pressão ΔP , e ainda outras propriedades intrínsecas como a massa volúmica do fluido ρ . Por último há ainda que levar em consideração o coeficiente de descarga C_D que está relacionado com o tipo de escoamento através da placa.

Continuando com a manipulação matemática e agregando a equação D.1 e D.2 é possível obter a equação D.4.

$$Re_D = \frac{4\dot{m}}{\mu\pi D} = \frac{4}{\mu\pi D} C_d F_{et} \frac{\sqrt{2}\pi D^2}{4} \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\Delta P \rho} \quad (D.4)$$

$$Re_D = C_d F_{et} \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.5)$$

$$Re_D = C_d \frac{\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{\frac{2\Delta P \rho D^2 F_{et}^2}{\mu^2}} \quad (D.6)$$

Para obter a correlação entre a queda de pressão ΔP e o caudal medido \dot{m} , recorrendo a números adimensionais, são obtidas, ou pela equação D.5 ou pela equação D.6, dependendo de se considerar, o fator de expansão térmica influente na variação da temperatura ou não. Como

os valores de $F_{et\ se}$ apresentam constantemente próximos de 1, e tendo como objetivo facilitar o tratamento de dados, este fator foi considerado constante e foi utilizada então a equação D.6.

Processo de calibração

Para dar início ao processo de calibração, criou-se então um ramal em derivação, paralelo ao circuito principal, de onde foi extraído o termofluido. Este ramal foi obtido por supressão do circuito de arrefecimento, apenas sendo possível controlar a temperatura por aquecimento e nunca por arrefecimento durante o processo.

As variáveis a registar seriam o diferencial de pressão, a massa escoada, o tempo de escoamento e a temperatura do fluido.

O processo de calibração compreendeu as seguintes etapas sequenciais:

1. Com a bomba centrífuga em funcionamento, o termofluido da instalação é colocado em circulação. O controlo e aumento da temperatura a qual se irá realizar cada calibração é conseguido através do aquecedor elétrico e do controlador PID. Deste modo, estabelece-se a temperatura de calibração e aguarda-se até que o termofluido atinja essa temperatura;
2. Assim que atingida essa temperatura, coloca-se o termofluido em circulação à frequência máxima da bomba (50 Hz). Com o fluido em circulação, aguarda-se até que a temperatura seja uniforme em todo o circuito;
3. Com uma temperatura uniforme e estável, fecha-se a válvula à entrada do aquecedor (Figura D.2- A) e abre-se a válvula do permutador (Figura D.2-B) retirando e armazenando assim o termofluido num recipiente. Como se retira desta forma massa de fluido à instalação, esta terá de ser posteriormente reposta. Esta reposição é efetuada simultaneamente à extração pelo ramal aberto e é realizada através do ponto de cota superior da instalação, o vaso de expansão. Assim que a massa de fluido é extraída e simultaneamente é reposta a mesma massa, volta-se a colocar o fluido em circulação em circuito fechado;
4. Como o termofluido reposto pelo vaso de expansão vai descer e entrar em circulação e este não está à mesma temperatura do restante termofluido em circulação é fundamental repetir o ponto 3 de modo a estabilizar a temperatura no circuito e no vaso de expansão;

5. Quando a temperatura no vaso de expansão estabiliza dá-se início ao processo de calibração propriamente dito. Fecha-se a válvula à entrada do aquecedor e abre-se válvula do ramal de maneira a retirar a massa que passa na placa orifício num dado intervalo de tempo e simultaneamente inicia-se a contagem do tempo de escoamento recorrendo a um cronómetro. Como existe extração de fluido do circuito é necessário a sua reposição, que é efetuada simultaneamente à extração pelo ramal aberto e é realizada através do ponto de cota superior da instalação, o vaso de expansão. Durante a reposição do fluido o nível de óleo no vaso de expansão é mantido constante. Durante a extração é registada a temperatura do fluido, através de um termopar do tipo K. Quando a massa é toda retirada, é efetuada a pesagem do termofluido extraído recorrendo à balança da Figura D.2. Registam-se também os valores de tempo de escoamento, massa e temperatura do fluido. A queda de pressão é adquirida em forma de tensão e registada na forma de tensão pelo conjunto transdutor de pressão-placa de aquisição e é gravada pelo programa de aquisição de dados *DASYLab* para cada ensaio de calibração.
6. Diminui-se a frequência de alimentação para 45 Hz e verificando o passo 4, repete-se o passo 5. Repete-se o processo para 40, 35, 30, 25 e 20 Hz repetindo sempre o passo 5 para estes valores de frequência da bomba.
7. No final do passo 6, retorna-se ao ponto 1 agora para uma nova temperatura e segue-se a mesma sequência de passos até ao passo 6. Este processo é repetido para as temperaturas estipuladas para a calibração de 15°C, 45°C, 85°C, 100°C, 150°C e 170°C.



Figura D.2- Foto da instalação durante o processo de calibração da placa orifício.

Durante este processo de calibração da descrição anterior são obtidas curvas de tensão ao longo do tempo, proporcionais à queda de pressão na placa orifício. Um exemplo desta curva está presente na Figura D.3, onde se podem observar os picos e as quedas de tensão que surgem devido a abertura e fecho das válvulas. Os pontos a considerar são os do patamar entre dois momentos de pico ou queda de tensão. O valor de tensão considerado é dado pelo valor médio desse conjunto de pontos já estabilizados.

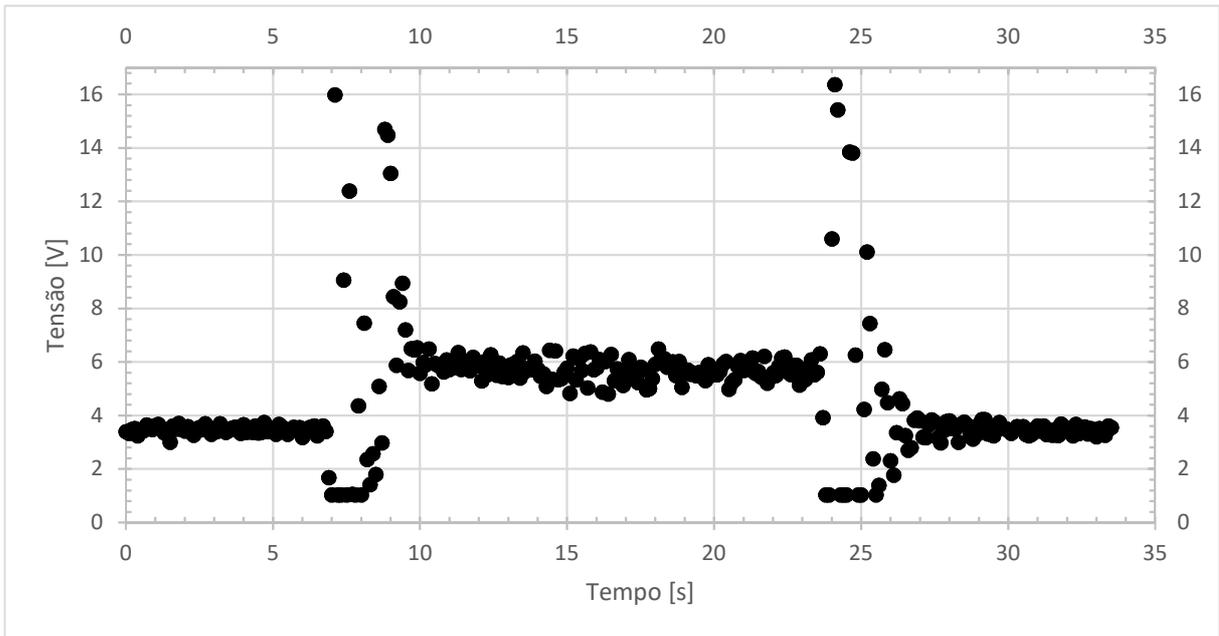


Figura D. 3- Gráfico de um dos valores de tensão obtidos durante a calibração.

Com os valores de tensão obtidos, e conhecendo a relação do transdutor entre a queda de pressão e o valor de tensão lido, apresentada na Figura D., foi possível caracterizar a queda de pressão na placa de orifício.

Sabendo que o transdutor utilizado é um transdutor de pressão para líquidos e tem uma gama de aquisição de 1,872 a 9,36 V para qual 1,872 V correspondem a 0 Pa e 9,36 V correspondem a 3000 Pa, foi efetuada a correção do zero e obtida a equação D.7:

$$\Delta P[Pa] = 400,64 \times V[Volt] - 750 \quad (D.7)$$

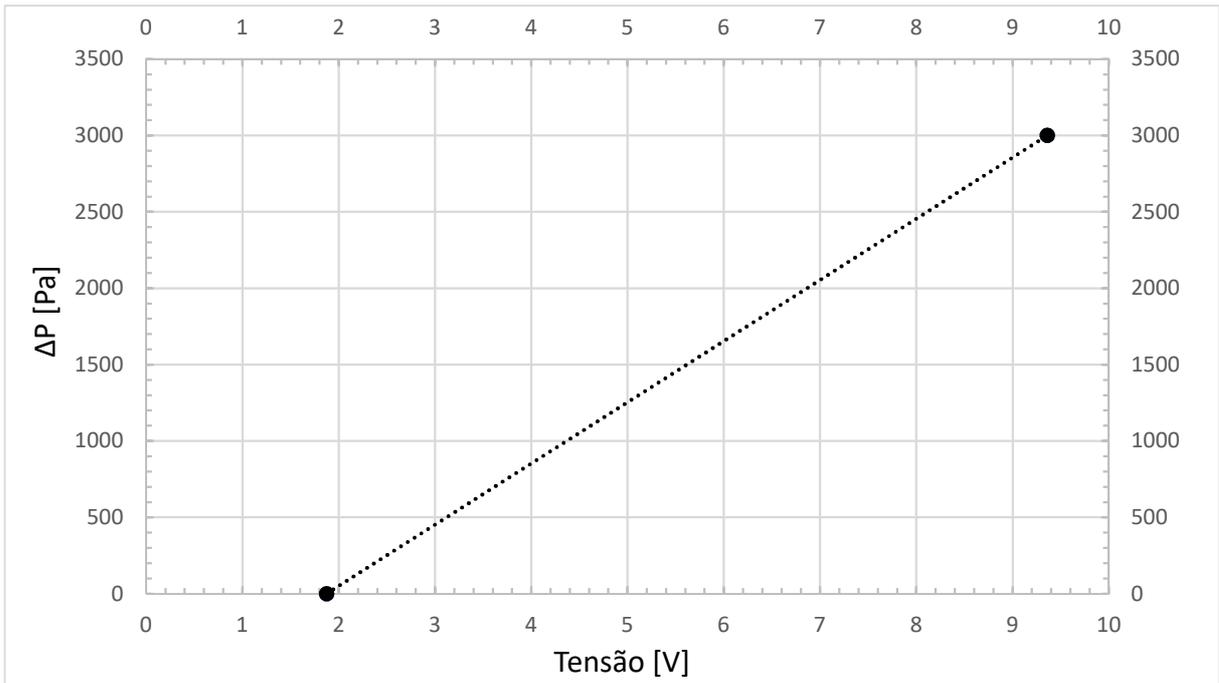


Figura D.4- Relação do transdutor de pressão.

Com os valores obtidos foi possível aplicar as variáveis adimensionais da equação D.6 e traçar o gráfico da Figura D.5, onde é possível observar a correlação resultante do processo de calibração, que permite relacionar a queda de pressão na placa orifício com o caudal em circulação na instalação.

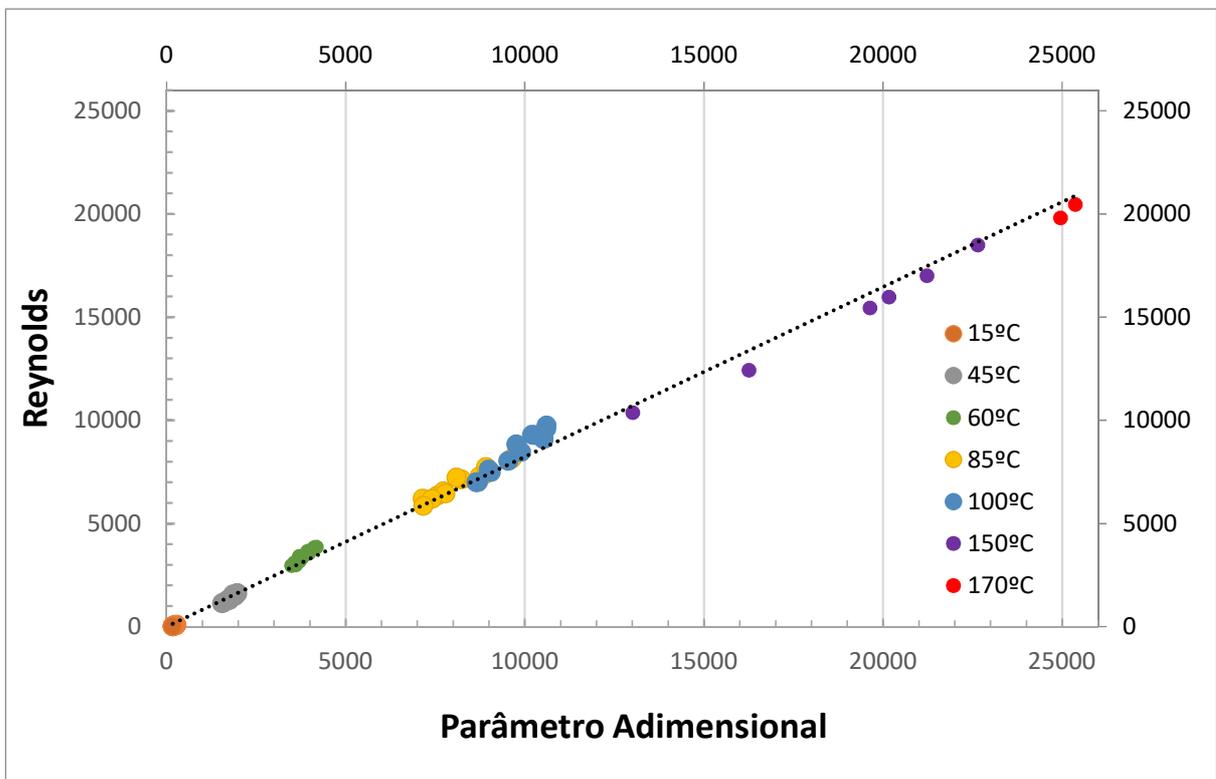


Figura D.5- Curva de calibração da placa orifício.

A equação resultante da calibração e que relaciona ambos os números dimensionais, é dada pela D.8. Esta aproximação linear apresenta um coeficiente de determinação de 0,9951, valor muito satisfatório tendo em conta as circunstâncias da calibração.

$$Re_D = 0,8232 \times \sqrt{\frac{2\Delta P \rho D^2}{\mu^2}} \quad (D.8)$$

Análise de incertezas da calibração

Segue-se agora a uma análise de incertezas à correlação obtida para a calibração, exposta na Figura D..

Na bibliografia relativa à análise de incertezas é recomendada a utilização de uma equação de aplicação complexa. No entanto, é possível assumir as considerações apresentadas a seguir, sem perder a credibilidade da análise e, simultaneamente, simplificar a análise que recorre a equação D.9.

Considerações assumidas:

- Não são consideradas incertezas sistemáticas em ambas as variáveis;
- Todas as incertezas aleatórias estão concentradas na variável Y.

Enquanto que a primeira consideração é relativamente rebuscada, mas credível, a segunda consideração adequa-se ao procedimento experimental realizado, uma vez que a dispersão segundo a variável $X = \sqrt{\frac{2\Delta P \rho D^2}{\mu^2}}$, se deve a variações na variável independente $Y = Re_D$, provenientes das oscilações no caudal, provocadas pela bomba centrífuga.

Desta forma, esta análise permitirá apenas contabilizar a incerteza no ajustamento, pelo que se tornam aceitáveis as considerações anteriormente expostas. Com esse objetivo, apresenta-se a equação D.9, que, conjuntamente às considerações apresentadas, permitirá analisar o erro associado à correlação obtida para a calibração da placa orifício (Coleman e Steele, 2009)

$$s_{cal} = s_Y = \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - mX_i - c)^2}{N - 2} \right]^{1/2} \quad (D.9)$$

Utilizando a equação D.9 é possível determinar o desvio padrão da variável Y , o que permite conhecer a incerteza aleatória da mesma $P_{95\%}$, para um intervalo de confiança de 95%, através da equação D.10, ou dito de outra forma, o erro para um valor genérico de X_i , obtido através de uma curva de calibração (Coleman e Steele, 2009), vem dado por:

$$P_{95\%} = t \cdot s_{cal} \quad (D.10)$$

Na equação D.10, o parâmetro t representa o valor da distribuição t de *Student*, calculada para $N - 2$ graus de liberdade. Este erro ficará fossilizado num erro sistemático.

Caso o valor de leitura seja conhecido, é possível determinar o intervalo no qual o valor médio da população μ_Y , em que se insere a variável Y , se encontra. Este intervalo apresenta-se na equação D.11.

$$Y - 2 \left\{ s_Y^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{s_{XX}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \leq \mu_Y \leq Y + 2 \left\{ s_Y^2 \left(\frac{1}{N} + \frac{(X - \bar{X})^2}{s_{XX}} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (D.11)$$

Nesta equação D11, as variáveis s_Y , Y , \bar{X} e s_{XX} são obtidas pelas equações D.9, D.12, D.13 e D.14, respetivamente, e em que N representa o número de pontos avaliados. De notar que a variável Y provém dos valores obtidos pela regressão para um determinado X_i , enquanto que a variável Y_i remete para o valor dos pontos referentes a um determinado X_i .

$$Y = mX + c \quad (D.12)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i \quad (D.13)$$

$$s_{XX} = \sum_{i=1}^N X_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N X_i)^2}{N} \quad (D.14)$$

Na Tabela D.2 apresentam-se os resultados da resolução das equações apresentadas até este ponto, focando essencialmente os erros que caracterizam o ajustamento da regressão linear.

Tabela D.2- Valores para a determinação do erro do ajuste da correlação para um intervalo de confiança de 95%.

Parâmetro	Valor	Unidades
N	78	[número de leituras]
\bar{x}	5937,22	[-]
s_{XX}	$5,63 \times 10^9$	[-]
$s_{cal} = s_Y$	298,24	[-]
t	1,99	[-]
$P_{95\%}$	593,98	[-]

ANEXO E: Tratamento matemático para a análise do coeficiente global de transferência de calor

Para efetuar o estudo dos coeficientes de calor que vigoram no seio do material de mudança de fase é necessário efetuar a seguinte manipulação matemática. Utilizando o mesmo tratamento matemático que Esteves (2016) realizou, recorrendo à primeira lei da termodinâmica, efetua-se um balanço energético ao permutador de testes.

$$\dot{Q} = -\dot{m}c(T^{saída} - T^{entrada}) \quad (E.1)$$

$$\dot{Q} = UA\Delta T_{ml} \quad (E.2)$$

$$U = \frac{\dot{Q}}{A\Delta T_{ml}} = \frac{\dot{m}c(T^{entrada} - T^{saída})}{A\Delta T_{ml}} \quad (E.3)$$

Recorrendo à equação E.1, define-se a potência fornecida pelo termofluido, considerando este fluido um fluido incompressível. A equação E.2 permite obter a potência trocada para o retor de testes em questão, conhecendo a área de transferência de calor A , o coeficiente global de transferência de calor U e a temperatura média logarítmica ΔT_{ml} . Combinando estas duas equações obtém-se a equação E.3 a qual permite efetuar a primeira abordagem a este estudo.

É então necessário conhecer a potência fornecida pelo termofluido ao material de mudança de fase em cada instante ou, no mínimo, valores médios desta potência durante as diferentes fases dos processos. Como em todos os testes foram registados os caudais assim como as temperaturas do termofluido a entrada e saída do permutador de testes, será possível caracterizar a potência disponibilizada pelo termofluido em cada instante. Contudo, como a potência fornecida não é constante, visto que a temperatura de entrada aumenta ao longo do tempo, serão considerados valores médios definidos para intervalos de tempo constantes.

Prosseguindo, é necessário definir a área de transferência de calor A , assim como a temperatura média logarítmica que caracteriza esta troca de energia. A área de permuta é calculada como a área exterior da cápsula em contato com o material de mudança de fase. Recorrendo à imagem da cápsula presente no capítulo 4 (Figura 4.1), depreende-se que o valor da área de contato é aproximadamente $0,0248 \text{ m}^2$.

Relativamente à temperatura média logarítmica, visto que não existe escoamento no interior da cápsula onde se encontra o material em estudo, não será possível recorrer à equação

usualmente utilizada para caracterizar esta variável. Será necessário deduzir uma equação que permita contabilizar como a energia cedida pelo termofluido é aproveitada pelo material de mudança de fase. A abordagem aqui utilizada é similar a abordagens existentes na bibliografia (Levenspiel, 2014).

O material de mudança de fase pode receber energia através de dois processos: transferência de calor sensível e transferência de calor latente. Todavia, a análise que se irá realizar nesta seção é bastante simplificada, pois uma análise mais profunda requereria uma análise de volumes finitos. Tendo isto em consideração, será considerado que os materiais apenas recebem energia sob a forma de calor sensível. Do lado do termofluido, a potência pode ser caracterizada pela equação E.1 porém, fazendo uma abordagem a um elemento infinitesimal do permutador, poder-se-á reescrever a equação como,

$$\delta\dot{Q} = -\dot{m}_{T66}c_{T66}dT_{66} \quad (\text{E.4})$$

Na equação E.4, \dot{m}_{T66} representa o caudal mássico de termofluido em escoamento no interior do permutador, c_{T66} , representa o calor específico mássico do termofluido na respetiva zona de troca de calor sensível e dT_{66} , a variação infinitesimal de temperatura.

No que diz respeito ao material de mudança de fase, este absorve esta potência e transforma-a numa variação da sua energia interna que, durante os instantes em que o processo de troca de potência calorífica é sensível. Esta variação de energia interna do material pode ser descrita pelas equações E.5 e E.6, no caso da análise de uma fatia infinitesimal desse material que está a trocar calor com a fatia infinitesimal do permutador considerada anteriormente.

$$\dot{Q} = m_M c_M \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (\text{E.5})$$

$$\delta\dot{Q} = m_M c_M \frac{dT}{dt} \quad (\text{E.6})$$

Na equação E.6, m_M representa a massa do material de mudança de fase, c_M o seu respetivo calor específico e $\frac{dT}{dt}$ a variação infinitesimal da sua temperatura para um dado intervalo de tempo.

Manipulando a equação E.4, de maneira a perceber qual a variação infinitesimal de potência por unidade de tempo, introduz-se a equação E.7.

$$\frac{\delta\dot{Q}}{dt} = -\dot{m}_{T66}c_{T66} \frac{dT_{T66}}{dt} \quad (\text{E.7})$$

Entendido como tanto o material e o termofluido recebem e cedem energia, será necessário avaliar como a potência calorífica é trocada na interface cápsula-permutador de testes. Recorrer-se-á à equação E.2, mas adaptando-a a um elemento infinitesimal como se fez anteriormente, obtendo assim a equação E.8 em que $\Delta T = T_{T66} - T_M$, isto é, a diferença de temperaturas que motiva a troca térmica.

$$\delta\dot{Q} = U dA \Delta T \quad (\text{E.8})$$

Continuando a perseguir o objetivo desta análise, isto é, a determinação da temperatura média logarítmica que ocorre na permuta de energia sob a forma de calor ente o termofluido e o material de mudança de fase, utilizar-se-á a equação E.9 que servirá de ponto de partida para esta análise. A equação E.9 traduz a análise infinitesimal da diferença de temperatura por unidade de tempo.

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{dT_{T66}}{dt} - \frac{dT_M}{dt} \quad (\text{E.9})$$

Fazendo uso das equações E.6 e E.7 e, após substituição na equação E.9, obtêm-se,

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta T)}{dt} &= \frac{\delta\dot{Q}}{\dot{m}_{T66} c_{T66} dt} - \frac{\delta\dot{Q}}{m_M c_M} \\ &= -\delta\dot{Q} \left[\frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66} dt} + \frac{1}{m_M c_M} \right] \end{aligned} \quad (\text{E.10})$$

Utilizando agora a equação E.10 e E.8 obtêm-se as seguintes equações,

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = -U dA \Delta T \left(\frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66} dt} + \frac{1}{m_M c_M} \right) \quad (\text{E.11})$$

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66} dt} + \frac{1}{m_M c_M} \right) dA dt \quad (\text{E.12})$$

$$-\frac{1}{U} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = \frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66} dt} dA + \frac{1}{m_M c_M} dA dt \quad (\text{E.13})$$

Tendo em atenção o tipo de permutador e estudo depende-se que $T_{T66}^{entrada}$, $T_{T66}^{saída}$, e T_M variam no tempo, pelo que a integração da equação E.13 se torna, por isso, complicada.

Procedendo-se então a uma simplificação, considerando que, quando dt tende para um intervalo finito Δt suficientemente pequeno, se pode admitir que,

$$\bar{T}_M = \frac{T_M^{inicial} + T_M^{final}}{2} \neq f(t) \approx const. \quad (E.14)$$

$$T_{T66}^{entrada} \neq f(t) \approx const. \quad (E.15)$$

$$T_{T66}^{saída} \neq f(t) \approx const. \quad (E.16)$$

no intervalo em questão, facilitando assim a integração da equação diferencial E.13, que passa a tomar a forma da equação E.17, assumindo um intervalo de integração entre a entrada (e) e a saída (s) do permutador de testes.

Caso não fossem efetuadas estas simplificações, a integração da equação E.13 seria bastante mais complexa, levando possivelmente a uma integração numérica. De notar que se tem consciência que as suposições acima implementadas representam uma simplificação significativa, quicá excessiva, mas que permite obter rapidamente uma solução analítica relativamente simples. Esta solução permitirá a obtenção de valores do coeficiente global de transferência de calor U a partir dos resultados experimentais.

Relativamente aos parâmetros ΔT_e e ΔT_s , estes toman a forma das equações E. 18 e E.19, respetivamente.

$$\begin{aligned} -\frac{1}{U} \int_e^s \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} &= \left(\frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66}} + \frac{\Delta t}{m_M c_M} \right) \int_e^s dA \\ &= -\frac{1}{U} [\ln \Delta T]_{\Delta T_e}^{\Delta T_s} = \left[\frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66}} + \frac{\Delta t}{m_M c_M} \right] A \end{aligned} \quad (E.17)$$

$$\Delta T_e = T_{T66}^{entrada} - \bar{T}_M \approx T_{T66}^{entrada} - T_M^{inicial} \quad (E.18)$$

$$\Delta T_s = T_{T66}^{saída} - \bar{T}_M \approx T_{T66}^{saída} - T_M^{final} \quad (E.19)$$

Após o correto desenvolvimento do integral e, recorrendo às equações E.20 e E.21, procede-se à substituição na equação E.17 com o intuito de obter o resultado presente na equação E.22.

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= \dot{m}_{T66} c_{T66} (T_{T66}^{entrada} - T_{T66}^{saída}) \\ \Leftrightarrow \frac{1}{\dot{m}_{T66} c_{T66}} &= \frac{T_{T66}^{entrada} - T_{T66}^{saída}}{\dot{Q}} \end{aligned} \quad (E.20)$$

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= m_M c_M \frac{(T_M^{final} - T_M^{inicial})}{\Delta t} \\ \Leftrightarrow \frac{\Delta t}{m_M c_M} &= \frac{(T_M^{final} - T_M^{inicial})}{\dot{Q}}\end{aligned}\quad (E.21)$$

$$-\frac{1}{U} \ln \left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \right) = \left[\frac{(T_{T66}^{entrada} - T_{T66}^{saída})}{\dot{Q}} + \frac{(T_M^{final} - T_M^{inicial})}{\dot{Q}} \right] A \quad (E.22)$$

Recorrendo à equação E.1 para substituição na equação E.22, facilmente se obtém a equação E.23,

$$-\frac{\dot{Q}}{UA} = \frac{(T_{T66}^{entrada} - T_{T66}^{saída}) + (T_M^{final} - T_M^{inicial})}{\ln \left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \right)} \quad (E.23)$$

que é equivalente à equação E.24,

$$\dot{Q} = UA \left[\frac{(T_{T66}^{saída} - T_M^{final}) - (T_{T66}^{entrada} - T_M^{inicial})}{\ln \left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \right)} \right] \quad (E.24)$$

Por analogia com a equação E.2, pode então afirmar-se que, para o caso em questão, a temperatura média logarítmica é dada por,

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{T66}^{saída} - T_M^{final}) - (T_{T66}^{entrada} - T_M^{inicial})}{\ln \left(\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} \right)} \quad (E.25)$$

Em que $\Delta T_s = (T_{T66}^{saída} - T_M^{final})$ e $\Delta T_e = (T_{T66}^{entrada} - T_M^{inicial})$. Para o período de mudança de fase, considerou-se que $T_M^{inicial} = T_M^{final} = T_M$, isto é, para o intervalo Δt considerado, a temperatura permaneceu constante, resultando na equação E.26.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{T66}^{saída} - T_M) - (T_{T66}^{entrada} - T_M)}{\ln \left(\frac{(T_{T66}^{saída} - T_M)}{(T_{T66}^{entrada} - T_M)} \right)} \quad (E.26)$$

Com a temperatura média logarítmica definida e, tendo em conta que as potências foram definidas para intervalos de tempo definidos, então também as temperaturas terão de o ser.

Assim $T_{T66}^{entrada}$ e $T_{T66}^{saída}$ das equações E.25 e E.26 corresponderão ao valor médio para o intervalo de temperatura definido, enquanto que T_M^{final} corresponderá à temperatura final do material de mudança de fase, para o intervalo de tempo idêntico e $T_M^{inicial}$ a temperatura inicial do material de mudança de fase, para o respetivo intervalo. Para o material de mudança de fase, foi escolhido o termopar T3 como representante da evolução da temperatura do mesmo, devido à sua localização no interior do permutador de testes.

Uma vez que tanto as potências, a área de permuta e a temperatura média logarítmica se encontram definidas para intervalos de tempo bem definidos, recorrendo a equação E.3, é possível avaliar o coeficiente global de calor U para o respetivo intervalo de tempo, assim como a sua evolução temporal.

$$U = \left[\frac{r_o}{r_i} \left(\frac{1}{h_o} + R_{so} \right) + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k} + R_{si} + \frac{1}{h_i} \right]^{-1} \quad (\text{E.27})$$

ANEXO F: Ensaios

Na Tabela F.1 estão apresentadas as condições em que cada ensaio se realizou e a sua respetiva notação. A notação t1_v_35_sa refere-se ao ensaio realizado à temperatura t1 ($\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) com a cápsula na vertical, a frequência da bomba a 35 Hertz e sem alheta e assim analogamente para os restantes ensaios

Tabela F.1- Especificações de cada ensaio e a denominação utilizada

Notação	Temperatura inicial		Orientação		Frequência [Hz]		Geometria		Caudal de água [L/min]		
	t1 (≈20°C)	t2 (≈60°C)	Vertical	Horizontal	35	50	Sem alheta	Com alheta	30	15	5
t1_v_35_sa	•		•		•		•		•		
t1_v_50_sa	•		•			•	•		•		
t1_h_35_sa	•			•	•		•		•		
t1_h_50_sa	•			•		•	•		•		
t1_v_35_a	•		•		•			•	•		
t1_v_50_a	•		•			•		•	•		
t1_h_35_a	•			•	•			•	•		
t1_h_50_a	•			•		•		•	•		
t2_h_35_sa		•		•	•		•		•		
t2_h_50_sa		•		•		•	•		•		
t2_v_35_sa		•	•		•		•		•		
t2_v_50_sa		•	•			•	•		•		
t2_h_50_sa_A5		•		•		•	•				•
t2_h_50_sa_A15		•		•		•	•			•	
t2_h_35_a		•		•	•			•	•		
t2_h_50_a		•		•		•		•	•		
t2_v_35_a		•	•		•			•	•		
t2_v_50_a		•	•			•		•	•		

Seguidamente, irão apresentar-se figuras referentes aos ensaios realizados e que não foram apresentados no texto principal desta dissertação.

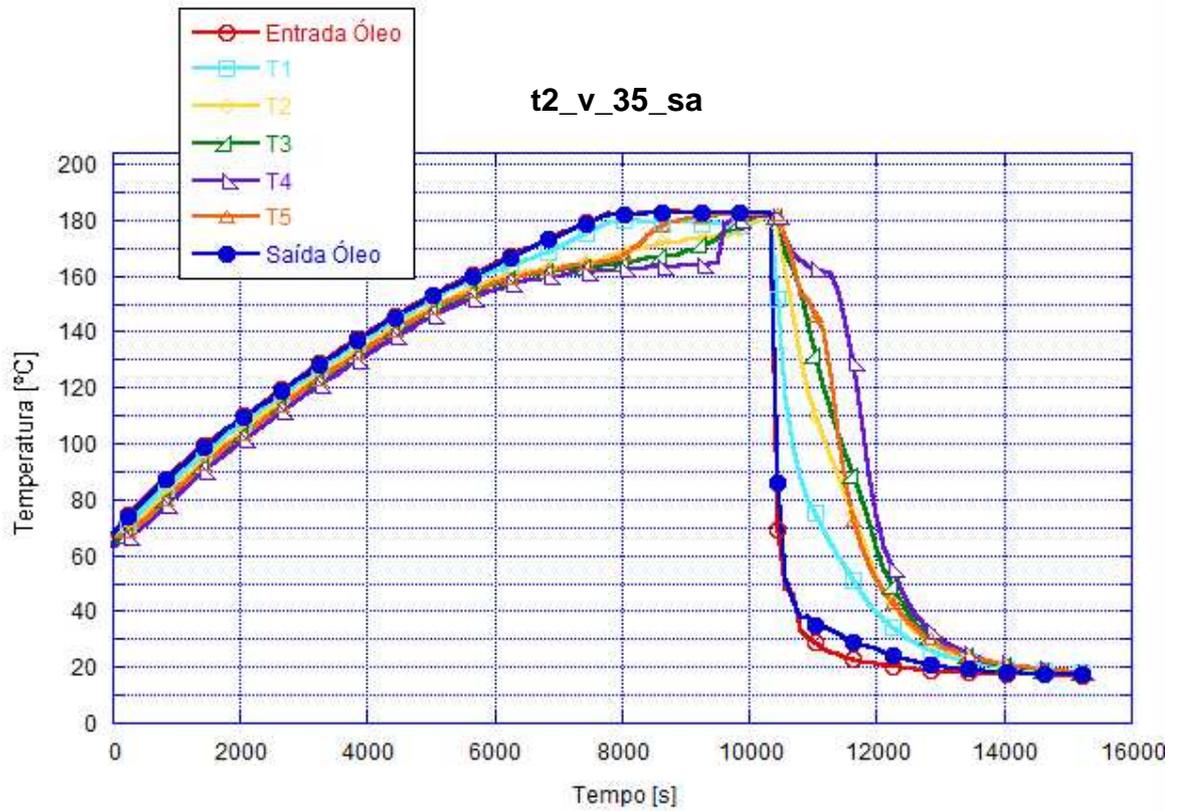


Figura F.1- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_35_sa.

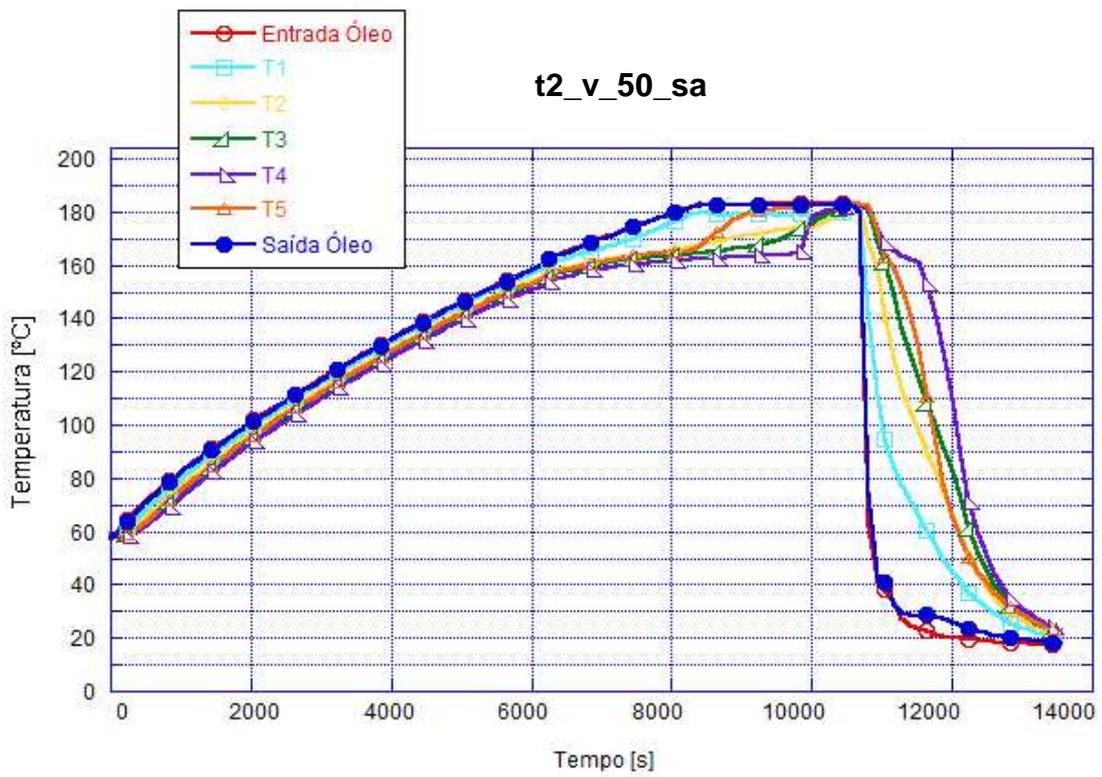


Figura F.2- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_50_sa.

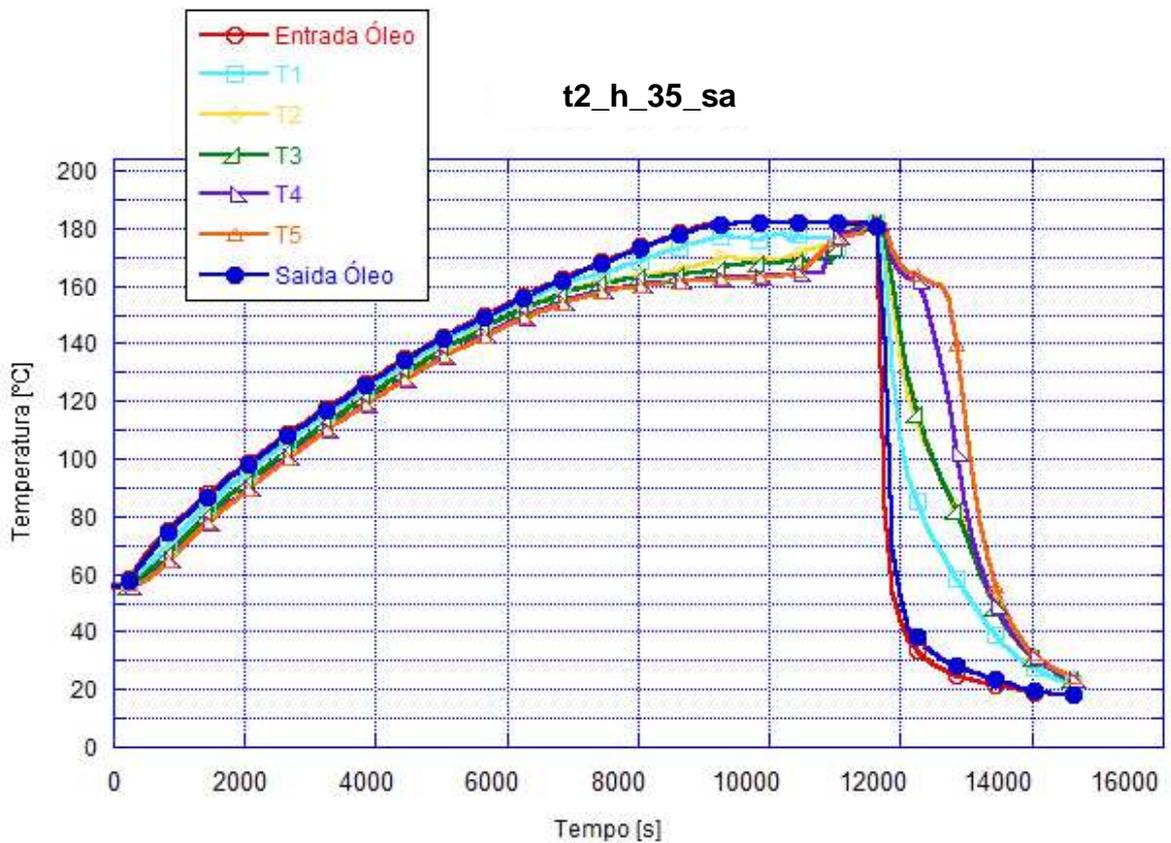


Figura F.3- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_35_sa.

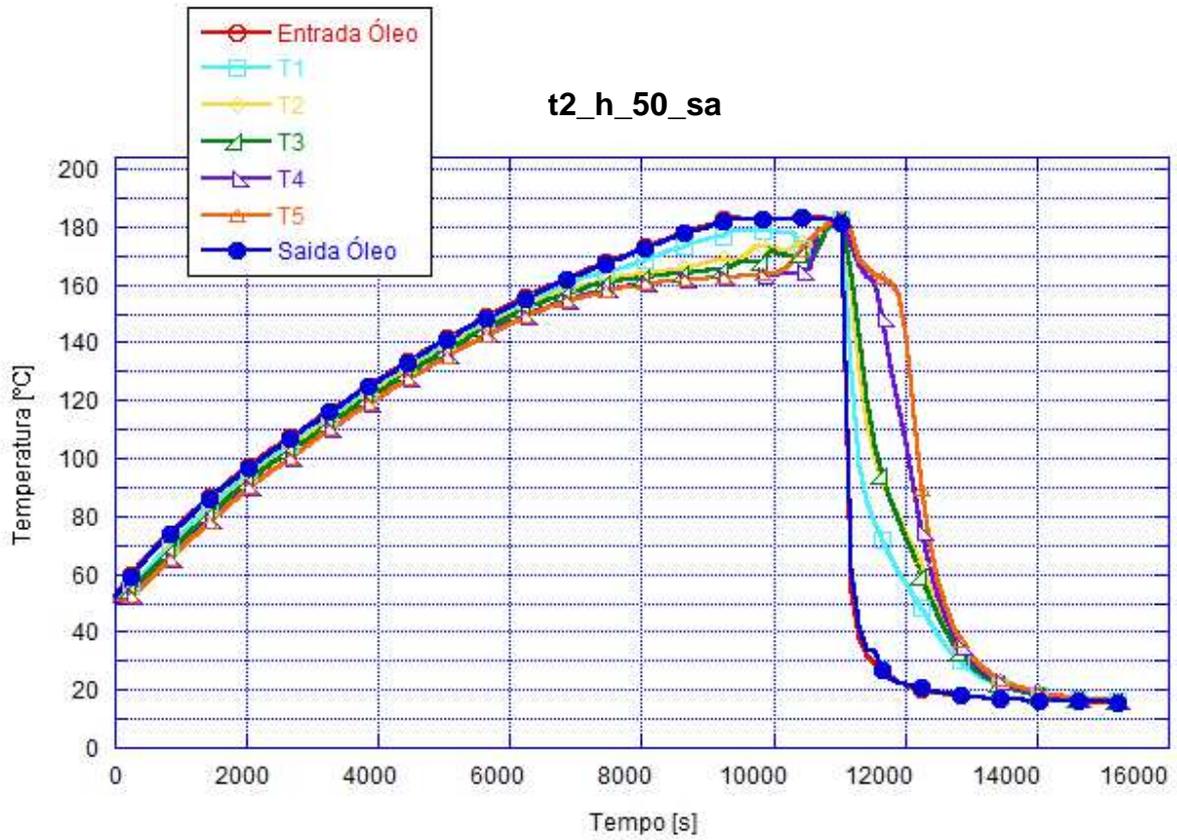


Figura F.5- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_50_sa.

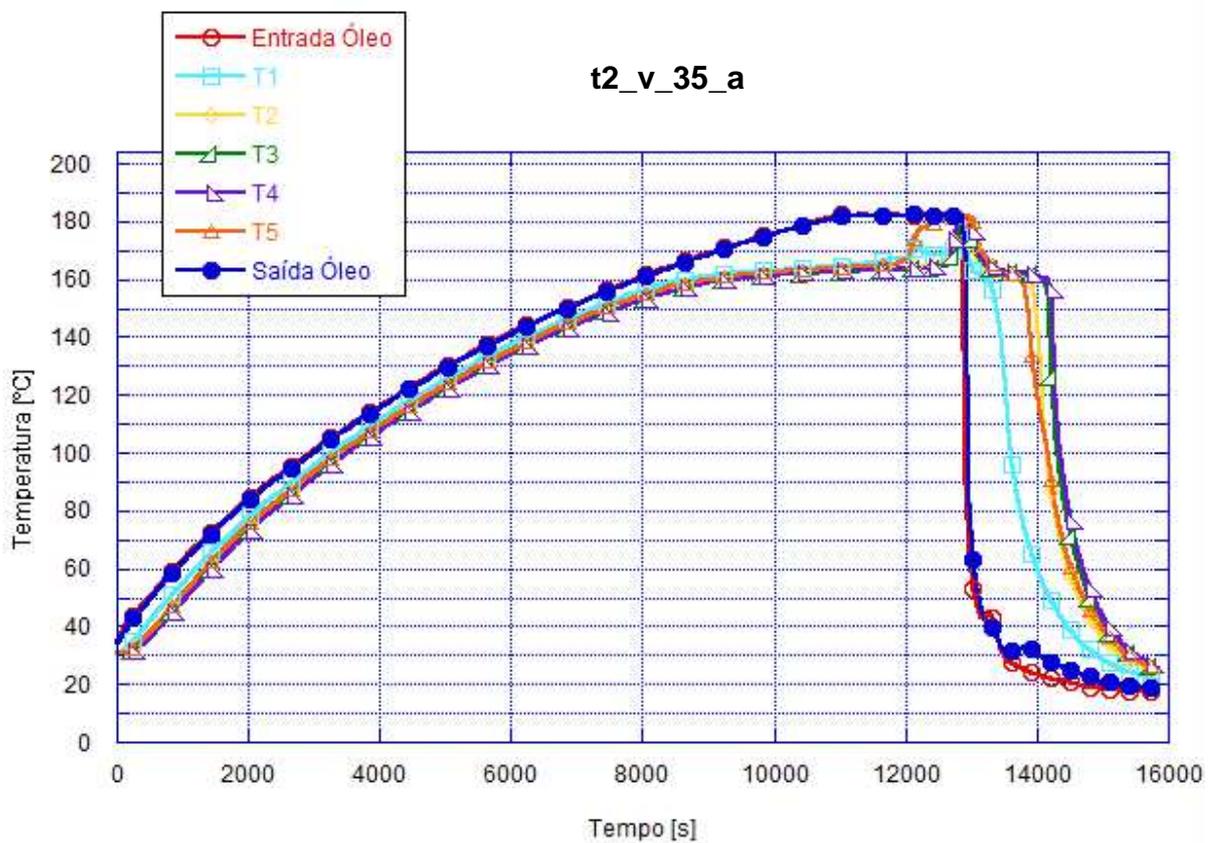


Figura F 4- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_35_a.

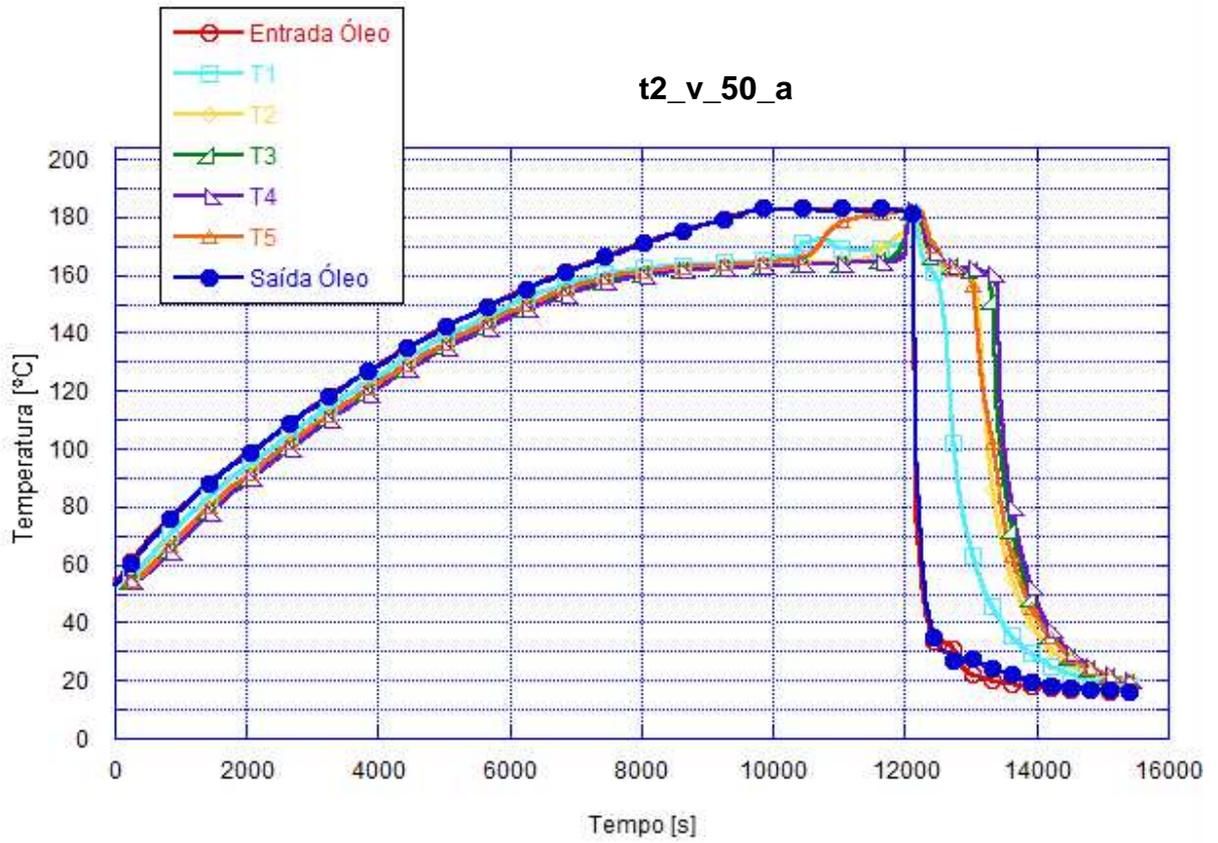


Figura F.7- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_v_50_a.

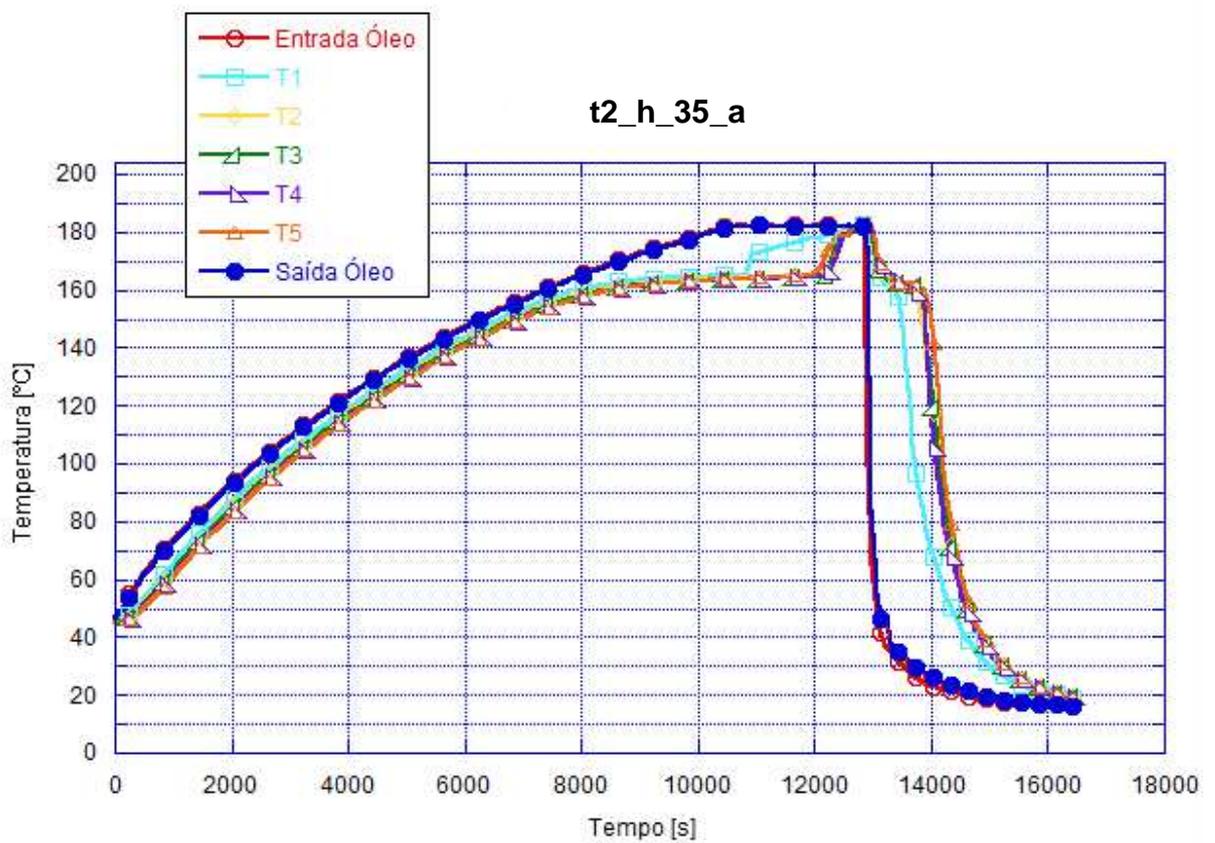


Figura F.6- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_35_a.

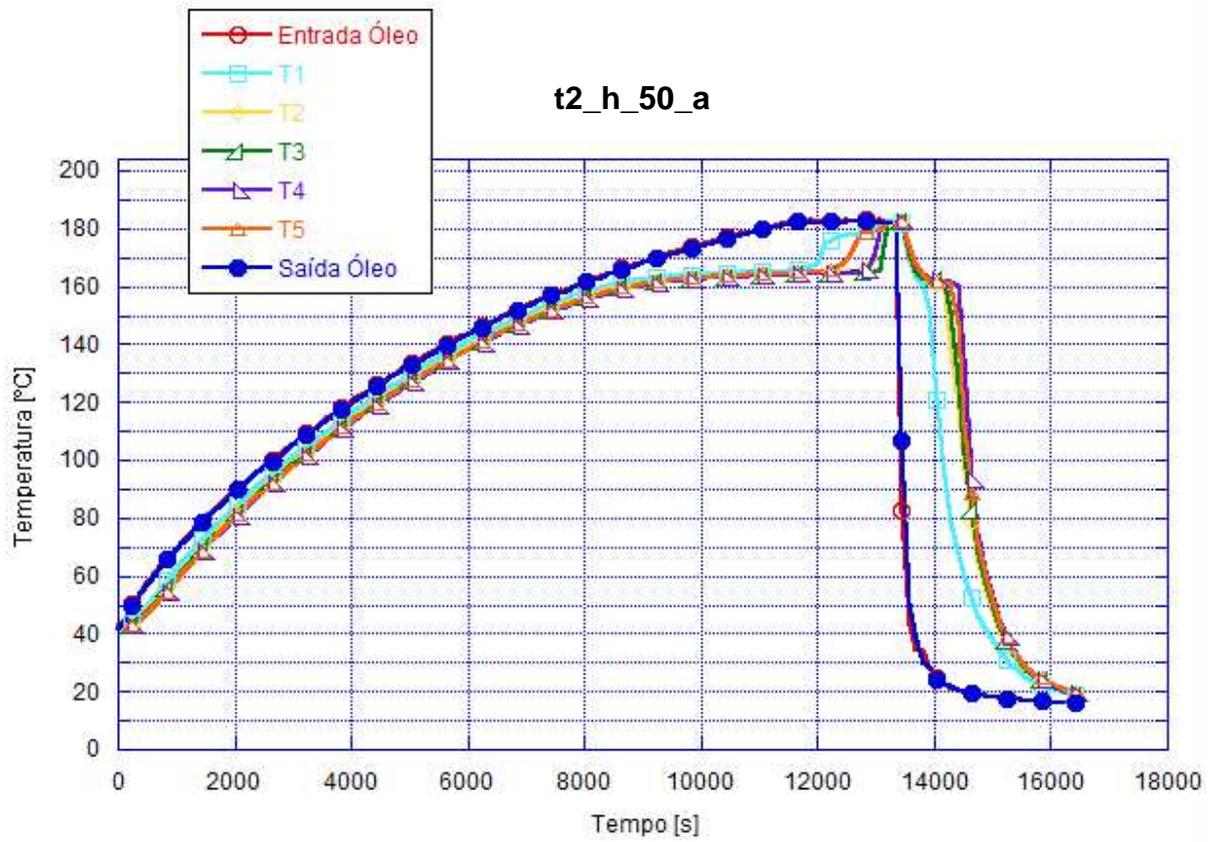


Figura F.8- Gráfico da evolução da temperatura no ensaio t2_h_50_a.

Seguidamente, irão apresentar-se os gráficos de coeficiente global de transferência de calor, U , realizados e que não foram apresentados no texto principal desta dissertação.

U_t2_v_35_sa

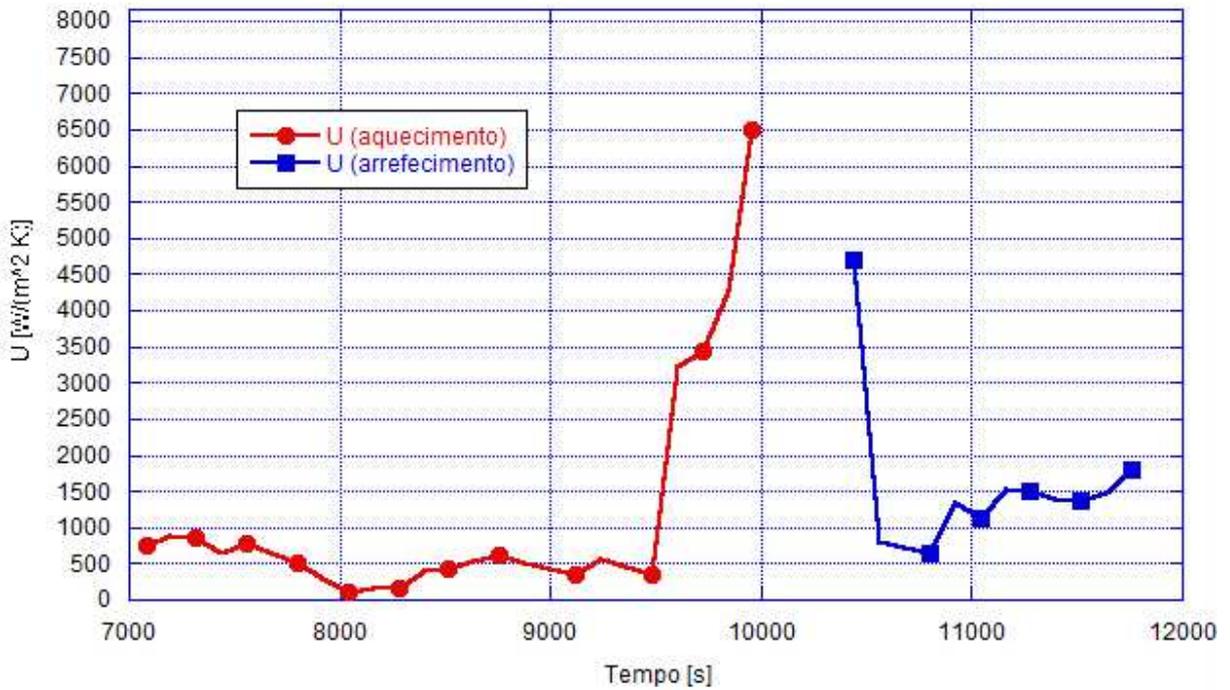


Figura F.9- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_35_sa.

U_t2_v_50_sa

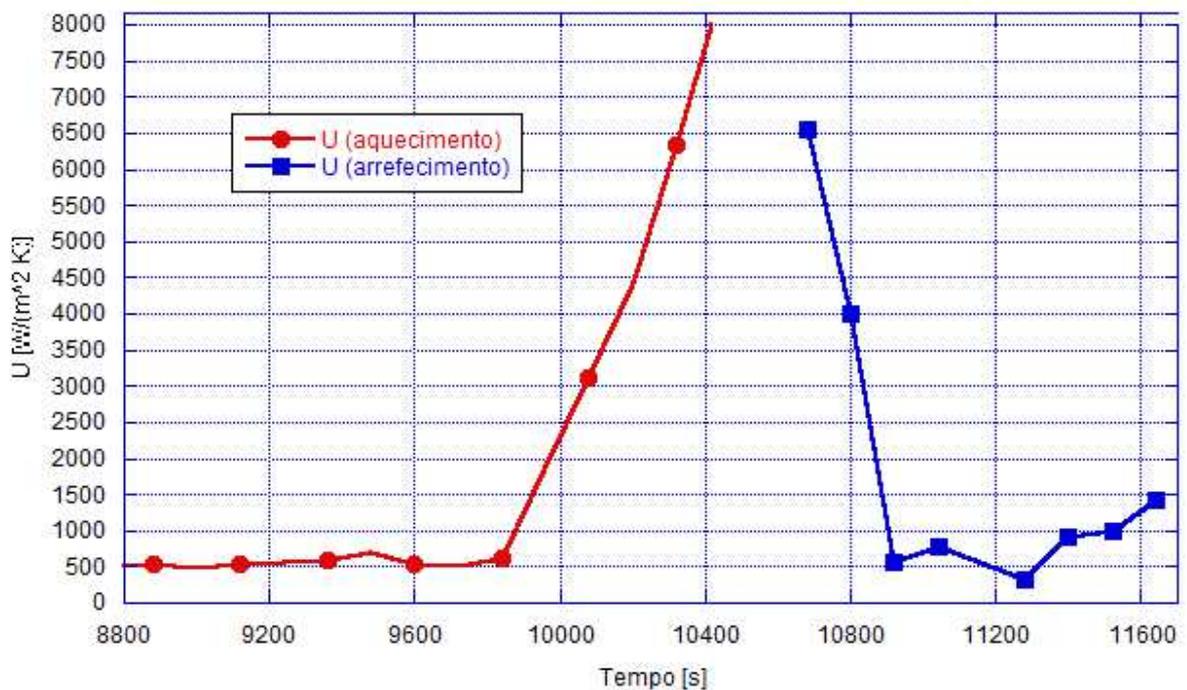


Figura F.10- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_50_sa.

U_t2_h_35_sa

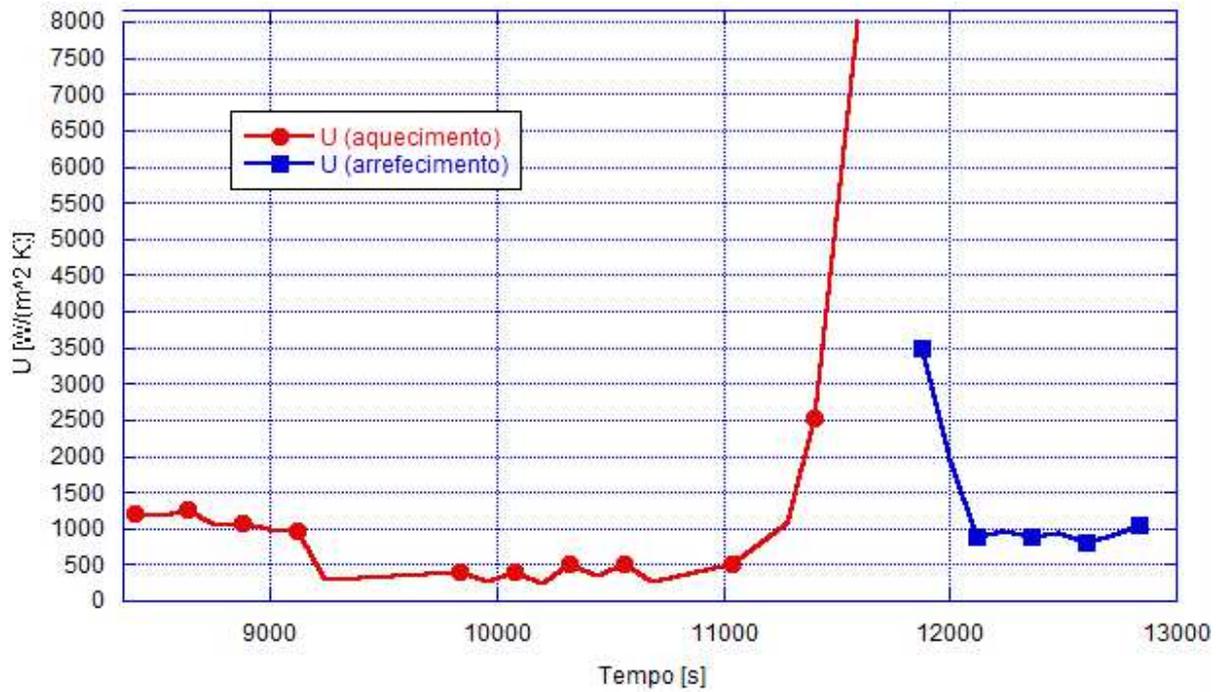


Figura F.11- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_35_sa.

U_t2_h_50_sa

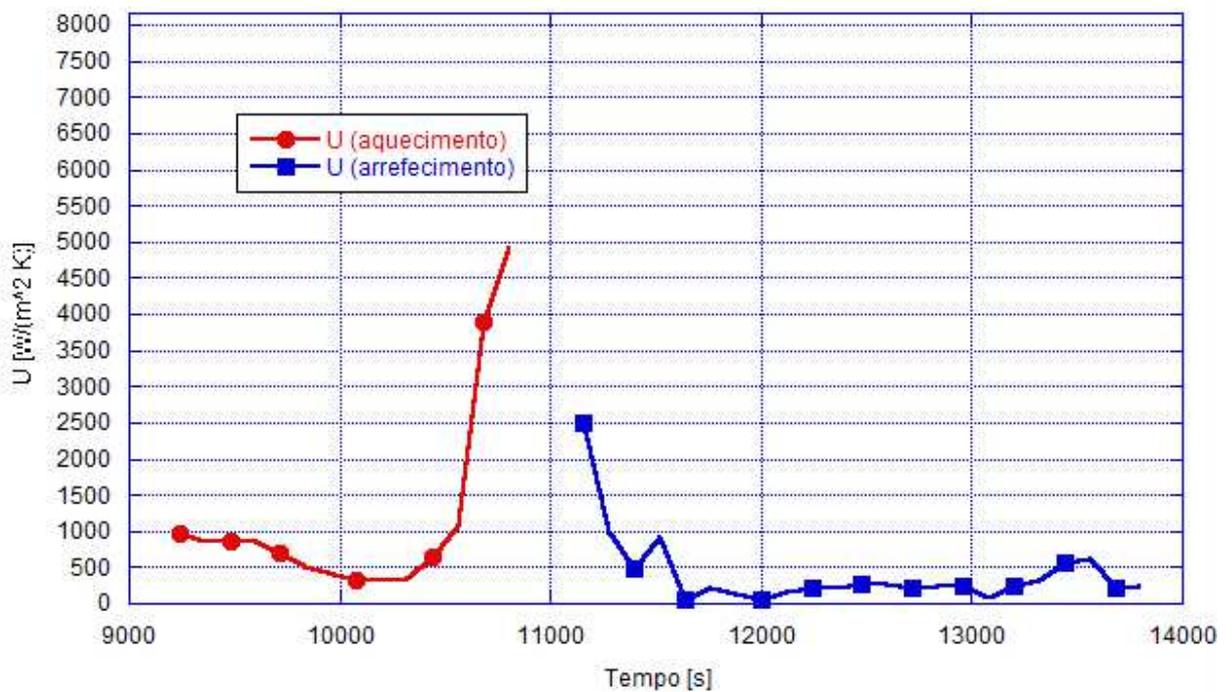


Figura F.12- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_50_sa.

U_t2_v_35_a

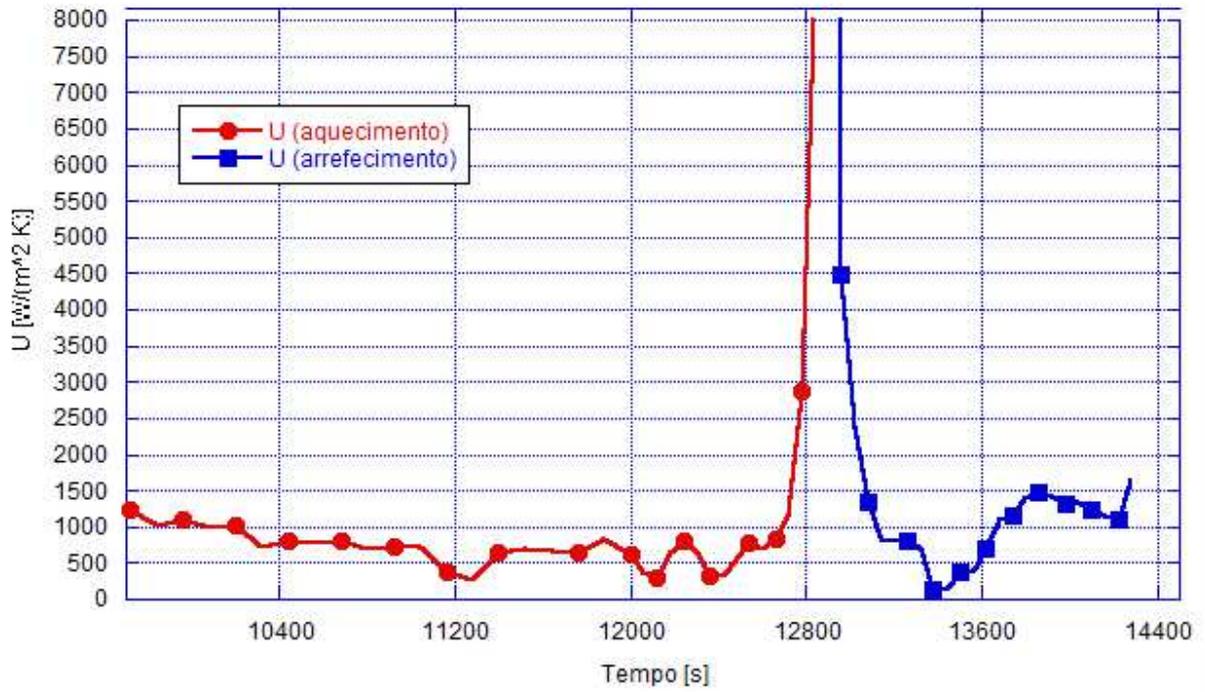


Figura F.13- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_35_a.

U_t2_v_50_a

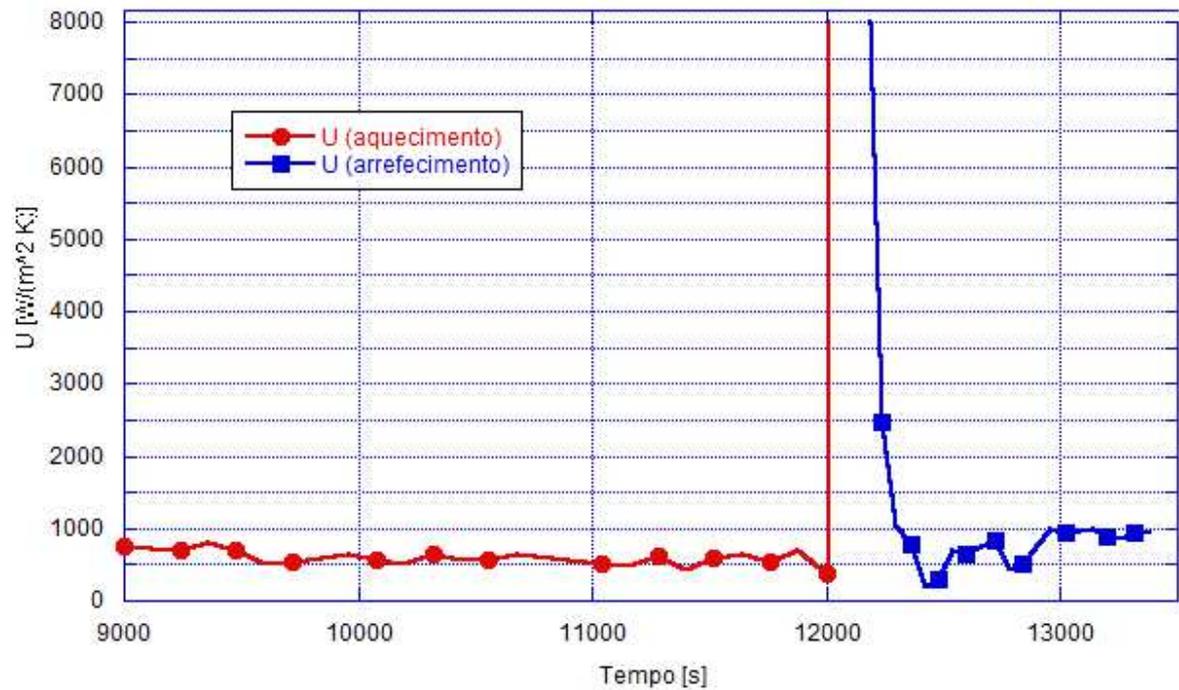


Figura F.14- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_v_50_a.

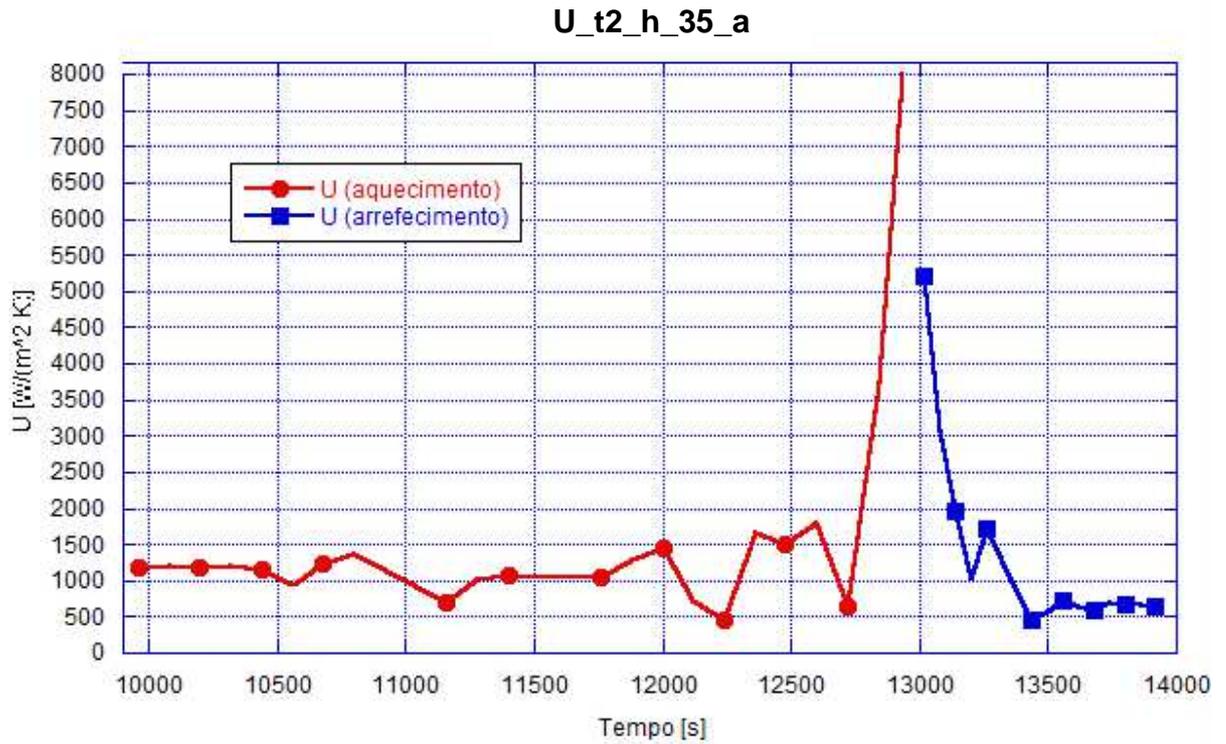


Figura F.15- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_35_a.

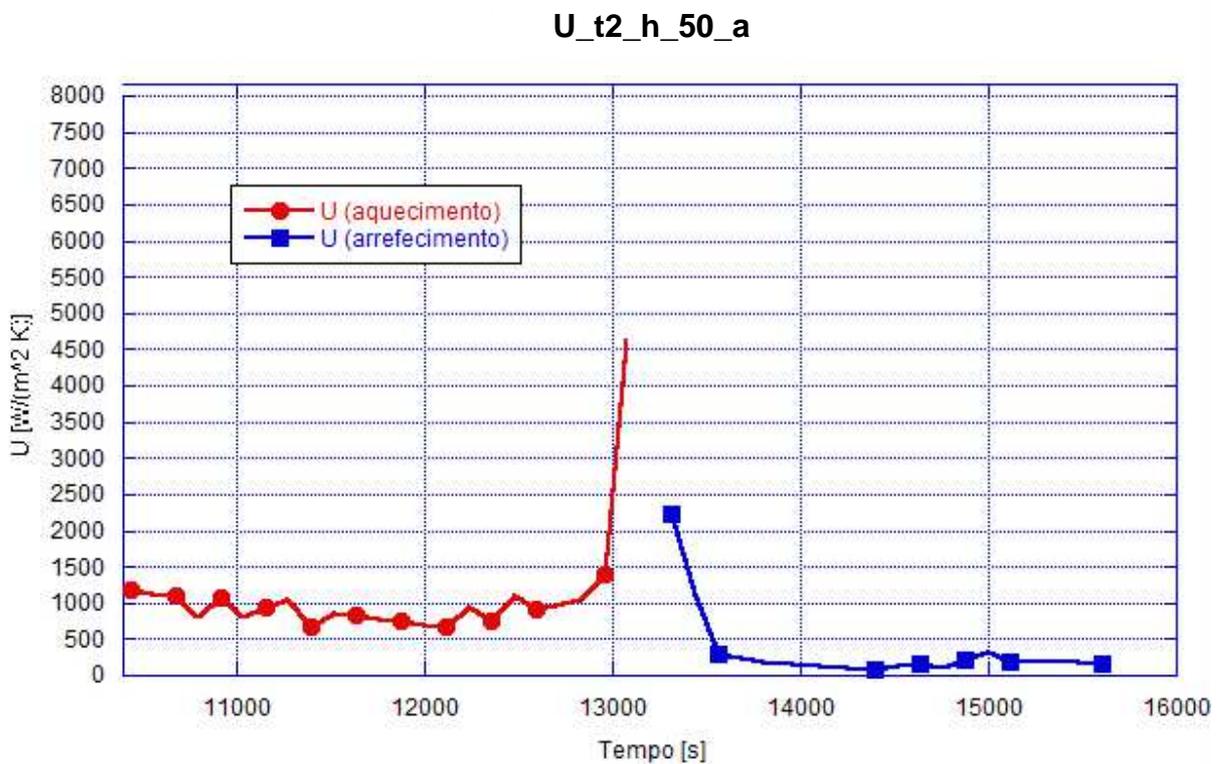


Figura F.16- Gráfico da evolução do coeficiente global de transferência de calor do ensaio t2_h_50_a.

Seguidamente, irão apresentar-se os gráficos de coeficiente de transferência de calor do material de mudança de fase realizados e que não foram apresentados no texto principal desta dissertação.

H_t2_h_35_sa

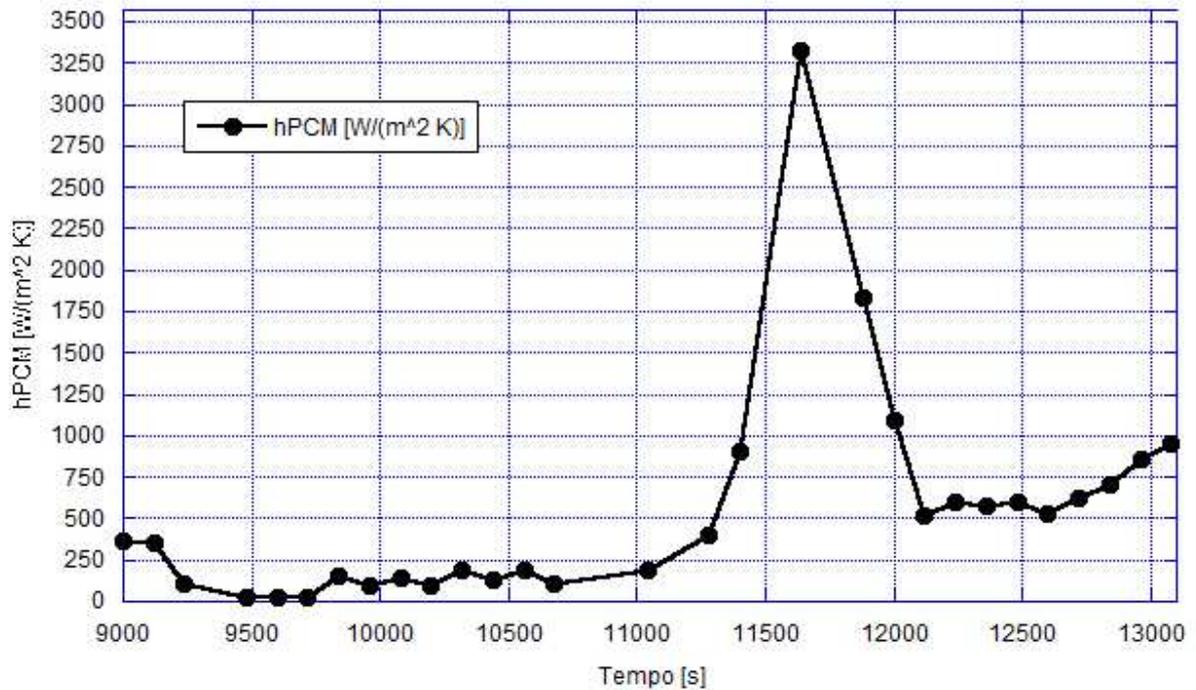


Figura F.17- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_35_sa.

H_t2_h_50_sa

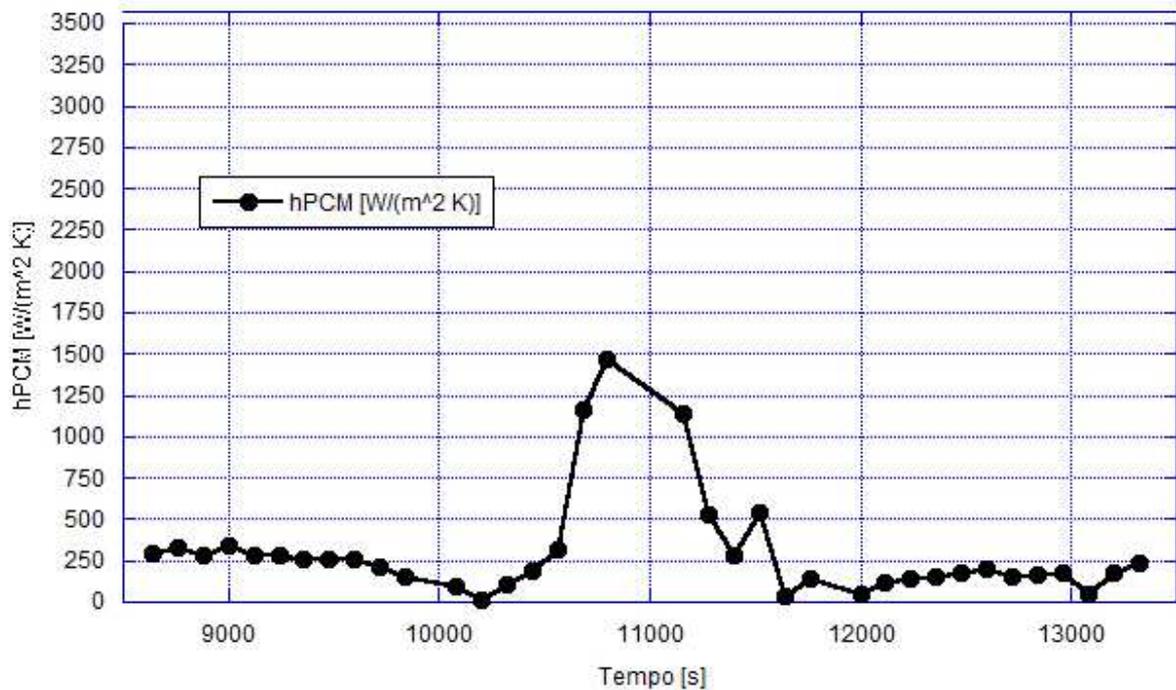


Figura F.18- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_50_sa.

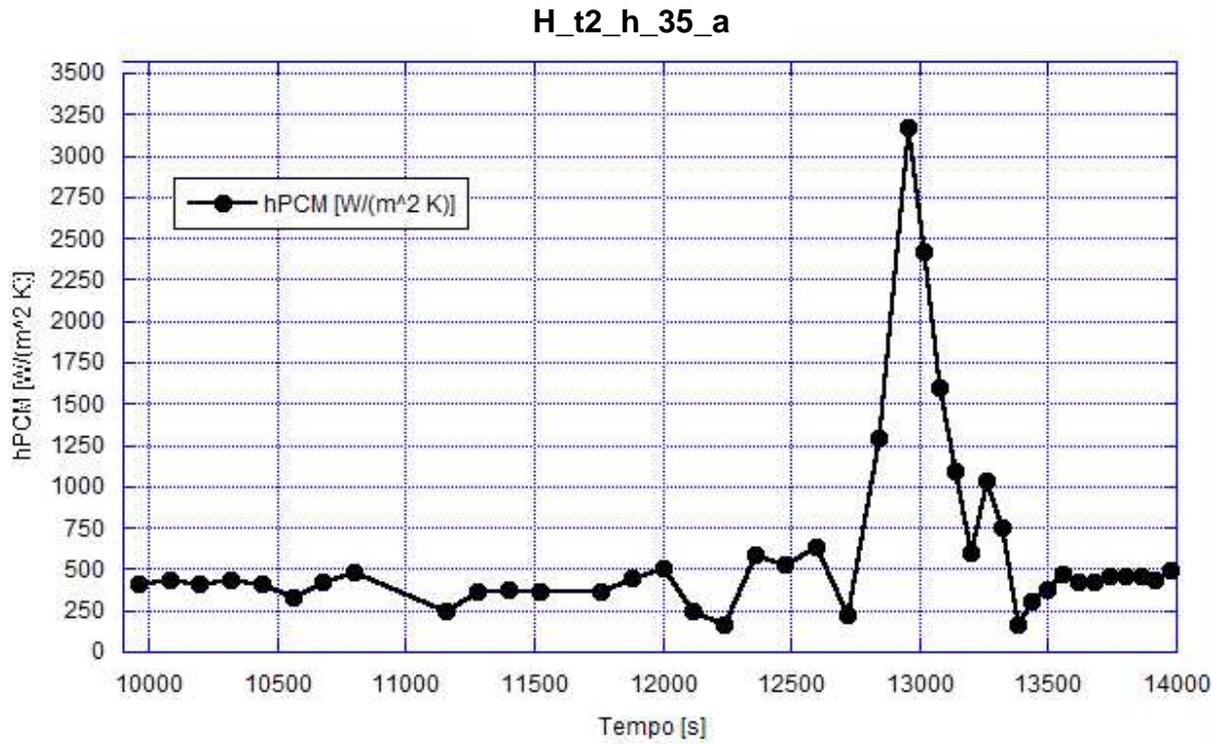


Figura F.19- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_35_a.

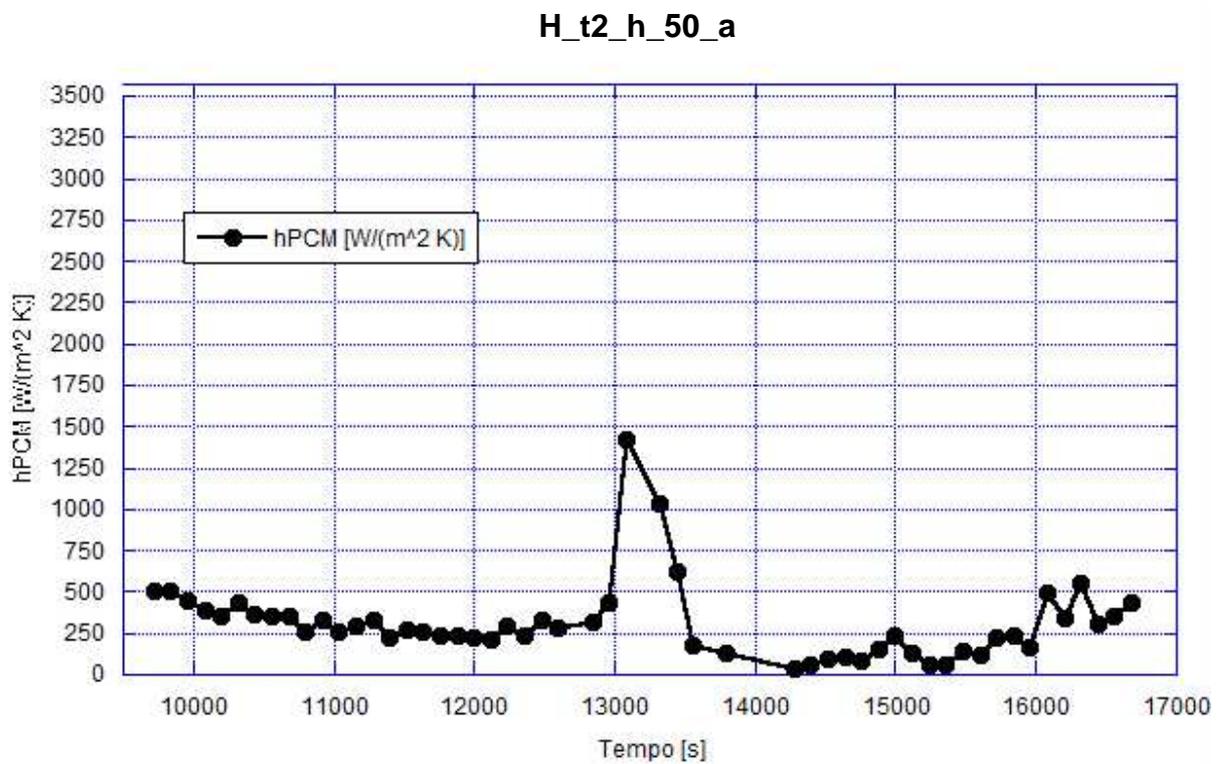


Figura F.20- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_h_50_a.

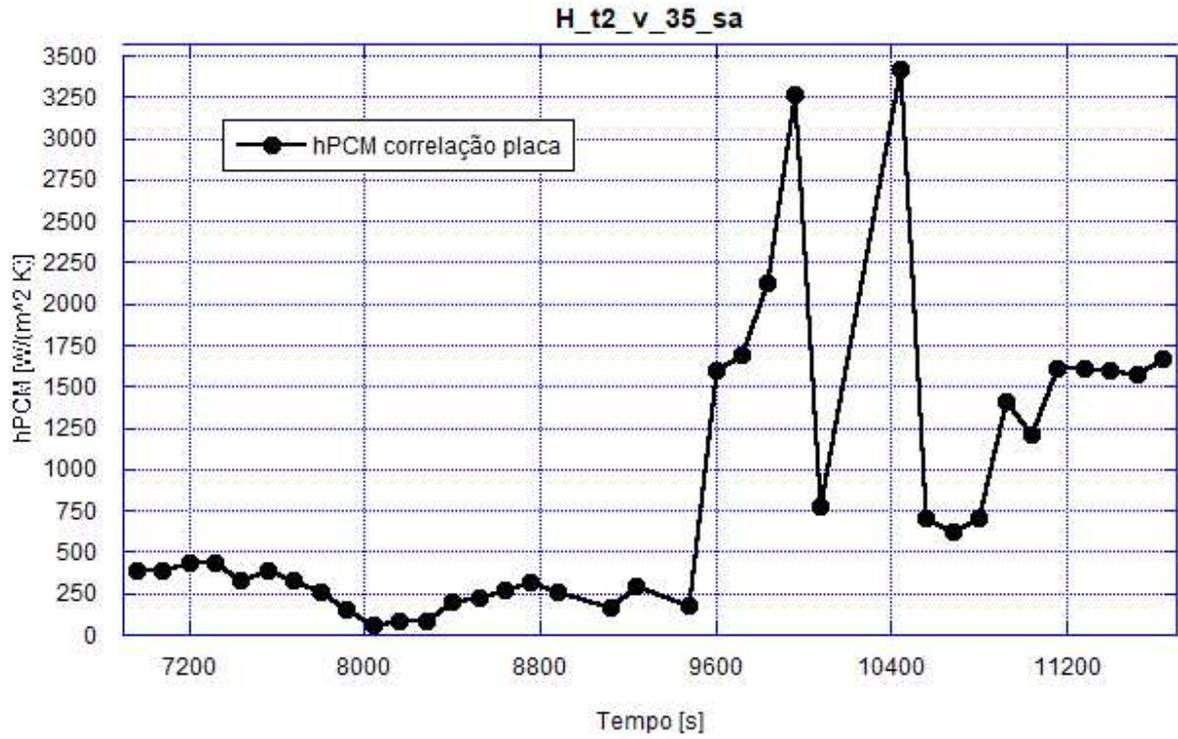


Figura F.21- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_35_sa.

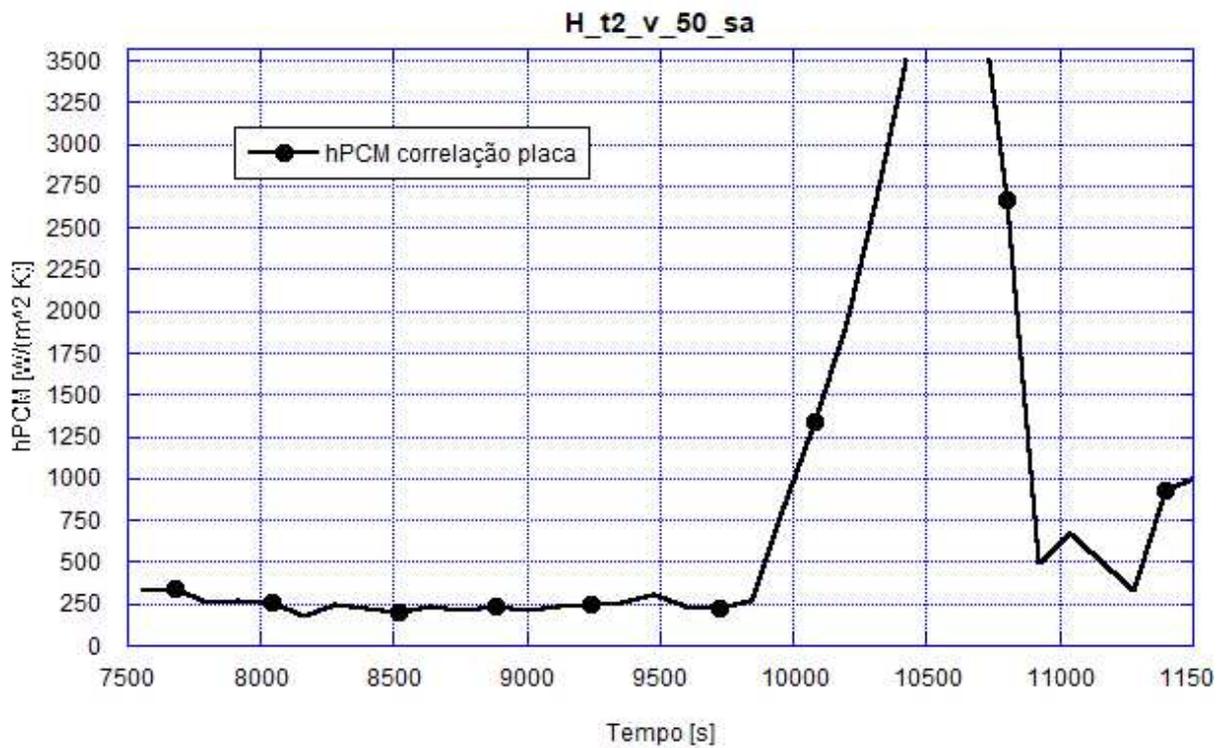


Figura F.22- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_50_sa.

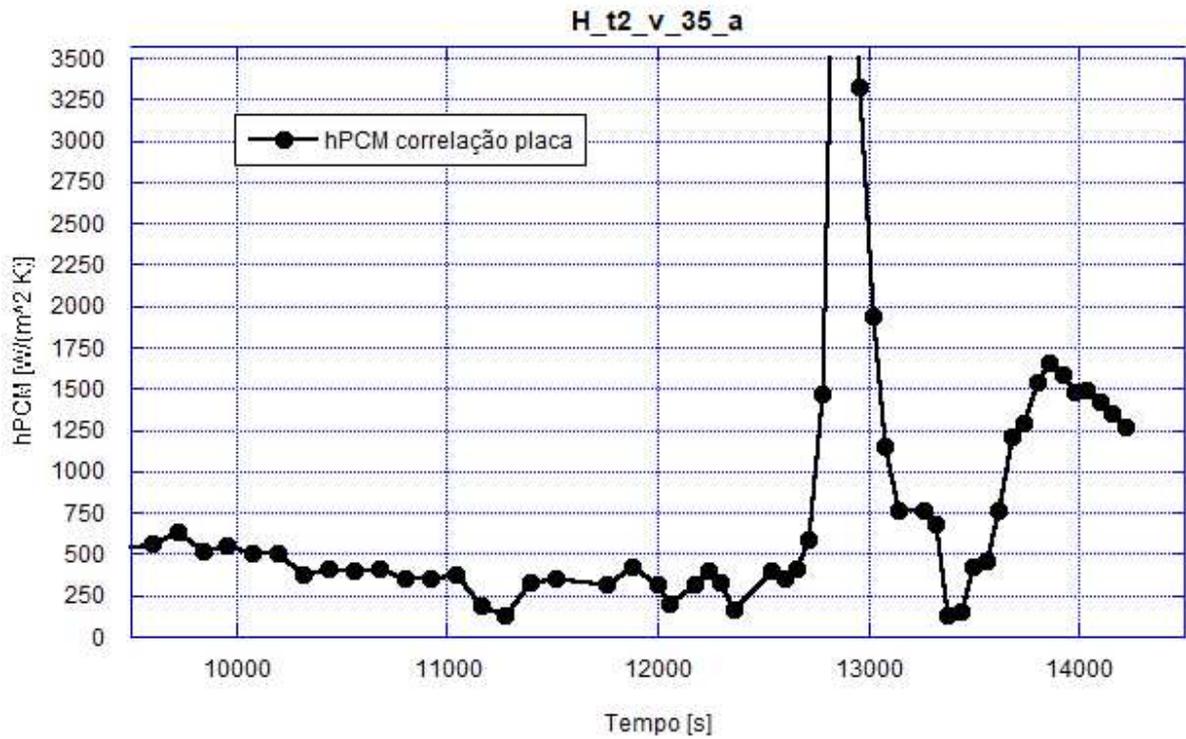


Figura F.23- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_35_a.

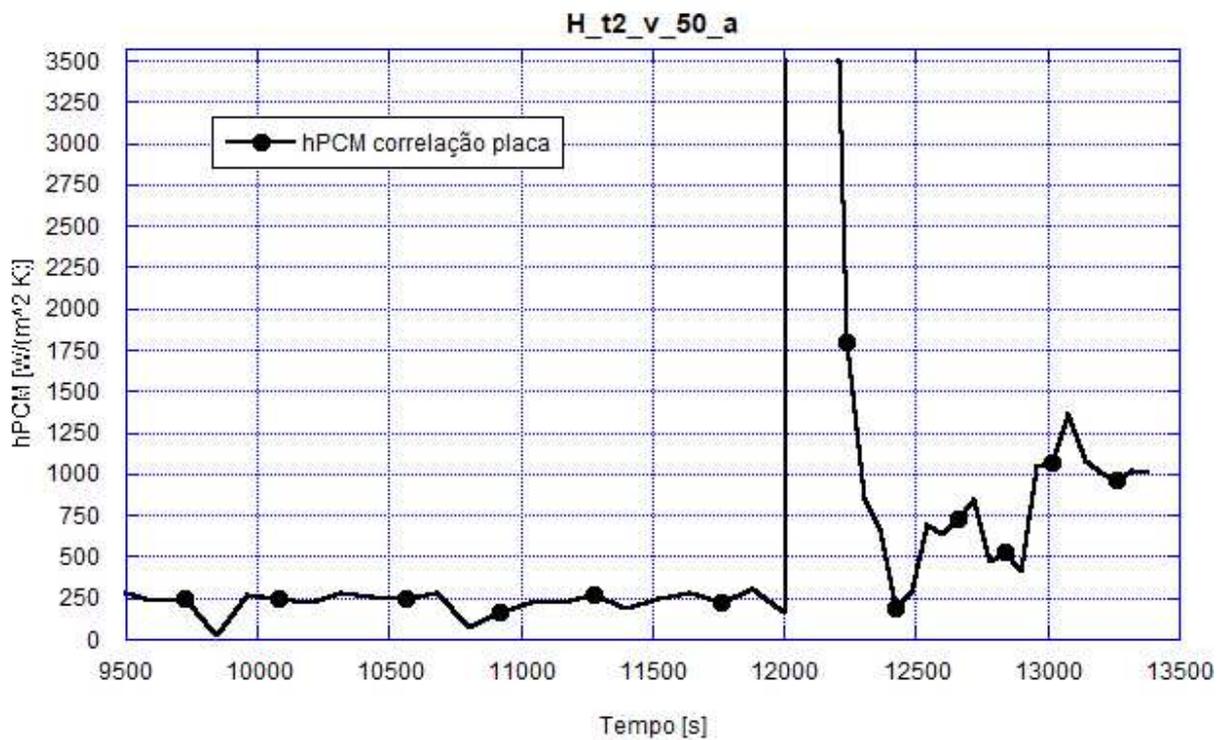


Figura F.24- Gráfico da evolução do coeficiente de transferência de calor do PCM no ensaio t2_v_50_a.

ANEXO G: Valores médios do caudal mássico e da velocidade do escoamento para os ensaios realizados

Na Tabela G.1 apresentam-se os valores médios do caudal mássico para cada disposição da cápsula e frequências de alimentação da bomba que bombeia o termofluido. São apresentados também os valores médios da velocidade de escoamento no permutador de testes considerando uma velocidade média entre a velocidade

Tabela G.1- Valores médios do caudal mássico de termofluido para cada disposição da cápsula

Disposição	Caudal mássico [kg/s]	
	Ensaio a 35 Hz	Ensaio a 50 Hz
Vertical	0,41	0,52
Horizontal	0,42	0,55

Na Tabela G.2 são apresentados também os valores médios da velocidade de escoamento no permutador de testes considerando uma velocidade média do escoamento.

Tabela G.2- Valores médios do caudal mássico de termofluido para cada disposição da cápsula

Disposição	Velocidade média[m/s]	
	Ensaio a 35 Hz	Ensaio a 50 Hz
Vertical	0,0075	0,010
Horizontal	0,0067	0,0093