

ÍTALO FRANCO GUILHERME

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS
INTERMEDIÁRIOS COM GRAFITE PARA
INTENSIFICAR A TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

ÍTALO FRANCO GUILHERME

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS INTERMEDIÁRIOS COM
GRAFITE PARA INTENSIFICAR A TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

G956
2022

Guilherme, Italo Franco, 1995-
Desenvolvimento de Materiais Intermediários com
Grafite para Intensificar a Transferência de Calor em
Sistemas de Refrigeração [recurso eletrônico] / Italo
Franco Guilherme. - 2022.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.278>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Bandarra Filho, Enio Pedone
,1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico nº 609, COPEM				
Data:	14/06/2022	Hora de início:	14:00h	Hora de encerramento:	15:40h
Matrícula do Discente:	12012EMC012				
Nome do Discente:	Ítalo Franco Guilherme				
Título do Trabalho:	Desenvolvimento de Materiais Intermediários com Grafite para Intensificar a Transferência de Calor em Sistemas de Refrigeração				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Estudo da conversão de um resfriador de bebidas operando com R22 para Propano				

Reuniu-se por Webconferência via Microsoft Teams, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Solidônio Rodrigues de Carvalho (FEMEC/UFU); Carolina Palma Naveira Cotta (UFRJ) e Enio Pedone Bandarra Filho (FEMEC/UFU) orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/06/2022, às 15:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 14/06/2022, às 15:44, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

Documento assinado eletronicamente por **Carolina Palma Naveira Cotta, Usuário Externo**, em 14/06/2022, às



16:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3649813** e o código CRC **231F95A3**.

Dedico à minha família, Aléxia Pádua Franco, Carlos Augusto Guimarães Guilherme e Sofia Franco Guilherme. Obrigado por me ensinarem o valor da educação.

AGRADECIMENTO

Ao Professor Dr. Enio Pedone Bandarra Filho pela orientação durante todo o tempo de trabalho.

À equipe do laboratório que sempre contribuiu e auxiliou na solução dos desafios do projeto.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

À CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa.

GUILHERME, Í. F., **Desenvolvimento de Materiais Intermediários com Grafite para Intensificar a Transferência de Calor em Sistemas de Refrigeração**. 2022. 139 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar experimentalmente as propriedades termofísicas de materiais compósitos com o intuito de aplicá-los como materiais intermediários para armazenamento de energia térmica em sistemas de refrigeração operando com fluido refrigerante hidrocarboneto, especificamente em resfriadores de líquidos. Para isso, foi utilizado um condutímetro para análise das propriedades, desenvolvido uma bancada experimental para análise de transferência de calor nesses materiais e projetado um evaporador para operar com auxílio desse MI. Com os resultados obtidos, observou-se que a adição de grafite em compósitos à base de cal hidratado, gesso e cimento fez com que as propriedades termofísicas aumentassem, principalmente a condutividade térmica, que incrementou 134 %, 106 % e 16 %, respectivamente. Esse acréscimo refletiu na eficiência do processo de transferência de calor e permitiu variações de temperatura mais rápidas. Além disso, notou-se a influência da quantidade de água utilizada na fabricação dos materiais, visto que à medida que ocorre a secagem, surgem vazios devido a perda de água. De modo que quanto maior a quantidade de poros menor a condutividade e difusividade térmicas e menos eficientes se tornam os processos de transferência de calor. Por fim, a aplicação do evaporador contendo material intermediário, com grafite, em um resfriador de líquido possibilitou a substituição do fluido refrigerante R-22 pelo R-290, com carga reduzida e semelhante capacidade. A temperatura de descarga do propano no compressor foi bem inferior àquela observada para o HCFC. E ao comparar os valores médios de potência ativa, o sistema com auxílio do MI obteve redução de 40 %, tendo influência direta na economia de energia elétrica consumida pelo equipamento.

Palavras Chave: Compósito. Grafite. Transferência de calor. Substituição de fluido refrigerante halogenado. R-290.

GUILHERME, Í. F., **Development of Intermediate Materials with Graphite to Enhance Heat Transfer in Refrigeration Systems**. 2022. 139 f. M. Sc. Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil.

Abstract

This work aims to develop and experimentally evaluate the thermophysical properties of composite materials in order to apply them as intermediate materials for thermal energy storage in refrigeration systems operating with hydrocarbon refrigerant fluid, specifically in a refrigeration system of liquids. For this, a conductivity meter was used to analyze the properties, an experimental bench was developed for the analysis of heat transfer in these materials and an evaporator was designed to operate with the help of the intermediate material. With the obtained results, it was observed that the addition of graphite in hydrated lime, gypsum and cement composites increased the thermophysical properties, especially the thermal conductivity, which developed by 134 %, 106 % and 16 %, respectively. This increment influenced the efficiency of the heat transfer process and allowed for faster temperature variations. Furthermore, the influence of the amount of water used in the manufacture of the materials was noted, since as drying occurs, voids appear due to water loss. Therefore, the greater the number of pores, the lower the thermal conductivity and diffusivity and the less efficient the heat transfer processes become. Finally, the application of the evaporator containing intermediate material, with graphite, in a refrigeration system of liquids made it possible to replace the refrigerant R-22 with R-290, with reduced load and similar capacity. The discharge temperature of the propane in the compressor was much lower than that observed for the HCFC. And when comparing the average values of active power, the system with the help of the new material obtained a reduction of 40 %, having a direct influence on the electric energy economy consumed by the equipment.

Keywords: Composite. Graphite. Heat transfer. Halogenated refrigerant substitution. R-290.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Comparação entre os resfriadores de líquido e detalhes do MI compósito aplicado.....	3
Figura 2.1 – Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor	6
Figura 2.2 – Plano de eliminação dos fluidos refrigerantes halogenados de acordo com o Protocolo de Montreal. Adaptado de: (HARBY, 2017).....	9
Figura 2.3 – Diagrama pressão-entalpia do R-22 (a) e do R-290 (b)	17
Figura 2.4 – Diagrama esquemático da transição das mudanças de fase de um PCM (DU et al., 2018).....	25
Figura 2.5 – Condutividade térmica de compósitos de cimento com adição de grafite, com diferentes razões de água sobre cimento, em função da fração mássica de grafite e comparado ao modelo de Maxwell-Garnett (M-G)	42
Figura 3.1 – (a) Condutivímetro LINSEIS THB-1 no momento da medição da amostra com grafite e (b) Sensor “B7620”	47
Figura 3.2 – Balança de precisão BK500	48
Figura 3.3 – Forno: Estufa S.E. Retilínea Fanem Ltda. (ajustada para 30 °C).....	48
Figura 3.4 – Amostras de cal hidratado com água (a) no momento da mistura (pré secagem) e (b) pós secagem.....	49
Figura 3.5 – Amostras com fração mássica de 1/20 (a) pré secagem; (b) pós secagem, (c) pós lixa	50
Figura 3.6 – Amostras de gesso estáveis com distintas frações mássicas de grafite: (a) 4:0:3; (b) 20:1:15; (c) 16:1:12; (d) 12:1:9; (e) 8:1:6; (f) 4:1:3.....	51
Figura 3.7 – Amostras de gesso estáveis com fração mássica de grafite de 5 % em relação ao gesso (1/20).....	51
Figura 3.8 – Amostras de cal hidratado e gesso na mesma proporção	51
Figura 3.9 – Compósitos de cimento após secagem. (a) S1, S2, S3, S4, S5; (b) S5, S6, S7	52

Figura 3.10 – Frações mássicas analisadas para gerar as superfícies triangulares	53
Figura 3.11 – Localização dos termopares no tanque cilíndrico	56
Figura 3.12 – Desenho esquemático da bancada experimental para análise da transferência de calor no material intermediário	57
Figura 3.13 – Estufa Marconi MA035 utilizada para secagem do MI (a) desligada e (b) com o conjunto cilindro, MI, serpentina e sensores	58
Figura 3.14 – Cal puro (a) logo após a fabricação, (b) passado uma semana na estufa e (c) ao final do processo de secagem	59
Figura 3.15 – Cal com grafite (a) logo após a fabricação, (b) passado uma semana na estufa e (c) passados 17 dias na estufa	59
Figura 3.16 – Segundo compósito de cal com grafite (a) uma semana de secagem, (b) duas semanas de secagem e (c) três semanas de secagem	59
Figura 3.17 – Terceiro compósito de cal com grafite (a) logo após a fabricação, (b) passado um dia na estufa	60
Figura 3.18 – Desenho esquemático para a bancada experimental desenvolvida para a análise no resfriador de líquido	61
Figura 3.19 – Fotografia do (a) resfriador e reservatório de líquido e (b) resfriador de líquido com sistema de monitoramento	61
Figura 3.20 – Desenho técnico do trocador de calor. (a) Componentes e (b) detalhamento interno	63
Figura 4.1 – Condutividade térmica das amostras com distintas frações mássicas de grafite ao longo dos dias	67
Figura 4.2 – Condutividade térmica em função da fração mássica de grafite considerando as diferentes fases da secagem	68
Figura 4.3 – Condutividade térmica para as amostras de cal puro em função do tempo de cura (dias após a fabricação)	69
Figura 4.4 – Condutividade térmica para as amostras de cal variando a fração mássica de grafite, medições logo após retirada do forno e posteriormente, com as amostras estáveis	70
Figura 4.5 – Condutividade térmica em função da fração mássica de grafite para as amostras estáveis de gesso e cal hidratado	72

Figura 4.6 – Incremento na condutividade térmica para compósitos com diferentes matrizes utilizando grafite como material de preenchimento.....	73
Figura 4.7 – Condutividade térmica para as amostras estáveis de cal hidratado e gesso fração mássica de 5 % de grafite.....	74
Figura 4.8 – Superfícies triangulares (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica (c) massa específica (d) calor específico.....	76
Figura 4.9 – Superfície triangular da condutividade térmica para compósito de cimento.....	77
Figura 4.10 – Variação da condutividade térmica com o aumento da fração mássica de grafite	79
Figura 4.11 – Superfície triangular gerada para (a) difusividade térmica e (b) massa específica	80
Figura 4.12 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica.....	82
Figura 4.13 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) massa específica, (b) calor específico e (c) perda de água	83
Figura 4.14 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica.....	84
Figura 4.15 – Superfícies de resposta (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica (c) massa específica.....	84
Figura 4.16 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de resfriamento do MI (cal puro e cal + grafite).....	85
Figura 4.17 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de aquecimento do MI (cal puro e cal + grafite).....	86
Figura 4.18 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de resfriamento do MI (cal + grafite 2) com uma e duas semanas de secagem	87
Figura 4.19 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de aquecimento do MI (cal + grafite 2) com uma e das semanas de secagem	88

Figura 4.20 – Variação da massa dos materiais em função do tempo de secagem no forno	88
Figura 4.21 – Perfil de temperatura cal puro (a) resfriamento (b) aquecimento	89
Figura 4.22 – Perfil de temperatura cal + grafite (a) resfriamento (b) aquecimento ..	90
Figura 4.23 – Perfil médio de temperatura do MI (cal + grafite 3) para as condições de resfriamento e de aquecimento	91
Figura 4.24 – Diferença de temperatura entre entrada e saída do líquido nos processos de (a) resfriamento do MI (b) aquecimento do MI	94
Figura 4.25 – Energia total (a) acumulada pelo líquido no resfriamento do MI (b) dispensada no aquecimento do MI.....	95
Figura 4.26 – Temperatura de saída da água no resfriador de líquido operando com (a) R-22 e (b) R-290	96
Figura 4.27 – Temperaturas de sucção e de descarga do fluido refrigerante para o (a) R-22 e (b) R-290	97
Figura 4.28 – Potência ativa e corrente gerada pelo compressor durante o teste do resfriador de líquido operando com (a) R-22 e (b) R-290.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades termodinâmicas dos fluidos refrigerantes (LEMMON; HULER; MCLINDEN, 2010)	16
Tabela 2.2 – Parâmetros de desempenho dos fluidos refrigerantes com condição de -15 °C e 30 °C de temperatura de condensação e evaporação, respectivamente (PAVKOVIC, 2013).....	16
Tabela 2.3 – Desempenho do R-290 em comparação ao R-22 em testes de <i>drop-in</i> encontrados na literatura.....	21
Tabela 2.4 – Desempenho dos sistemas de refrigeração com aplicação de PCM encontrados na literatura.....	28
Tabela 2.5 – Desempenho dos sistemas de refrigeração com aplicação de PCM encontrados na literatura (continuação)	29
Tabela 2.6 – Condutividade térmica dos compósitos de silicone	36
Tabela 2.7 – Condutividade térmica dos compósitos de epóxi	37
Tabela 2.8 – Condutividade térmica dos compósitos de gesso	38
Tabela 2.9 – Condutividade térmica dos compósitos de cimento com grafite	44
Tabela 3.1 – Faixa de medição e erros do condutímetro LINSEIS THB-1 com a sonda “B7620”	46
Tabela 3.2 – Componentes e detalhes da bancada experimental.....	55
Tabela 3.3 – Componentes presentes no evaporador seco utilizado no resfriador de líquido com R-290	63
Tabela 4.1 – Calor específico calculado através dos experimentos com cada MI	93

LISTA DE SÍMBOLOS

Arábicos

Ág	Água
a/c	Razão água e cimento
agr/c	Razão agregado e cimento
c	Calor específico dos compósitos
Cap _{.refr}	Capacidade de refrigeração ou de aquecimento [kJ/m ³]
Cap _{.refr/aq}	Aumento da capacidade de refrigeração ou de aquecimento [%]
Cons _{.energia}	Redução no consumo de energia [%]
cp _{MI}	Calor específico do MI
cp _{líquido}	Calor específico do líquido
E	Mistura eutética
G	Grafite
g/c	Razão grafite e cimento
k	Condutividade térmica [W/mK]
k _c	Condutividade térmica do compósito [W/mK]
k _g	Condutividade térmica compósito de cimento com grafite [W/mK]
k _m	Condutividade térmica da matriz [W/mK]
k _p	Condutividade térmica da partícula de grafite [W/mK]
k ₀	Condutividade térmica compósito de cimento sem grafite [W/mK]
k _{incremento}	Incremento no valor de condutividade térmica [%]
m _{água}	Fração mássica normalizada de água
m _{cal}	Fração mássica normalizada de cal hidratado
m _{grafite}	Fração mássica normalizada de grafite
M _{molar}	Massa molar [g/mol]
m. %	Fração mássica [%]
ṁ _m	Vazão mássica média do líquido [g/s]

$\dot{m}_{\text{líquido}}$	vazão mássica do líquido [g/s]
m_{MI}	Massa de material intermediário [kg]
P	Parafina
$P_{\text{água}}$	Porcentagem de água perdida pelo material durante a secagem [%]
$p_{\text{crítica}}$	Pressão crítica [bar]
p_{evap}	Pressão de evaporação [bar]
p_{cond}	Pressão de condensação [bar]
$Q_{\text{líquido}}$	Calor acumulado/dispensado pelo material líquido
$\dot{Q}_{\text{líquido}}$	Taxa de calor no líquido
R^2	Coefficiente de determinação
$S_{\text{água}}$	Secagem da água [%]
S	Desvio padrão
$T_{\text{crítica}}$	Temperatura crítica [°C]
T_{descarga}	Temperatura de descarga do compressor [°C]
$T_{\text{ebulição}}$	Temperatura ebulição [°C]
T_{entrada}	Temperatura de entrada do líquido [°C]
T_{externa}	Temperatura do meio externo [°C]
T_{finalMI}	Temperatura final do material intermediário [°C]
$T_{\text{inicialMI}}$	Temperatura inicial do material intermediário [°C]
$T_{\text{saída}}$	Temperatura de saída do líquido [°C]
$t_{\text{compressor}}$	Redução no tempo de funcionamento do compressor [%]
$t_{\text{experimento}}$	Tempo decorrido no experimento [s]
T_i	Instante de tempo inicial [s]
T_f	Instante de tempo final [s]
t_{sec}	Tempo de secagem [dias]
vol. %	Concentração volumétrica [%]

Gregos

α	Difusividade térmica [mm ² /s]
ρ	Massa específica [g/cm ³]
\emptyset	Fração volumétrica [cm ³ /cm ³]

Siglas

A1	Classificação normativa
A3	Classificação normativa
A2L	Classificação normativa
ANOVA	Análise de variância
ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros do Setor de Aquecimento, Refrigeração e Ar condicionado
BNNS	Nanofolha de nitreto de boro
B2L	Classificação normativa
CFC	Clorofluorcarbono
CNT	Nanotubo e carbono
COP	Coefficiente de desempenho
Drop-in	Processo de substituição de fluido refrigerante
EER	Índice de eficiência energética
EES	Software para sistemas de equações não lineares simultâneas
GE	Grafite expandido
GI	Grafite isostático
GNP	Nanoplaquetas de grafeno
GBN	Nanopartícula de nitreto de boro
GO	Óxido de grafeno
GWP	Potencial de aquecimento global
HC	Hidrocarboneto
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
HFC	Hidrofluorcarbono
IGF	Carga isostática de grafite
ISO	Organização Internacional de Normalização
LabVIEW®	Software visual de laboratório e instrumentação
LCCP	Performance climática no ciclo de vida
LEST-NANO	Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
LII	Limite inferior de inflamabilidade
LSHX	Trocador de calor intermediário

M-G	Maxwell-Garnett
MI	Material intermediário
MWCNT	Nanotubo e carbono de paredes múltiplas
NI	National Instruments
ODP	Potencial de destruição de ozônio
PCM	Material de mudança de fase
PCT	Temperatura de mudança de fase
PDT	Tempo até atingir a temperatura desejada
PPF	Fibras de polipropileno
QLNM	Método de nitrogênio quase-líquido
QRA	Abordagem quantitativa de riscos
RAC	Refrigeração e Ar Condicionado
rGO	Óxido de grafeno reduzido
SiCNW	Nanofios de carbeto de silício
SSPCM	Material de mudança de fase com forma estabilizada
Statistica®	Software estatístico avançado
S1	Amostra 1
S2	Amostra 2
S3	Amostra 3
S4	Amostra 4
S5	Amostra 5
S6	Amostra 6
S7	Amostra 7
TEWI	Impacto do aquecimento equivalente total
TIM	Materiais de interface térmica
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	5
2.1 Sistemas de refrigeração por compressão de vapor	5
2.1.1 <i>Fluidos refrigerantes</i>	8
2.1.2 <i>Aspectos de segurança</i>	11
2.1.3 <i>Redução da carga de fluido refrigerante</i>	13
2.1.4 <i>Substituição do R-22 com R-290</i>	15
2.2 Perdas em sistemas de refrigeração intermitentes	21
2.3 Materiais utilizados para aprimorar transferência de calor	24
2.3.1 <i>PCM (material de mudança de fase)</i>	24
2.3.2 <i>TIM (materiais de interface térmica)</i>	29
2.4 Materiais compósitos	30
2.4.1. <i>Partículas de preenchimento</i>	31
2.4.2. <i>Condutividade térmica dos compósitos</i>	35
2.4.3. <i>Transferência de calor por condução em compósitos</i>	38
2.5 Grafite como partícula de preenchimento	40
CAPÍTULO III - Metodologias Experimentais	46
3.1 Propriedades termofísicas do material intermediário	46

3.1.1. <i>Aparato experimental</i>	46
3.1.2. <i>Fabricação das amostras</i>	47
3.1.3. <i>Planejamentos estatísticos</i>	51
3.2 Análise da transferência de calor no material intermediário	54
3.2.1. <i>Componentes básicos da bancada experimental</i>	54
3.2.2. <i>Instrumentação e monitoramento da bancada</i>	55
3.2.3. <i>Metodologia dos testes e condições avaliadas</i>	57
3.3 Resfriador de líquido	60
3.2.1. <i>Componentes básicos da bancada experimental</i>	62
3.2.2. <i>Instrumentação e monitoramento da bancada</i>	64
3.2.3. <i>Metodologia dos testes e condições avaliadas</i>	64
CAPÍTULO IV - Resultados e Discussões	66
4.1. Propriedades termofísicas do material intermediário	66
4.1.1. <i>Compósito de cal hidratado</i>	75
4.1.2. <i>Compósito de cimento</i>	77
4.1.3. <i>Compósito de gesso</i>	81
4.2. Transferência de calor no material intermediário	85
4.3. Teste de aplicação do MI no resfriador de líquido	95
CAPÍTULO V - Conclusões e Perspectivas Futuras	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
ANEXO I	118
ANEXO II	128
ANEXO III	136
ANEXO IV	138

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

A preocupação em tornar os sistemas de refrigeração cada vez mais eficientes e menos agressivos ao meio ambiente cresce ao longo dos anos. O fato desses equipamentos serem responsáveis por grande parte do consumo de energia no Brasil e no mundo demonstra a importância de se desenvolverem sistemas cada vez mais eficientes que consumam menos energia elétrica e influenciem menos na liberação de CO₂ para a atmosfera. Além disso, os fluidos refrigerantes, imprescindíveis no funcionamento dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, influenciam no aquecimento global e, em alguns casos, agredem a camada de ozônio. Logo, eles devem ser considerados e selecionados corretamente no projeto de um sistema de refrigeração.

Desta forma, diversos trabalhos encontrados na literatura se preocuparam com o desenvolvimento de tecnologias eficientes de armazenamento de energia e em encontrar alternativas de minimizar os danos causados pelos sistemas de refrigeração. O aperfeiçoamento das técnicas de controle e automação, a otimização dos componentes do sistema, o desenvolvimento de novos fluidos refrigerantes e de sistemas capazes de operar com fluidos naturais de maneira segura, eficiente e com menos danos ao meio ambiente são alguns exemplos.

Sendo assim, uma boa opção para diminuir os impactos ambientais provenientes desses equipamentos está no estudo e fabricação de materiais capazes de maximizar os processos de transferência de calor e aumentar a eficiência térmica dos sistemas. Além da substituição dos fluidos refrigerantes halogenados, utilizados em grande parte dos sistemas de refrigeração, por fluidos naturais, como os hidrocarbonetos. No entanto, para que a substituição seja viável e possibilite desempenho semelhante, ou até superior ao sistema

original, são necessárias muitas vezes alterações no projeto que se adaptem às propriedades termofísicas dos fluidos alternativos.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um material intermediário com as propriedades termofísicas adequadas para atuar em um resfriador de líquido, no intuito de aprimorar o processo de transferência de calor, possibilitando que esse opere com uma reduzida carga de propano (R-290), através do confinamento do fluido refrigerante nas serpentinas. Além de apresentar equiparada eficiência em relação aos sistemas semelhantes que operam com o HCFC R-22.

Para alcançar o objetivo da pesquisa, foram fabricados diversos materiais com adição de grafite na intenção de analisar as alterações em suas propriedades e no processo de transferência de calor. Em seguida, foi desenvolvido um sistema de refrigeração que opera com o auxílio de um material compósito, com confinamento do fluido refrigerante nas serpentinas. Para isso, foi realizada a medição e análise das propriedades termofísicas dos materiais compósitos, afim de ampliar o conhecimento a respeito dos efeitos que influenciam na condutividade térmica desses materiais e otimizá-los.

1.2 Objetivos

O objetivo dessa pesquisa é avaliar experimentalmente as propriedades termofísicas dos materiais compósitos desenvolvidos com a finalidade de serem aplicados como materiais para armazenamento de energia térmica em sistemas de refrigeração.

Assim, foram determinadas as etapas a serem realizadas para executar e completar o presente trabalho, conforme apresentado a seguir:

- Realizar uma revisão geral do estado da arte sobre fluidos refrigerantes hidrocarbonetos, especificamente o R-290. Bem como uma revisão sobre os materiais intermediários capazes de incrementar a eficiência dos processos de transferência de calor, dando ênfase aos materiais compósitos, que serão o objeto de estudo da pesquisa;
- Fabricar os compósitos a partir de diferentes matrizes com adição de grafite com o intuito de aprimorar as propriedades termofísicas, principalmente a condutividade térmica;
- Determinar as propriedades termofísicas dos materiais fabricados e seus respectivos comportamentos em processos de transferência de calor e caracterizar os fenômenos físicos que influenciaram nas alterações das propriedades obtidas;

- Aplicar o material desenvolvido em um resfriador de líquido para atuar com carga reduzida de R-290;
- Analisar e comparar os resultados experimentais.

A Fig. 1.1 sintetiza o objetivo da pesquisa. Ela compara de maneira esquemática o resfriador de líquido original, que opera com R-22 com o novo equipamento desenvolvido para operar com R-290 e auxílio do MI compósito fabricado e analisado durante as etapas de determinação das propriedades termofísicas e dos processos de transferência de calor em compósitos com grafite.

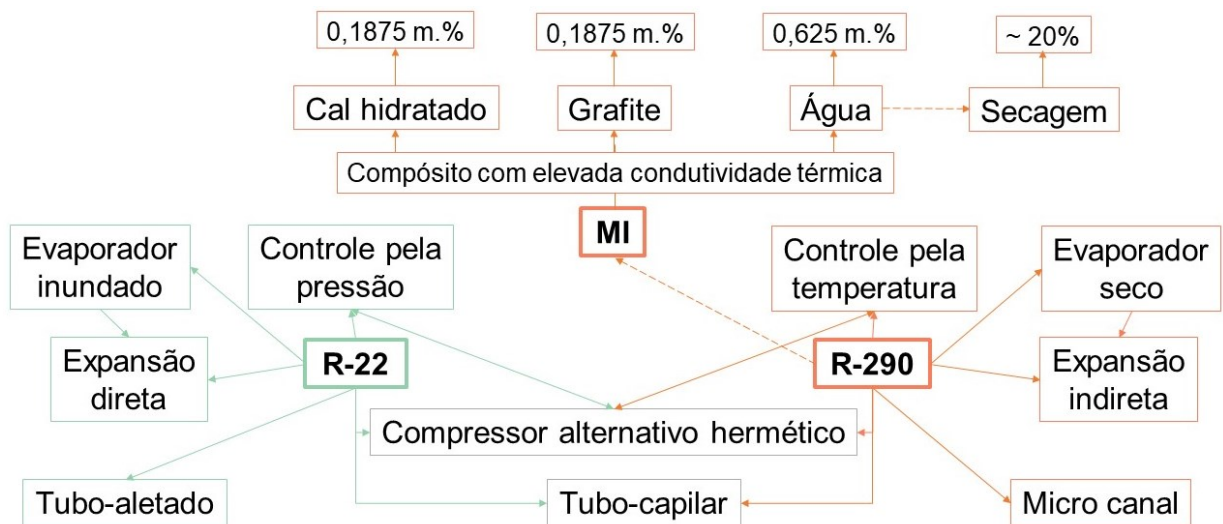


Figura 1.1 – Comparação entre os resfriadores de líquido e detalhes do MI compósito aplicado

1.3 Estrutura da dissertação

O texto está organizado de tal forma que descreve todas as etapas realizadas para alcançar o objetivo principal proposto. Assim, o trabalho apresenta cinco seções, cada uma subdividida em tópicos que especificam detalhadamente características da execução do projeto.

A segunda seção, intitulada revisão bibliográfica, registra o levantamento bibliográfico realizado, discorrendo de forma introdutória alguns conceitos básicos a respeito dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor, além da análise sobre fluidos refrigerantes, aspectos de segurança e redução de carga de fluido refrigerante para que os sistemas operem com hidrocarbonetos. Posteriormente, são apresentados os tópicos a

respeito da utilização do R-290 como substituto do R-22, apresentando um estudo acerca das aplicações, dos componentes e dos resultados numéricos, e principalmente, experimentais referentes ao desempenho dos sistemas de refrigeração e ar condicionado. Trata-se também das perdas em sistemas de refrigeração que atuam de modo intermitente. Além de serem expostos alguns materiais utilizados para aprimorar processos de transferência de calor, abordando principalmente estudos com diversos materiais compósitos e que utilizaram grafite como partícula de preenchimento.

A terceira seção relata as características referentes ao equipamento experimental, para avaliação das propriedades termofísicas e análise da transferência de calor nos materiais fabricados, além da bancada experimental para o estudo do resfriador de líquido. A quarta seção refere-se à análise dos resultados obtidos experimentalmente com a comparação dos resultados das diferentes pesquisas encontradas na literatura. Para finalizar, na quinta seção são expostas as conclusões finais deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção informará conceitos básicos para o desenvolvimento do projeto, abordará os tópicos necessários para auxiliar na compreensão do texto e apresentará estudos prévios na área e seus resultados como parâmetro de comparação. Inicialmente, serão explicados os fundamentos referentes ao ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor, os fluidos refrigerantes e as questões referentes ao impacto ambiental e segurança dos sistemas. Logo após, será apresentado um estudo a respeito de sistemas de refrigeração e ar condicionado carregados com R-290, no intuito de analisar suas características e alternativas como substituto do R-22.

A revisão bibliográfica também aborda os conceitos a respeito dos materiais intermediários que podem ser aplicados para aprimorar processos de transferência de calor, com foco nos compósitos, expondo as motivações, variações e condições de sua aplicação nos sistemas de refrigeração. Por fim, será apresentado um levantamento bibliográfico sobre os efeitos do grafite como partícula de preenchimento no aprimoramento das propriedades termofísicas dos compósitos.

2.1 Sistemas de refrigeração por compressão de vapor

O resfriador de líquido está fundamentado no ciclo de refrigeração por compressão de vapor convencional. Neste caso, quatro processos compõem o ciclo de refrigeração, são estes, a compressão, a condensação, a expansão e a evaporação do fluido refrigerante. Desta forma, a Fig. 2.1 apresenta de maneira esquemática os componentes básicos do sistema de refrigeração por compressão de vapor.

Para transportar a energia térmica retirada do meio a ser resfriado até o meio externo é necessário um fluido de trabalho, denominado fluido refrigerante. De maneira que, no

processo de compressão, o fluido entra no compressor no estado de vapor saturado e sai como vapor superaquecido devido ao aumento de sua pressão e temperatura. Após deixar o compressor, ele entra no condensador onde ocorre o processo de troca de calor teoricamente isobárico, no qual a pressão se mantém praticamente constante, assim, o calor é rejeitado para o meio externo até que o fluido refrigerante esteja no estado de líquido comprimido. Em seguida, o fluido líquido segue para o dispositivo de expansão - que pode ser um tubo capilar, no caso da maioria dos resfriadores de líquido de menor porte, uma válvula de expansão termostática ou uma válvula de expansão eletrônica - no qual é imposta uma elevada perda de carga no escoamento através de um processo isoentálpico. Ao circular pelo evaporador, à baixa pressão e temperatura, o fluido refrigerante absorve o calor do meio circundante até evaporar completamente, retornando ao estado de vapor saturado. Por fim, ele retorna ao compressor, reiniciando o ciclo termodinâmico.

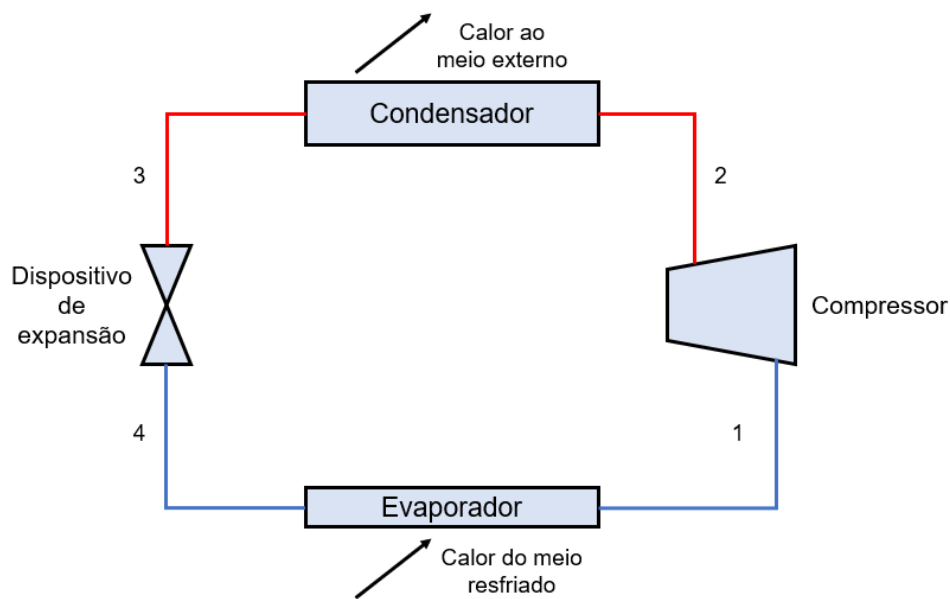


Figura 2.1 – Ciclo básico de refrigeração por compressão de vapor

No caso do dispositivo de expansão, essa pesquisa se atentará especificamente para os sistemas compostos por tubos capilares, já que este integrará o resfriador de líquido no qual os testes serão realizados. Assim como os outros dispositivos, a função básica do tubo capilar é expandir o fluido refrigerante e regular seu fluxo para o evaporador. Dentre as vantagens da utilização do tubo capilar em sistemas de refrigeração as mais relevantes são o baixo custo e baixo torque inicial do compressor, devido a equalização da pressão através do tubo capilar durante o ciclo em que o compressor está desligado, além da ampla disponibilidade no mercado. Sendo que as dimensões usuais de diâmetro interno e comprimento são entre 0,5 – 2,0 mm e 1,0 – 6,0 m, respectivamente (DUBBA; KUMAR,

2017). Analisando um ciclo termodinâmico de refrigeração em um sistema equipado com tubo capilar, no interior do tubo ocorre um processo de mudança de fase e consequente aumento no título do vapor de fluido refrigerante. Devido à mudança de fase, há um acréscimo na velocidade do fluido ocasionando em uma queda de pressão adicional (DUBBA; KUMAR, 2017).

Com relação ao condensador aplicado no sistema de compressão de vapor, será realizada uma análise a respeito dos condensadores com microcanais, visto que foi este o modelo aplicado no desenvolvimento do resfriador de líquido estudado na pesquisa. Devido às altas taxas de transferência de calor por unidade de volume, os condensadores microcanais são utilizados em sistemas de ar condicionado e radiadores automotivos há mais de uma década. Com a redução dos custos de fabricação devido aos recentes avanços tecnológicos nas áreas de manufatura, esses tipos de condensadores se tornam cada vez mais viáveis em aplicações mais econômicas, de equipamentos que utilizem componentes menos complexos, como tubo capilares, por exemplo em resfriadores domésticos e resfriadores de líquido. Assim, os trocadores de calor de microcanais podem ser considerados boas alternativas para reduzir a carga de fluido refrigerante, principalmente em aplicações de fluidos inflamáveis, como hidrocarbonetos (BOENG et al., 2020).

Como os condensadores contêm a maior quantidade de fluido refrigerante além da linha de líquido, o uso de mini ou micro canais é especialmente adequado para a redução de carga (LÓPEZ-BELCHÍ et al., 2016). O comportamento dos condensadores de microcanais em formato de serpentina foi simulado por Shao et al. (2009), eles observaram que a carga de fluido refrigerante foi metade da encontrada em trocadores de calor semelhantes equipados com distribuidores verticais. Os autores Park e Hrnjak (2008), além de obterem redução na carga de fluido, observaram queda na temperatura de condensação, redução na perda de carga do fluxo de fluido refrigerante e aumento no COP de um sistema de condicionamento de ar residencial quando o condensador regular no tubo de aleta foi substituído por um condensador de microcanal com distribuidores verticais. Foram observadas reduções de cerca de 50 % da carga nos experimentos realizados por Hrnjak e Litch (2008) em um chiller carregado com amônia (R-717) e de 22 % em um chiller com R-134a (ILLÁN-GÓMEZ et al. 2017), ao utilizarem condensadores de microcanais

Em uma publicação mais recente em que foi utilizado condensador do tipo microcanal em um refrigerador doméstico com variações nas dimensões dos tubos capilares, Tosun et al. (2019) relataram redução de 8 % na carga de fluido refrigerante e de 19 % no consumo de energia do sistema otimizado comparado ao convencional. Outro trabalho apresentou redução no consumo de energia ao estudar a aplicação de um condensador de microcanal

em um refrigerador doméstico, sendo avaliado numericamente economia de 7 % de energia comparado ao sistema com condensadores do tipo arame sobre tubo (BOENG et al., 2020).

O resfriador de líquido projetado para operar com o R-22 possui evaporador do tipo inundado que é constituído por um vaso de pressão, isolado termicamente, que contém fluido refrigerante no estado líquido, a alta pressão e baixa temperatura (THIRY, 2010). Neste tipo de evaporador o fluido refrigerante, imerso no tanque, e o fluido secundário, que circula na serpentina, trocam calor causando a mudança de fase do fluido refrigerante e a mudança de temperatura do fluido que escoar dentro de tubos (ROLOTTI, 2014). Esse contato permite que o fluido secundário permaneça dentro da faixa de temperatura desejada enquanto o sistema de refrigeração não está em funcionamento (sistema intermitente), já que nessa configuração o trocador de calor opera como reservatório de energia, devido às propriedades termofísicas do fluido refrigerante. O controle da temperatura do fluido secundário é realizado por intermédio de um pressostato que controla a pressão interna no evaporador. Evaporadores inundados necessitam de uma grande quantidade de fluido refrigerante.

Ao analisar um sistema de refrigeração com evaporador inundado do tipo casco-e-tubo, Haitao et al. (2017) observou que na parte inferior do evaporador, o calor transferido elevou a temperatura do fluido refrigerante sub resfriado para a temperatura de evaporação, gerando poucas bolhas na superfície do tubo. Na parte central, o calor transferido resultou principalmente na mudança de fase do fluido de trabalho. Este evaporou na superfície dos tubos de troca de calor, surgindo mais bolhas, responsáveis pelo acúmulo e a formação de uma película de gás envolvendo o tubo. Na parte superior do pacote, o tamanho e a quantidade das bolhas aumentaram significativamente, de forma que, as pequenas bolhas geradas na superfície dos tubos aderiram às paredes do tubo, diminuindo a transferência de calor.

2.1.1 Fluidos refrigerantes

A preocupação em diminuir os impactos ambientais causados pelos sistemas de refrigeração e aquecimento cresce cada vez mais. Uma das alternativas para reduzir esses impactos é a utilização de fluidos refrigerantes que não agridam a camada de ozônio – zero ODP (Ozone Depletion Potential) – e que tenham pequeno potencial de aquecimento global – GWP (Global Warming Potential).

Os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) são compostos químicos utilizados principalmente em equipamentos de ar condicionado e refrigeração. Além de possuírem ODP positivo, podem ser milhares de vezes mais poluentes que o CO₂, contribuindo fortemente para a mudança climática, sendo gases causadores de efeito estufa. Assim,

algumas medidas foram tomadas nos últimos anos na tentativa de restringir o uso de refrigerantes que contenham cloro em sua composição, como o Protocolo de Montreal, além da implementação de novas regras que limitam o uso de fluidos de alto GWP.

Em relação às medidas tomadas no Brasil referentes ao uso desses fluidos refrigerantes, existe o Programa Brasileiro de Eliminação dos HCFCs – PBH. Esse programa contempla a estratégia de controle, redução e eliminação dessas substâncias. Foi criado a partir da decisão tomada no Protocolo de Montreal de eliminar a produção e consumo de HCFCs, na qual os Estados Partes do Protocolo de Montreal estabeleceram um novo cronograma que se inicia com o congelamento do consumo em 2013, seguido por uma redução escalonada até a eliminação completa em 2040 (PINTO; BANDARRA; MARCUCCI, 2019). O cronograma estabelecido é ilustrado na Fig. 2.2.

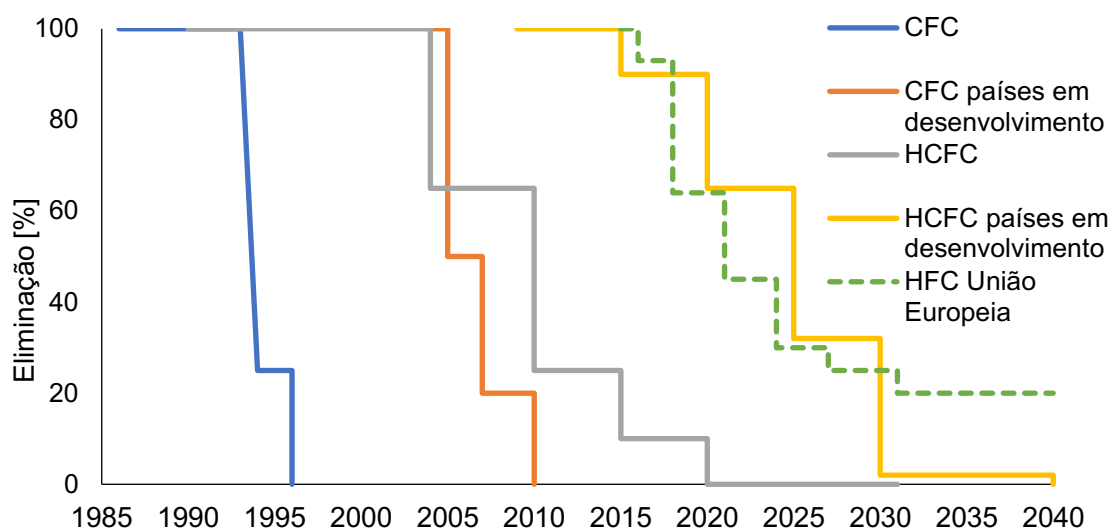


Figura 2.2 – Plano de eliminação dos fluidos refrigerantes halogenados de acordo com o Protocolo de Montreal. Adaptado de: (HARBY, 2017)

Devido ao fato dos hidrofluorcarbonos (HFCs) possuírem alto GWP, o último acordo sobre a eliminação dos HFCs, a partir da aprovação da Emenda de Kigali (2016), incluiu os HFCs na lista de substâncias controladas pelo Protocolo de Montreal (UNEP, 2016). Como consequência, o preço desses fluidos refrigerantes, assim como dos HCFCs, está cada ano mais elevado. Além disso, a legislação da União Europeia (2014) e o Acordo de Paris (2016), também enfatizam fortemente na eliminação progressiva do uso de refrigerantes sintéticos nocivos, a fim de reduzir a destruição da camada de ozônio e reverter os efeitos das mudanças climáticas (ABAS et al., 2018).

Dentre os HCFCs mais afetados nesse processo, o R-22 está entre os principais fluidos refrigerantes a serem substituídos, uma vez que possui GWP de 1760 e ODP de 0,05

(IPCC, 2014). No entanto é o fluido refrigerante mais utilizado em sistemas de refrigeração nos países em desenvolvimento. O R-22 é altamente utilizado em aplicações de condicionamento de ar comercial e residencial (FERNANDO et al., 2004), em sistemas de refrigeração industrial, comercial e de alimentos (SARBU, 2014), em resfriadores de líquido (chillers) (CALM, 2002; CHOUDHARI; SAPALI, 2020; ELGENDY; HASSANAIN; FATOUH, 2015).

Como fluidos alternativos para o R-22 tem-se os hidrocarbonetos, sendo o mais comum o R-290. Dentre as vantagens da utilização de hidrocarbonetos está a maior condutividade térmica (PALM, 2008); a menor vazão mássica, aproximadamente 50 % inferior para o R-290 em comparação ao R-22 em um ciclo de compressão de vapor padrão; o menor peso molecular do R-290 comparado ao R-22 que auxilia no incremento da eficiência volumétrica do compressor e a menor taxa de compressão, que diminui o trabalho do compressor (GRANRYD, 2001). Outra facilidade na substituição de um sistema projetado para R-22 com o fluido refrigerante alternativo R-290 é o fato de não serem necessários alterações significativas na válvula de expansão, de modo que um ajuste no dispositivo de expansão pode viabilizar a troca (PALM, 2007).

Na Europa Ocidental o R-290 está sendo usado em unidades com capacidades reduzidas, pelo fato de ser barato e estar disponível em abundância. Sendo um composto de hidrocarboneto puro que não libera nenhum agente de decomposição tóxico na combustão (DEVOTTA; PADALKAR; SANE, 2005). Diferentemente do R-22, que pode provocar asfixia devido ao fato dos vapores serem mais densos que o ar o que causa na redução do oxigênio disponível para a respiração.

O R-290, quando comparado ao R-22, oferece maior eficiência, melhor transferência de calor nos trocadores de calor, menor quantidade de carga de fluido refrigerante (CORBERÁN et al., 2008; PADALKAR; MALI; DEVOTTA, 2014) e temperaturas mais baixas de descarga do compressor (CHENG; WANG; LIU, 2014). Há também outras vantagens quanto ao uso desse fluido refrigerante hidrocarboneto, tais como: baixo custo, alta disponibilidade e alta compatibilidade com óleos minerais e sintéticos. No entanto, a sua característica mais indesejável é a inflamabilidade. Ela gera preocupações em termos de segurança e obriga à utilização de técnicos altamente qualificados que sigam as medidas e precauções adicionais de projeto, de substituição adequada de fluido e de manutenção do sistema (ZHOU; GAN, 2019). Nesse sentido, pode-se concluir que o HC R-290 é um substituto com alto potencial em sistemas de refrigeração, podendo superar o desempenho dos sistemas já existentes que operam com R-22 e tendo menor impacto no efeito estufa, já que além de ter ODP nulo, também possui baixo GWP, de 3 (LAMPUGNANI; ZGLICZYNSKI, 1996).

2.1.2 Aspectos de segurança

Como já comentado, o principal problema da utilização de fluidos refrigerantes HC é a inflamabilidade, classificados como A3 pela norma ISO 817 e a norma americana ASHRAE 34. Sendo necessários cuidados extras com relação a segurança do sistema de refrigeração. Nesse sentido, serão apresentados os riscos presentes na aplicação dos fluidos refrigerantes inflamáveis, assim como as possíveis medidas que podem aprimorar a segurança do sistema e os estudos referentes à redução de carga de fluido.

Zhang et al. (2013) propuseram algumas recomendações para diminuir os riscos inerentes aos sistemas de refrigeração operando com fluidos refrigerantes inflamáveis. (1) Verificar se a unidade interna está instalada longe de qualquer fonte potencial de ignição; (2) adotar um dispositivo detector de vazamentos que possa identificar se há vazamento de refrigerante; (3) instalar uma válvula de corte na tubulação de fluido refrigerante, que possibilite fechar imediatamente as tubulações assim que for detectada uma perda de fluido; (4) minimizar o uso de materiais combustíveis para a construção da unidade interna; e (5) implementar o uso de uma técnica confiável de união para a conexão entre os tubos de refrigerante que conectam a unidade interna à unidade externa. Ademais, a utilização de sistemas de refrigeração indiretos e trocadores de calor compactos podem auxiliar na redução de carga. Medidas como a implementação de sensores de HC, alarmes e ventilação forçada na unidade externa podem ser aplicados para reduzir os riscos de operação (PALM, 2008). Foi sugerido também a adição de grades de ventilação na parte inferior do equipamento para melhorar a convecção do ar nesta região e evitar acumulação de gases inflamáveis, aprimorando significativamente a segurança do sistema (TANG et al., 2018).

Colbourne e Espersen (2013) avaliaram o risco de inflamabilidade de fluidos refrigerantes HC em cabines de sorvete do tipo horizontal, através de uma abordagem quantitativa de riscos (QRA), usada para estimar a probabilidade de ignição de refrigerante vazado e a gravidade das consequências. Os riscos foram considerados insignificantes, visto que a frequência de ignição esteve entre 1×10^{-8} e 2×10^{-13} por ano. Além dos valores obtidos para a sobre pressão máxima e a intensidade térmica dentro da sala foram de 3 kPa e $200 \text{ s(kWm}^{-2})^{4/3}$, respectivamente, e 6,5 kPa e $20 \text{ s(kWm}^{-2})^{4/3}$ de dentro do compartimento do compressor.

Zhang et al. (2016) estudaram os riscos de inflamabilidade e as consequências geradas por uma possível ignição em um sistema de condicionamento de ar carregado com R-290. A sobre pressão máxima de explosão para ignição na unidade interna foi de cerca de 820 Pa, não causando danos significativos à unidade interna. Enquanto com relação ao

gabinete que abriga o compressor, a pressão máxima de explosão foi de cerca de 2060 Pa, o que não danificou a unidade externa. Além disso, após os testes conduzidos, o sistema conseguiu operar normalmente. Observaram também que de acordo com o volume interno, a quantidade de R-290 que deve ser depositada dentro das unidades interna e externa é de 7 g e 16 g, respectivamente, para formar uma concentração estequiométrica. A sobre pressão de explosão nas unidades interna e externa é suficientemente baixa para não danificar o sistema de ar condicionado. No entanto, se o R-290 for inflamado durante o vazamento, as unidades serão queimadas.

Um novo método de nitrogênio quase-líquido – *Quasi-Liquid Nitrogen Method* (QLNM) – foi proposto para investigar a distribuição e a taxa de vazamento de fluido refrigerante nos condicionadores de ar do tipo split com R-290. Os resultados experimentais da distribuição comprovaram a validação do QLNM e mostraram que uma grande parte do fluido refrigerante é distribuída no condensador, lado de pressão mais elevada do sistema, quando em funcionamento. Enquanto o fluido migra do condensador para o evaporador quando o compressor estiver parado, ou seja, do lado de maior pressão para o de menor. De acordo com os resultados experimentais em uma análise geral de carga de fluido refrigerante no sistema, durante o funcionamento do compressor há entre 50 e 60 % de R-290 no evaporador, porém, com o sistema parado, essa proporção passa para aproximadamente 85 e 90 %. Além disso, a quantidade de R-290 no condensador com o sistema parado é aproximadamente constante e não é afetada pela carga, já que a pressão dentro do sistema varia apenas com a temperatura do ambiente até atingir o equilíbrio. Assim, pode-se especular que, se uma válvula solenoide for instalada próxima ao capilar, a migração de 30 % da carga de fluido será cortada quando o sistema for desligado. Com base nisso, a instalação de uma válvula solenoide próxima ao capilar para evitar esse transporte de fluido do lado de alta pressão para o de baixa foi testado e foi provado que a taxa de vazamento é reduzida com essa aplicação, assim, a segurança do sistema carregado com fluidos refrigerantes inflamáveis também é aprimorada (TANG et al., 2017).

Reduzir a quantidade de carga de R-290 é um método eficaz para melhorar a segurança dos sistemas de refrigeração, já que, assim, o refrigerante não se acumula no evaporador quando o sistema estiver operando com carga insuficiente. Além disso, a taxa de vazamento também é um parâmetro muito importante para avaliar os riscos. Por exemplo, comparando o vazamento de 300 g de R-290 em 4 minutos e o vazamento de 300 g de R-290 em 10 minutos, a concentração de R-290 no ambiente interno será maior para o primeiro caso, já que com um tempo menor de vazamento o fluido refrigerante terá pouco tempo para difundir (TANG et al., 2017).

2.1.3 Redução da carga de fluido refrigerante

A redução de carga de fluido refrigerante de um sistema de refrigeração é sempre um fator importante a ser considerado, visto que, na prática todo equipamento está sujeito a vazamentos. A redução da carga de fluido refrigerante também pode minimizar os impactos ambientais de um sistema de refrigeração. No caso de fluidos inflamáveis a redução se torna ainda mais importante devido ao fato que quanto menos fluido no sistema menor serão as taxas de vazamento e, conseqüentemente, mais seguro será o equipamento. Caso a carga de HC seja de 0,15 kg ou menos, as chances de explosão são insignificantes (HARBY, 2017). Assim, em várias normas – como a ISO 5149 e a IEC 60.335-2-40 em nível internacional e a EN 378 na Europa especificamente – os hidrocarbonetos são carregados sem restrições de até 0,15 kg no caso de sistemas de refrigeração hermeticamente fechados, como os refrigeradores domésticos. E mais recentemente, a norma internacional IEC 60.335-2-89:2019 atualizada aumentou o limite de carga de 150 g para 500 g para HCs como o R-290 e o R-600a. Para carga de fluido refrigerante acima desse valor aplicam-se algumas condições especiais, nas quais a quantidade de carga está relacionada ao volume da sala, ocupantes, ventilação necessária, além da existência ou não de fontes de ignição dentro ou na área ocupada da sala (GUPTA; PENDYALA, 2020).

No estudo em uma bomba de calor água-água, carregada com propano, Corberán; Martínez; González (2008) analisaram quais componentes retêm mais fluido. A maior parte da carga foi encontrada no condensador (50 %) e uma parte considerável no evaporador (15 %). No entanto, o fluido refrigerante dissolvido no óleo lubrificante do compressor foi considerado substancial neste tipo de equipamento (30 %). O fluido refrigerante restante foi encontrado principalmente na linha de líquido. Qualquer carga extra injetada no sistema foi direcionada ao condensador e armazenada na forma líquida. Logo, foi inferido que para alocar mais líquido no condensador, a parte desse componente dedicada ao sub resfriamento deve aumentar. Implicando na redução da área do condensador disponível para a condensação do fluido refrigerante, ocasionando o aumento da temperatura e da pressão. O aumento no sub resfriamento tem um efeito positivo no COP, enquanto o aumento na pressão de condensação é maléfico. Assim, os autores concluíram que existe uma carga de fluido ideal ao se analisar o desempenho do sistema.

Muitos pesquisadores testaram novas tecnologias nos trocadores de calor para reduzir a carga de fluido refrigerante. Trocadores de calor de ar de mini canal foram desenvolvidos e instalados em um sistema de refrigeração para R-290 com capacidade de refrigeração de 2 kW usando menos de 0,13 kg de fluido (ACRC, 2004). O autor Palm (2007) analisou o sistema e seus respectivos componentes no intuito de encontrar as melhores maneiras de reduzir a carga de fluido refrigerante e sugeriu que trocadores de

calor mais compactos, de mini ou micro canais, fossem utilizados, já que a maior quantidade de fluido se encontra nesses componentes.

Devido à inflamabilidade dos hidrocarbonetos como o R-290, um dos desafios mais importantes torna-se a minimização da carga de fluido refrigerante, no intuito de atingir as proporções mais altas possíveis de capacidade específica de refrigeração (kW por kg de carga de fluido refrigerante). Algumas medidas podem ser tomadas nesse sentido, como a utilização de trocadores de calor mais compactos, trocadores a placa ou de micro canais, redução do volume da tubulação e dos componentes auxiliares, especialmente no caso do transporte de líquido, já que nesse estado o fluido refrigerante possui maior massa específica. Além da eliminação do tanque de líquido na saída do condensador sempre que possível (MARTÍNEZ-GALVÁN et al., 2011).

Padalkar; Mali; Devotta (2014) avaliaram o uso do R-290 em um condicionador de ar do tipo split, com capacidade de refrigeração nominal de até 5,1 kW, como uma alternativa ao R-22. Ao realizar o *drop-in* do R-22, os resultados simulados para o R-290 mostraram menor capacidade de resfriamento e maior eficiência energética (EER) em comparação ao R-22. Os autores sugeriram que o sistema deve ser reprojeto e otimizado para a carga inferior de R-290 para que a unidade funcione com alta eficiência e de forma segura. O condensador com tubulação de menor tamanho proporcionou melhoria de desempenho em termos de EER e capacidade. Para minimizar a carga e obter uma melhor capacidade de resfriamento, foi concluído que o sistema carregado com R-290 requer um condensador de canal menor e um compressor mais eficiente em termos de energia. O trabalho também apresentou resultados experimentais do teste de *drop-in* com o R-290, onde a carga foi reduzida em cerca de 50 %, nos quais a capacidade de resfriamento foi menor em 6 % e o EER foi maior em 14 % quando comparado com o R-22.

Um novo condensador de microcanal com carga reduzida foi proposto e investigado experimentalmente por Xu et al. (2016) em um sistema doméstico de condicionamento de ar. Os resultados mostram que, em comparação com o condensador de microcanal convencional, a capacidade de resfriamento do novo sistema aumentou 1,6 % e a carga de fluido refrigerante do sistema diminuiu 28,3 %. Nesse sentido, a carga ideal para o R-290 foi reduzida para 190 g, que atendem aos requisitos de segurança do Padrão Nacional da China GB 4706.32-2012. Além disso, a redução do diâmetro interno auxiliou simultaneamente na redução de carga de fluido refrigerante sem alterar a eficiência do sistema.

Em estudo experimental realizado em um condicionador de ar do tipo split carregado com R-290, Ruan et al. (2018) propuseram a utilização de um condensador de filme descendente – *falling film* – no intuito de reduzir a carga de fluido refrigerante e, assim,

umentar a segurança do sistema. Os resultados mostraram que a carga necessária de refrigerante foi reduzida em 23,6 % para apenas 290 g. Além disso, comparado aos valores obtidos no sistema original, carregado com R-22, a capacidade de resfriamento e o COP do novo sistema foram cerca de 2 % e 9 % superiores, respectivamente. O condicionador de ar, com R-290 desenvolvido no trabalho atendeu aos requisitos de eficiência energética e segurança da norma IEC60335-2-40. Assim, os autores concluíram que o uso desse tipo de condensador reduz significativamente a carga de refrigerante, possibilitando o uso seguro do fluido refrigerante inflamável, R-290.

Na tentativa de introduzir trocadores de calor de micro tubo como condensador e evaporador em sistema de condicionamento de ar visando a redução de carga de R-290. Zhou e Gan (2019) descobriram que a carga ideal de propano para o sistema projetado foi de 248 ± 5 g, seguindo o regulamento EN378-1: 2016. No entanto, o uso dos trocadores de calor de micro tubo apresentou alguns problemas, como a distribuição desigual de líquido e gás no evaporador e condensador, e a necessidade de se aprimorar o desempenho e a eficiência do ventilador.

A partir dessas medidas de segurança e redução de carga, alguns fluidos refrigerantes inflamáveis foram utilizados em aplicações de refrigeradores domésticos (JUNG et al., 2000; JWO; TING; WANG, 2009). Além disso, o R-290 foi utilizado em sistemas de ar condicionado (AC) doméstico e comercial, bombas de calor (CASTRO et al., 2005), e sua aplicação foi avaliada até para congeladores de grande capacidade (HE et al., 2014).

2.1.4 Substituição do R-22 com R-290

Diversos fluidos refrigerantes alternativos já foram testados como substitutos do R-22 e as propriedades termodinâmicas de cada influenciam significativamente no desempenho do sistema. Logo, serão apresentados alguns fluidos que já foram analisados como alternativas para o R-22, evidenciando as melhores propriedades do R-290 como substituto. Na sequência, será realizada uma comparação entre o R-290 e o R-22 utilizando os diagramas de pressão-entalpia, e por fim uma revisão a respeito dos testes de *drop-in* com o R-290. Essa revisão permitirá entender melhor os impactos no desempenho dos sistemas de refrigeração operando com R-290 sem realizar alterações no equipamento.

O método TEWI (*Total Equivalent Warming Impact*) considera os impactos diretos e indiretos dos fluidos refrigerantes no aquecimento global. Em uma análise desse parâmetro para distintos fluidos refrigerantes substitutos do R-22 em sistemas de compressão de vapor convencionais, Sarbu (2014) observou que o efeito direto do TEWI foi de 33 a 60 % do valor total para a maioria dos fluidos analisados, sendo que os valores mínimos, cerca de apenas

2 % do total, foram encontrados para os hidrocarbonetos, R-290 e R-600, e para o fluido refrigerante HFC R-152a. Na Tab. 2.1 são apresentadas as principais propriedades termodinâmicas do R-22 e dos possíveis substitutos encontrados na literatura. Já a Tab. 2.2, baseada nos dados obtidos por Pavkovic (2013), apresenta os parâmetros de desempenho de um sistema de refrigeração operando com diferentes fluidos refrigerantes às temperaturas de evaporação e de condensação de -15 °C e 30 °C, respectivamente.

Tabela 2.1 – Propriedades termodinâmicas dos fluidos refrigerantes (LEMMON; HULER; MCLINDEN, 2010)

Fluido refrigerante	M _{molar} [g/mol]	T _{crítica} [°C]	p _{crítica} [bar]	T _{ebulição} [°C]
R-22	86,5	96,15	49,9	-40,81
R-407C	86,2	86,03	46,3	-43,63
R-410A	72,6	71,35	49,0	-51,45
R-417A	106,8	87,14	40,4	-39,07
R-422A	113,6	71,73	37,5	-46,50
R-32	52,0	78,11	57,8	-51,65
R-717	17,0	132,25	113,3	-33,33
R-744	44,0	30,98	73,8	-78,46
R-1270	42,1	91,06	45,6	-47,62
R-290	44,1	96,74	42,5	-42,11
R-600a	58,1	134,66	36,3	-11,75

Tabela 2.2 – Parâmetros de desempenho dos fluidos refrigerantes com condição de -15 °C e 30 °C de temperatura de condensação e evaporação, respectivamente (PAVKOVIC, 2013)

Fluido refrigerante	p _{evap} [bar]	p _{cond} [bar]	p _{cond} /p _{evap}	Cap _{-refr} [kJ/m ³]	COP	T _{descarga} [°C]	Código de segurança
R-22	2,962	11,919	4,024	2096,9	4,66	52,95	A1
R-407C	2,632	13,591	5,164	1802,9	3,91	51,43	A1
R-410A	4800	18,893	3,936	3093,0	4,38	51,23	A1
R-32	4,881	19,275	3,949	3420,0	4,52	68,54	A2L
R-717	2,362	11,672	4,942	2167,6	4,76	99,08	B2L
R-744	22,9	72,1	3,149	7979	2,96	69,5	A1
R-1270	3,630	13,050	3,595	2231,1	4,55	41,85	A3
R-290	2,916	10,790	3,700	1814,5	4,55	36,60	A3
R-600a	0,891	4,047	4,545	663,8	4,71	32,66	A3

Observando ambas as tabelas, é possível inferir que o R-290 é um dos fluidos refrigerantes com temperaturas ebulição e pontos críticos mais semelhantes ao R-22. Além dos parâmetros de desempenho: COP, capacidade de refrigeração e pressões de operação serem muito próximas, sendo o único obstáculo a inflamabilidade. Além disso, a menor massa específica do R-290 possibilita a aplicação desse fluido refrigerante com cargas menores se comparado à utilização do R-22.

As Fig. 2.3 (a) e (b) apresentam os diagramas pressão-entalpia dos fluidos R-22 e R-290, respectivamente. Os diagramas são apropriados para apresentar a relação entre as propriedades termodinâmicas de ambos os fluidos refrigerantes, possibilitando a visualização dos processos que ocorrem no ciclo termodinâmico de cada um.

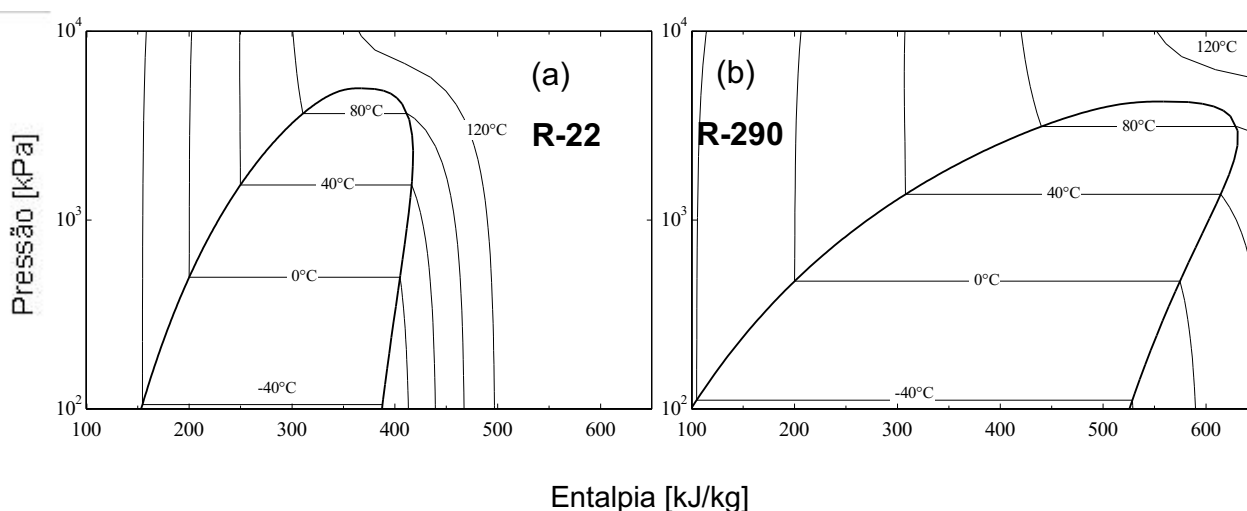


Figura 2.3 – Diagrama pressão-entalpia do R-22 (a) e do R-290 (b)

A partir dos diagramas é possível observar que o R-22 e o R-290 atuam em faixas de pressão e temperatura muito semelhantes. Além disso, é possível observar que as entalpias de vaporização – diferença entre a entalpia do líquido e o vapor saturado – do R-290 é substancialmente maior em relação à do R-22. Isto significa que para uma mesma temperatura de evaporação o R-290 absorve mais calor por unidade de massa do que o HCFC. Por exemplo, para uma temperatura de evaporação de 0 °C, na transformação de líquido saturado para vapor saturado, o R-290 absorve aproximadamente 400 kJ/kg, enquanto que o R-22 absorve aproximadamente 200 kJ/kg. Nesse sentido, ao comparar um sistema de refrigeração operando com a mesma quantidade de R-22 e R-290, o sistema com o hidrocarboneto absorverá mais calor nesse processo. Sendo uma das justificativas para o fato de ser necessário menos carga de fluido refrigerante. Outro estudo analítico comparando o desempenho de ambos fluidos em um ciclo de compressão de vapor com

temperatura de evaporação variando entre $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e temperatura de condensação fixa em $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, relatou que seus pontos de ebulição normal (a 1 atm) são bem próximos, o que indica curvas de pressões e aplicabilidades parecidas. Além disso, no ponto de ebulição normal o R-290 apresentou calor latente de evaporação 80 % maior comparado ao R-22. A menor densidade de líquidos do hidrocarboneto reflete em menor carga no sistema, resultando em menor atrito e melhores coeficientes de transferência de calor no evaporador e no condensador. O R-290 possui menor viscosidade e maior condutividade térmica, o que melhora o desempenho dos trocadores de calor. O calor específico mais alto do R-290 fornece uma temperatura de descarga mais baixa, o que melhora a vida útil do compressor, a estabilidade do fluido refrigerante e do lubrificante. Outra vantagem da aplicação do R-290 é que ele possibilita uma menor variação de pressão, o que é favorável para as eficiências isentrópicas e volumétricas do sistema. O COP com o R-290 se aproximou do R-22, podendo-se esperar um COP mais alto se o sistema de refrigeração for especialmente projetado de acordo com as propriedades do HC (CHOUDHARI; SAPALI, 2017).

A seguir, os estudos referentes à substituição direta do R-22 por R-290 serão apresentados, assim como os principais resultados e conclusões, para que se amplie o entendimento das situações em que é possível realizar o *drop-in* com o hidrocarboneto e quais as vantagens e desvantagens desta substituição. Devotta; Padalkar; Sane (2005) realizaram experimentos a respeito do desempenho do R-290 em um condicionador de ar do tipo janela, que operava com R-22. Foi observada uma redução na capacidade frigorífica em baixas e altas condições de operação, com decrementos entre 6,6 % a 9,7 %, respectivamente. No entanto, o COP do sistema incrementou para ambas as condições quando comparado com o sistema original, apresentando incrementos de 7,9 % para menor temperatura ambiente e 2,8 % para a condição ambiente mais crítica. Essa queda na performance em condição mais extrema foi devido à diminuição das taxas de transferência de calor no condensador. Além disso, também houveram reduções na faixa de 12,4 – 13,5 % na energia consumida pelo compressor e de 13,7 – 18,2 % na temperatura de descarga para a unidade carregada com R-290.

Ao estudar as propriedades termodinâmicas e a performance dos fluidos refrigerantes HC, R-1270 e R-290, em comparação ao R-22, Park e Jung (2007) observaram redução na capacidade de resfriamento do R-290 de 11,5 % comparado ao HCFC puro em um sistema de condicionamento de ar residencial. Porém, como vantagem, foi encontrado um incremento de 1,9 % no COP. Além disso, foram reportadas reduções na temperatura de descarga do compressor e na quantidade de carga do sistema, de $17,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 55,6 %, respectivamente. Os autores indicaram o R-290 como uma alternativa de longo prazo para aplicações em sistemas de ar condicionado residências e bombas de calor. Os mesmos

HCs foram submetidos a testes de *drop-in* em um sistema de refrigeração projetado para R-22 em estudo realizado por Antunes; Silva; Bandarra (2015). Foi observado excelente aplicabilidade na faixa de temperatura de evaporação entre -5 e -15 °C, excedendo os valores de COP obtidos com o sistema original. A partir dos resultados foi realizada uma análise do TEWI para o R-22, R-1270 e R-290. Dentre os resultados apresentados foi possível notar que o R-22 tem maior impacto ao aquecimento global comparado aos hidrocarbonetos em qualquer condição de capacidade de resfriamento, e em qualquer uma das três regiões do mundo em que foi considerada a matriz de energia (Brasil, Estados Unidos e União Europeia). Sendo que para a condição fixa de capacidade de resfriamento em 9 kW o TEWI do R-290 para as matrizes do Brasil, EUA e UE foram aproximadamente 50 %, 70 % e 75 % inferiores às do sistema com o R-22.

Em um estudo experimental realizado em um condicionador de ar do tipo *split*, no intuito de comparar o desempenho do R-22 e do R-290, além de avaliar a influência da variação no diâmetro dos tubos capilares adiabáticos dispostos em espiral, Zhou e Zhang (2010) observaram que os tubos de diferentes diâmetros internos e distintos diâmetros da bobina mostraram capacidade de resfriamento, consumo de energia e eficiência energética (EER) semelhantes. Devido à menor densidade do R-290, a taxa de fluxo de massa e a carga de refrigerante foram de apenas 44 % e 47 % comparadas ao R-22. Com relação ao desempenho do sistema, ao carregar o equipamento com o fluido refrigerante hidrocarboneto a capacidade de resfriamento foi aproximadamente 5 % menor e o consumo de energia 12 % inferior em relação ao HCFC. Finalmente, o EER do R-290 foi cerca de 8 % maior que o do R-22.

Em outro condicionador de ar, Teng et al. (2012) relataram que o COP da unidade com R-290, com 50 % da carga de fluido original, foi maior que o do sistema com R-22. Assim, os resultados mostraram que a melhor faixa de carga de R-290 para substituir o sistema original sem alterações de componentes, foi entre 50 e 55 %. Além disso, o EER do condicionador de ar com R-290 apresentou tendência ascendente à medida que a temperatura do ar externo aumentou, melhorando o EER em aproximadamente 20 % na situação ideal.

Antunes et al. (2014) realizaram testes em um sistema de refrigeração projetado para operar com o fluido refrigerante R-22, no intuito de avaliar o desempenho de outros três fluidos R-290, R-32 e R-410A como substitutos diretos. Utilizando o mesmo óleo mineral para os experimentos realizados com R-22 e R-290, foi preciso apenas de 47 % da carga do sistema base para a operação com R-290, o que equivaleu a 1,5 kg de fluido refrigerante. O uso do hidrocarboneto resultou nos maiores resultados de capacidade de refrigeração. Além disso, a análise do comportamento de todos os sistemas com a mesma capacidade de

refrigeração provou que o sistema com R-290 tem o maior COP para toda a faixa de evaporação explorada na pesquisa. No mesmo ano, Padalkar; Mali; Devotta (2014) analisaram o uso do R-290 em um condicionador de ar do tipo split, com capacidade de refrigeração nominal de 5,1 kW, como uma alternativa segura e eficiente em termos de energia ao R-22. Sob condições de *drop-in*, os resultados simulados para o R-290 mostraram menor capacidade de resfriamento e maior EER em comparação ao R-22. Ademais, sugeriram que o sistema deve ser reprojetoado e otimizado para a carga inferior de R-290 para que a unidade funcione com eficiência e segurança. O condensador com tubulação de menor tamanho proporcionou melhoria de desempenho em termos de EER e capacidade. Para minimizar a carga e obter uma melhor capacidade de resfriamento, foi concluído que o sistema carregado com R-290 requer um condensador de canal menor e um compressor com maior deslocamento volumétrico. O trabalho também apresentou resultados experimentais, nos quais a capacidade de resfriamento foi menor em 6 % e o EER foi maior em 14 % em comparação ao R-22, no teste de *drop-in* com o R-290, onde a carga foi reduzida em cerca de 50 %.

Chen et al. (2018) estudaram o desempenho dos fluidos refrigerantes, R-427A, R-161 e R-290 em operação de *drop-in* em uma bomba de calor de R-22. A capacidade de aquecimento e o COP do R-290 foram 38 % e 19 % mais elevados, respectivamente, quando comparados ao R-22. Sendo o R-290 o que apresentou o melhor desempenho dentre os fluidos alternativos. A temperatura de descarga foi 30 °C inferior ao valor apresentado pelo R-22. O propano foi considerado pelos autores como o melhor substituto do R-22 para condições de alta relação de pressão. Com base no modelo LCCP (*Life Cycle Climate Performance*), utilizado para calcular as emissões climáticas envolvendo toda a cadeia de produção e operação de qualquer que seja o sistema de refrigeração, 11 % da emissão de CO₂ equivalente pode ser reduzida usando o R-161 e o R-290. Além disso, a carga do sistema com R-290 foi a menor (1,8 kg), representando uma diminuição de 55 % em relação à linha de base do R-22 (4 kg), o que auxilia significativamente na redução das emissões diretas.

Também foram realizados experimentos em um resfriador de água operando com R-290, para isso foi utilizado um compressor hermético projetado para R-22. Os resultados de temperatura de descarga do compressor apresentaram valores bem baixos, entre 53 °C e 69 °C variando com a temperatura de condensação (de 38 °C a 48 °C), o que confirmou a compatibilidade do R-290 com o óleo mineral utilizado como lubrificante. Os valores inferiores de temperatura foram relacionados com o maior calor específico do fluido refrigerante R-290, assim como já era esperado através da análise teórica. No geral, foi concluído que o R-290 tem um forte potencial de aplicabilidade em refrigeradores de água,

além de proporcionar elevada eficiência energética e ser um substituto do R-22 que agride menos o meio ambiente (CHOUDHARI; SAPALI, 2020).

A Tab. 2.3 apresenta um resumo dos resultados referentes ao desempenho do R-290 em comparação ao R-22 nos testes de *drop-in* encontrados na literatura. São apresentados como parâmetros de comparação os valores de incrementos do COP e da capacidade de refrigeração ou de aquecimento, além da redução do consumo de energia, da temperatura de descarga do compressor e da carga de fluido refrigerante.

Tabela 2.3 – Desempenho do R-290 em comparação ao R-22 em testes de *drop-in* encontrados na literatura

Autor	Aparelho	COP [%]	Cap.resf/aaq [%]	Cons.energia [%]	T_{descarga} [%]	Carga [%]
(DEVOTTA; PADALKAR; SANE, 2005)	Ar cond.	2,8–7,9	(-)6,6–8,7	12,4–13,5	13,7–18,2	-
(PARK et al., 2007)	Ar cond.	1,9	(-)11,5	-	21,5	55,6
(ZHOU; ZHANG, 2010)	Ar cond.	8	(-)5	12	-	53
(TENG et al., 2012)	Ar cond.	10	(-)2	12	-	45
(ANTUNES et al., 2014)	Sist. ref.	-	-	-	-	53
(PADALKAR; MALI; DEVOTTA, 2014)	Ar cond.	14	(-) 6	-	-	50
(CHOUDHARI; SAPALI, 2017)	Sist. ref. (analítico)	(-)0,3	-	-	16	-
(CHEN et al., 2018)	Bomba de calor	19	38	-	20–30	55

2.2 Perdas em sistemas de refrigeração intermitentes

Quatro tipos de perdas foram observadas por Björk e Palm (2006) durante a análise experimental de um ciclo liga e desliga de um sistema de refrigeração intermitente convencional. (1) O fluido refrigerante líquido retirado do evaporador durante a inicialização, (2) o vapor de fluido refrigerante bombeado através do tubo capilar na partida, (3) trocadores

de calor com carga inadequada durante todo o período ligado, causando elevações de temperatura e (4) o fluxo de vapor entrando no evaporador através do tubo capilar durante o período no qual compressor está desligado. As principais perdas relacionadas ao número de ciclos “liga/desliga” em um sistema de refrigeração intermitente devem-se aos deslocamentos do fluido refrigerante devido as partidas e paradas do compressor, representando cerca de 5 a 30 % das perdas de eficiência (AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2008).

Khan e Afroz (2015) também observaram algumas perdas de energia devido ao deslocamento do fluido refrigerante após os processos de “liga/desliga” do compressor. Além disso, notaram que durante o ciclo ligado, a carga térmica dos trocadores de calor é relativamente maior do que em um sistema normal constantemente controlado. Assim, devido ao aumento da diferença de temperatura entre o compartimento (seja ele um gabinete ou um tanque de líquido) e o fluido refrigerante, reduz-se a eficiência térmica. De maneira que essas perdas podem significar entre 5 e 37 % de diminuição na eficiência desses sistemas de refrigeração (COULTER; BULLARD, 1997; JAKOBSEN, 1995; JANSSEN; WIT; KUIJPERS, 1992).

Anteriormente à partida do compressor, a maior parte do fluido refrigerante fica acumulada no evaporador e no compressor. No início do funcionamento, o evaporador está em uma temperatura positiva, aproximadamente na temperatura do gabinete (no caso dos refrigeradores). O fluxo de massa retirado do evaporador é alto e o vapor de fluido refrigerante entra no tubo capilar resultando em uma drenagem do evaporador e acúmulo de fluido no condensador. Quando finalmente começa a entrar fluido refrigerante líquido no capilar, o fluxo de massa na entrada do evaporador aumenta e o evaporador começa a encher de líquido. Esse período que o equipamento leva, com cargas não ótimas nos trocadores de calor, até ter um funcionamento padrão de um sistema de compressão de vapor acarreta em perdas na eficiência e na capacidade de refrigeração (AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2008).

Uma alternativa para reduzir essas perdas está no armazenamento de energia térmica na forma de calor latente. Este armazenamento pode ser obtido através de um material de mudança de fase (PCM), que é uma substância com alto calor de fusão, capaz de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica. Assim, os PCMs são classificados como unidades de armazenamento de calor latente (KHAN e AFROZ, 2015).

Um exemplo comum são os bancos de gelo, os quais foram estudados experimentalmente por Mađerić; Pavković; Lenić (2019), os autores obtiveram redução no consumo de energia e diminuição significativa das partidas do sistema de refrigeração. No entanto, constataram que o gelo da água, como mau condutor de calor, ao formar uma

camada em torno do tubo do evaporador aumenta continuamente a resistência térmica e causa uma instabilidade em todo o sistema. Ademais, o aumento da espessura do gelo causa redução do fluxo de calor absorvente do evaporador. Os autores observaram que parâmetros importantes do sistema de refrigeração como pressão e temperatura de evaporação e condensação, fluxo de massa do compressor e do dispositivo de expansão são alterados durante o período até a primeira parada do compressor, no qual o banco de gelo está sendo formado. Esse tempo é denominado *Pull Down Time* – PDT. Definido como sendo a duração necessária para alterar a temperatura do ar da câmara do evaporador, da temperatura ambiente para a temperatura final desejada. O aumento desse tempo implica em uma capacidade de refrigeração inadequada (OYEDEPO et al., 2016).

Esse conceito pode ser ampliado para outros sistemas de refrigeração que atuam de modo intermitente, com o compressor trabalhando em ciclos de “liga/desliga”, como por exemplo nos resfriadores de líquido. De modo que o PDT seria o tempo requisitado para que a temperatura do líquido, no instante em que o equipamento é ligado, atinja a temperatura desejada. Ou seja, é o tempo reportado a partir da partida do compressor até que ele desligue, estando diretamente relacionado com a capacidade de refrigeração, o consumo de energia e a eficiência energética do ciclo de refrigeração (VISEK; ELBEL; HRNJAK, 2016).

Ao analisarem refrigeradores de bebidas, Elbel e Hrnjak (2016) constataram que a capacidade de resfriamento é verificada pelo tempo necessário para resfriar uma carga completa de latas quentes até o ponto de ajuste desejado. De forma que, ao final do PDT os produtos permaneçam dentro de certas faixas de temperatura máxima, média e mínima. Os resultados dos refrigeradores operando com R-134a, R-290 e um sistema modificado para atuar com R-744 transcrito foram comparados. Sendo que o R-290 foi o único fluido refrigerante natural que possibilitou redução tanto no consumo de energia (9 %) quanto no PDT (3 %) comparado ao HFC base. Em outro trabalho, o desempenho do refrigerador de bebidas convertido para operar com carga reduzida de R-290 (50 g) foi validado experimentalmente por Fuentes; Elbel; Hrnjak (2014) a uma temperatura ambiente próxima de 32 °C. De modo que, todos os requisitos de teste de PDT e consumo de energia dos fabricantes foram alcançados com sucesso, sendo que o PDT teve uma hora e meia a menos de duração do que o limite requerido. A redução de carga foi possibilitada pela seleção de um condensador de microcanais, devido ao seu pequeno volume, e pela redução da quantidade de óleo no compressor.

Com relação a um resfriador de líquido, Visek; Elbel; Hrnjak (2016) avaliaram experimentalmente a conversão de um sistema de R-134a para R-744, substituindo um fluido HFC por outro natural. Os autores mediram o PDT durante a operação de ciclagem do

compressor na temperatura ambiente de 24 °C. Como resultado da maior capacidade de resfriamento, o resfriador modificado operando com o fluido natural obteve quase metade do PDT do sistema original. Outro critério avaliado foi a capacidade do distribuidor de líquido, determinado pelo número de bebidas que podem ser dispensadas com temperatura inferior a 5 °C com temperatura da água de entrada igual a 24 °C, considerando a taxa usual de distribuição de bebidas equivalente a 3 copos com volume de 355 ml por minuto. Logo, foi observado que o sistema com R-744 distribuiu pelo menos 25 % mais bebidas, mantendo o consumo de energia comparável ao seu sistema base com R-134a.

2.3 Materiais utilizados para aprimorar transferência de calor

Os sistemas de refrigeração por compressão de vapor são responsáveis por aproximadamente 30 % do consumo de energia mundial (BUZELIN et al., 2005). O aprimoramento da eficiência desses sistemas desempenha um papel crucial na redução da taxa de consumo de eletricidade, que dependem principalmente da eficiência do compressor, assim como seus ciclos de funcionamento, carga térmica, temperatura ambiente e fluido refrigerante em operação. Desta forma, alguns fatores podem auxiliar na melhoria do desempenho e economia de energia, como a utilização de compressores mais eficientes, otimização dos sistemas de controle (termopares, pressostatos), aprimoramento do isolamento térmico do equipamento ou incremento do processo de transferência de calor no condensador ou evaporador (BISTA et al., 2018).

Com relação a este último fator, uma boa opção para reduzir o consumo de energia elétrica está no armazenamento de energia térmica. Ela pode ser realizada com o armazenamento de calor sensível, que precisa de materiais com alto calor específico e condutividade térmica ou através do armazenamento de calor latente por mudança de fase de um material de um estado para outro (BAKHSHIPOUR; VALIPOR; PAHAMLI, 2017).

2.3.1 PCM (material de mudança de fase)

O armazenamento de calor latente é uma das maneiras mais eficientes de armazenar energia térmica. Ele fornece uma densidade de armazenamento maior comparado ao armazenamento sensível de calor, com uma diferença de temperatura menor entre o armazenamento e a liberação de calor (FARID et al., 2004). Devido à alta densidade de armazenamento de energia do PCM e ao processo isotérmico do armazenamento de energia, a entalpia de fusão do PCM pode ser empregada em diferentes aplicações térmicas (ORÓ et al., 2012). Logo, em um sistema de armazenamento de energia térmica o PCM

absorve ou libera grandes quantidades de energia a uma certa temperatura durante o período de transição de mudança de fase, com um alto calor de fusão em torno de sua faixa de temperatura de mudança de fase (CABEZA et al., 2002), assim como está representado na Fig. 2.4.

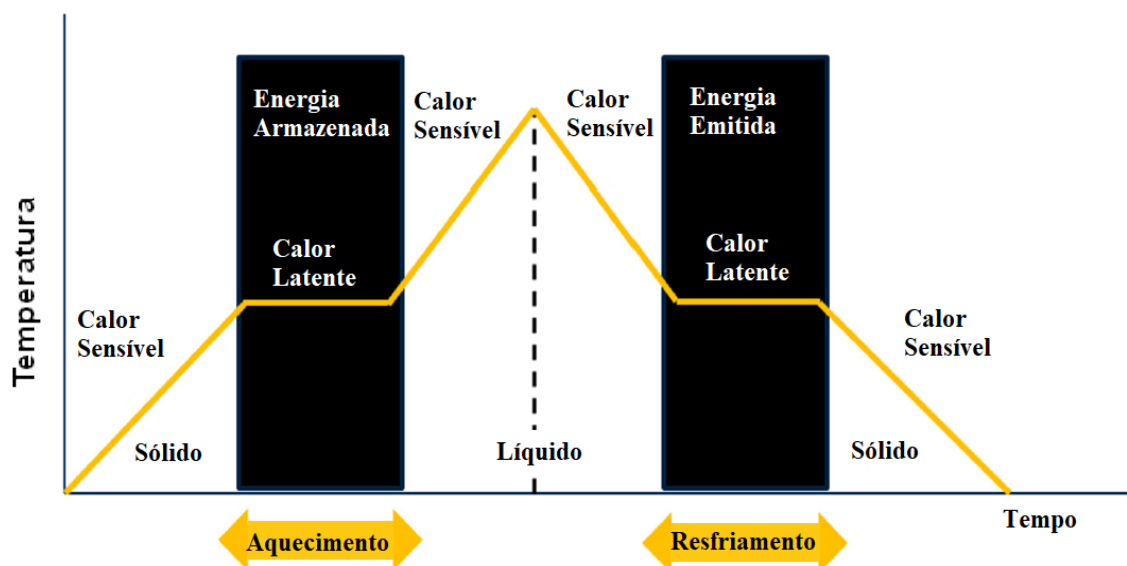


Figura 2.4 – Diagrama esquemático da transição das mudanças de fase de um PCM (DU et al., 2018)

Atualmente, o uso do PCM é visto como uma das promissoras técnicas de energia sustentável de armazenamento de energia térmica e pode ser usada em diversos tipos de sistemas de refrigeração. De maneira que, a redução da flutuação de temperatura e a melhoria do desempenho do sistema são os principais objetivos do uso de PCMs em sistemas de refrigeração (BISTA et al., 2018). Podem ser aplicados em várias configurações de um equipamento de refrigeração no intuito de incrementar o COP do sistema, seja aumentando a temperatura de evaporação, diminuindo a temperatura de condensação ou reduzindo a operação intermitente do compressor (KORTH et al., 2020).

O aumento da espessura do material resulta no aumento da capacidade de armazenamento de energia e na diminuição da razão de tempo “liga/desliga” do compressor em sistemas de refrigeração intermitentes. Logo, uma quantidade maior de calor é liberada quando o PCM se solidifica, aumentando a autonomia do sistema (CERRI et al., 2003). No entanto, em casos de materiais muito espessos, nem todo o material passará pelo processo de mudança de fase (AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2009). A espessura do PCM deve ser considerada com base na carga térmica, uma vez que, a aplicação de um material mais espesso implica em custos mais elevados e requer inicialmente um trabalho maior do compressor para solidificar o PCM (JOYBARI et al., 2015).

A temperatura de mudança de fase (PCT) do material desempenha um papel importante, pois o ponto de fusão do PCM selecionado deve estar na faixa da temperatura do termostato. No caso de PCMs com alto PCT, a tendência é que o compressor fique mais tempo desligado, gerando menor consumo de energia e incrementando o COP do sistema (CERRI et al., 2003). Portanto, os PCMs devem ser selecionados com base em sua temperatura de fusão. A taxa de solidificação do PCM pode ser reduzida significativamente com a adição de uma combinação de nanopartículas de metal no intuito de aprimorar a transferência de calor (MAHDI; NSOFOR, 2017). Estruturas de alumínio embutidas podem fornecer um aumento na condução de calor através do volume de armazenamento (LAZZARIN et al., 2018). Assim como a implementação de estruturas de grafite ou pó de grafite ao PCM em variadas concentrações pode alterar as propriedades de armazenamento (ALMAADEED et al., 2015; GUO; MA; YANG, 2015; ZHANG e FANG, 2006).

As propriedades mais importantes dos materiais de armazenamento de energia em sistemas de refrigeração são o calor latente e a condutividade térmica (FARID et al., 2004). Em alguns casos de proteção ou isolamento térmico, valores reduzidos de condutividade podem ser requeridos, no entanto nos sistemas de armazenamento esses valores baixos podem ser grandes empecilhos, pois apesar de haver energia suficiente armazenada, o material não possui a capacidade necessária para dispor dessa energia com rapidez (REGIN; SOLANKI; SAINI, 2008).

A escolha do PCM depende muito da carga térmica esperada no sistema de refrigeração (AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2008). Condições de alta carga térmica fazem com que o tempo de derretimento seja mais rápido e o tempo de congelamento mais prolongado, já que nessas situações o compressor deve superar o carregamento do PCM e a carga térmica extra (MARQUES et al., 2014). Nas aplicações de PCM em sistemas de refrigeração a temperatura ambiente tem efeitos significativos no desempenho do material (JOYBARI et al., 2015). Outra característica que pode ter influência no desempenho de um sistema de resfriamento de líquido em que um PCM é aplicado é a vazão desse líquido. O aumento da vazão incrementa a taxa de fusão e solidificação do material (LIN et al., 2018).

A aplicação do PCM no evaporador minimiza a flutuação da temperatura do compartimento e fornece condições estáveis mesmo em situações de carga térmica variável (BISTA et al., 2018). Resultados experimentais mostram que as flutuações de temperatura no compartimento de alimentos frescos de refrigeradores domésticos durante o ciclo de resfriamento podem diminuir de 4 °C para 0,5 °C com a aplicação de PCM tanto no evaporador quanto no condensador (SONNENREIN et al., 2015).

Nos refrigeradores domésticos, assim como em resfriadores de líquido, o compressor funciona no modo intermitente. O período de trabalho do compressor deve ser prolongado

por mais tempo no intuito de carregar o armazenamento de energia no sistema de refrigeração com PCM. No entanto, o tempo de execução geral reduz devido ao maior tempo de desligamento do compressor. Assim, há um decréscimo no consumo geral de eletricidade, além de ser atenuado o impacto destrutivo da partida e parada frequente do compressor, refletindo, até mesmo, na qualidade dos alimentos, visto que haverá menor variação de temperatura (BISTA et al., 2018).

Em uma análise teórica e experimental de desempenho de um refrigerador doméstico foi realizado a aplicação de etileno glicol como PCM, aplicado em um evaporador desenvolvido para o sistema com material de mudança de fase, além da substituição do fluido refrigerante, passando do HFC R-134a para o hidrocarboneto R-290, com redução de até 40 % de carga no mesmo sistema de refrigeração com as mesmas condições de operação. O consumo de energia do compressor reduziu em 3 % com o R-290 a 28 °C na condensação. Com relação ao efeito do PCM, sem a adição de carga térmica e sem que o compressor ligasse, o material de mudança de fase manteve a temperatura da cabine abaixo de 10 °C por 8 horas e abaixo de 15 °C por 14 horas. Ademais, o PCM forneceu temperatura uniforme para a cabine durante todo o ciclo e o tempo médio de funcionamento do compressor por ciclo foi reduzido na faixa de 17–20 % em comparação com o sistema sem o auxílio do PCM (NIYAJ; SAPALI, 2017).

Em um dos últimos estudos encontrados a respeito da aplicação de PCM em um sistema de RAC, Korth et al. (2020) analisaram experimentalmente a adição de pó de grafite a um PCM composto por parafina aplicado em um sistema de condicionamento de ar, no intuito de sub resfriar o fluido refrigerante na saída do condensador, resultando em incremento na capacidade de refrigeração ou redução no consumo de energia do compressor. A temperatura de mudança de fase de do material adicionado ao condensador foi de 18 °C, de forma que foi observado acréscimo de 18 % na capacidade de refrigeração para a condição de 35 °C de temperatura de condensação. Além disso, a análise do coeficiente universal de transferência de calor do PCM possibilitou inferir que a adição de um quinto, em massa, de pó de grafite resultou em uma condutividade térmica 10 vezes superior comparado ao PCM puro. Para finalizar a revisão bibliográfica a respeito dos PCMs, a Tab. 2.4 sintetiza, a partir dos dados encontrados na literatura, os resultados comparativos nos sistemas de refrigeração atuando com e sem PCM. São apresentados como parâmetros de comparação os valores do COP, capacidade de refrigeração, redução do consumo de energia, redução do tempo de funcionamento do compressor, assim como os componentes do sistema nos quais foi aplicado o material de mudança de fase e o tipo do PCM utilizado, ou seja, a composição do material.

Tabela 2.4 – Desempenho dos sistemas de refrigeração com aplicação de PCM encontrados na literatura

Autor	Componente	COP [%]	Cap_{·resf} [%]	Cons_{·energia} [%]	t_{compressor} [%]	Tipo do PCM
(CERRI et al., 2003)	Evaporador (analítico)	3–18	-	-	-	E
(AZZOUZ et al., 2005)	Evaporador (analítico)	74	87	-	-	E
(WANG et al., 2007)	Evaporador (analítico)	6–8	-	-	-	E
(AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2008)	Evaporador (analítico)	5–15	-	-	25	Ág e E
(AZZOUZ; LEDUCQ; GOBIN, 2009)	Evaporador (experimental)	10–30	-	-	-	E
(GIN; FARID, 2010)	Evaporador (experimental)	-	-	7–8	-	E
(TULAPURKAR et al., 2010)	Evaporador (analítico)	18	2	10	8	E
(CHENG et al., 2011)	Condensador (experimental)	-	-	12	-	P
(CHENG; YUAN, 2013)	Condensador (analítico)	19	-	12	-	E
(RAHMAN et al., 2013)	Evaporador (experimental)	54–78	-	-	-	Ag
(YUAN; CHENG, 2014)	Condensador (analítico)	-	-	20–26	-	E
(VISEK et al., 2014)	Evaporador (experimental)	-	5,9	5,6	-	Ág
(KHAN; AFROZ, 2015)	Evaporador (experimental)	-	-	-	5–30	Ág e E
(SONNENREIN et al., 2015)	Evaporador e condensador (experimental)	-	-	17	9	P

Tabela 2.5 – Desempenho dos sistemas de refrigeração com aplicação de PCM encontrados na literatura (continuação)

Autor	Componente	COP [%]	Cap.^{resf} [%]	Cons.^{energia} [%]	t_{compressor} [%]	Tipo do PCM
(YUSUFOGLU et al., 2015)	Evaporador (experimental)	17	-	9,4	5	E
(ALZUWAID et al., 2015)	Evaporador (experimental)	-	-	5	5	E
(ALZUWAID et al., 2016)	Evaporador (analítico)	-	-	6	-	E
(ELAREM et al., 2017)	Evaporador (experimental)	8	-	12	-	E
(CHENG et al., 2017)	Evaporador e condensador (analítico)	39	-	32	-	P
(ZARAJABAD; AHMADI, 2018)	Evaporador (experimental)	-	-	17,4	-	Ág
(YAN et al., 2019)	Condensador (analítico)	3,3–10,5	5,5– 25,4	-	5–20	Ág
(KORTH et al., 2020)	Condensador (experimental)	-	18	-	-	P + G

2.3.2 TIM (materiais de interface térmica)

Materiais de interface térmica são usados em uma variedade de aplicações para dissipar energia térmica, de modo a remover o calor dos componentes e evitar danos por superaquecimento (CHEN; LIU, 2020). Desta forma, são utilizados devido a capacidade de gerenciamento térmico (MA et al., 2020). Existem muitos tipos de TIMs, como a graxa térmica e os materiais de mudança de fase (JEON et al., 2019). No entanto, os mais usados são os materiais à base de polímeros, devido às suas excelentes propriedades, como alta resistividade elétrica, baixa constante dielétrica e pequena massa específica, além do baixo custo, fácil processamento, boa estabilidade química e alta adesividade (WEI et al., 2020). O arranjo aleatório de suas cadeias macromoleculares faz com que os polímeros tenham baixa condutividade térmica, em torno de 0,2 W/mK. Assim, os métodos convencionais para melhorar o desempenho da condução térmica são misturar os polímeros com enchimentos

termicamente condutores, como metal, óxidos de metal e cerâmicas, além de materiais de carbono (JEON et al., 2019; MA et al., 2020).

A adição de grafeno aumentou significativamente a condutividade térmica no plano das folhas de TIM (JEON et al., 2019). Em outro experimento utilizando enchimentos termicamente condutores de carbono, (MA et al., 2020) adicionaram 13,0 vol% de fibra de carbono em uma matriz de epóxi, os compósitos apresentaram incremento na condutividade térmica através do plano, atingindo 2,84 W/mK em comparação com o valor de 0,19 W/mK de uma resina epóxi pura. (CHEN; LIU, 2020) estudaram variados materiais de carbono como enchimentos termicamente condutores para materiais de interface térmica. Os resultados indicaram que a eficácia dos materiais de enchimento depende da rugosidade da superfície, espessura da linha de adesão e pressão de contato. Além disso, tanto os compósitos de carbono preto, grafeno e híbridos sofreram redução no desempenho térmico com linhas de ligação mais espessas em alto carregamento de enchimento, provando a existência de um conteúdo de enchimento ideal no qual um desempenho térmico máximo é alcançado. O carregamento excessivo de material de preenchimento afeta adversamente o desempenho do material.

2.4 Materiais compósitos

Devido à sua resistência à corrosão, leveza, facilidade de processamento e baixo custo, os polímeros já são amplamente utilizados na eletrônica (YANJIE LIU et al., 2020). Com a adição dos materiais de preenchimentos adequados, compósitos de polímero com alta condutividade térmica podem possibilitar gerenciamento térmico eficiente em muitas aplicações modernas, como eletrônicos, baterias, dispositivos aeroespaciais e iluminação LED (DEPAIFVE et al., 2020; REN et al., 2020; YETGIN et al., 2020).

Enchimentos termicamente condutores são um dos fatores mais importantes nos valores condutividade térmica dos compósitos poliméricos. Existem três tipos comuns de cargas termicamente condutoras: metais, cerâmica e materiais de carbono. Metais e materiais de carbono preenchidos com compósitos de polímeros termicamente condutores são usados principalmente em áreas de transferência e dissipação de calor onde o isolamento elétrico não é necessário, como trocadores de calor (Y. GUO et al., 2020). Grafite expandido (GE) e nanoplaquetas de grafeno (GNP) são os enchimentos mais promissores para o aumento da condutividade térmica na indústria de compósitos poliméricos devido à sua disponibilidade comercial, baixo custo e excelente condutividade térmica (DEPAIFVE et al., 2020).

Em estudo recente, realizado por Wei; Zhang; Yang (2021) no qual foi fabricado um compósito com rede de grafite expandida (GE), ácido esteárico e cera de polietileno, misturados com partículas de polietileno linear de baixa densidade. Verificou-se que a condutividade térmica máxima dos compósitos com 24,89 % de concentração volumétrica de GE foi de 8,6 W/mK, para a fabricação comum que resultou em uma distribuição aleatória das partículas de grafite, e de 19,6 W/mK no compósito que foi fabricado a partir de uma moldagem térmica para formação de uma rede 3D da matriz com o grafite. Atingindo assim, um incremento aproximado de 5927% em relação à matriz pura. Além disso, o experimento de dissipação de calor revelou a alta eficiência de resfriamento do compósito e a simulação de elementos finitos confirmou visualmente as excelentes capacidades de transferência de calor.

Logo, serão discutidas as principais características que influenciam no aumento da condutividade térmica dos compósitos a partir da adição dos materiais de preenchimento, assim como o incremento no processo de transferência de calor a partir da aplicação desses compósitos. Os principais materiais utilizados como matrizes são o silicone e o epóxi. Logo, os estudos referências a compósitos à base desses materiais, acrescentados às análises referentes à compósitos com matriz de gesso, serão apresentados como base para a pesquisa.

2.4.1. Partículas de preenchimento

As partículas de preenchimento têm influência significativa nas propriedades termofísicas dos compósitos. A seguir, alguns trabalhos que avaliaram a adição de partículas à base de carbono, como grafite, grafeno e nanotubos de carbono, assim como a influência do tratamento, da quantidade, do tamanho e da forma desses materiais de preenchimento serão apresentados.

No trabalho realizado por Chen e Liu (2018) a funcionalização da superfície de óxido de grafite reduzida, preparada por polimerização por enxerto melhorou a distribuição da partícula no compósito de matriz de silicone. Com o intuito de minimizar a presença de bolhas, rachaduras ou outros defeitos no compósito devido à má distribuição do material de preenchimento, o que pode atrapalhar o transporte de calor, a funcionalização da partícula de óxido de grafeno aumentou a formação de cadeias de transporte de calor e beneficiou o transporte de fônons (principal forma de transporte de energia no compósito). Portanto, com a estrutura de rede complexa da interface enchimento-matriz, a cadeia de transporte de calor formada aumentou a condutividade térmica do material. Em outro tratamento de óxido de grafeno para compósito de silicone o autor Ge et al. (2020) mostrou que as partículas funcionalizadas foram capaz de manter uma dispersão estável. Desta forma, a estabilidade

térmica do material tratado foi significativamente melhor do que a do compósito com material de preenchimento sem tratamento prévio. O coeficiente térmico do compósito modificado melhorou e a condutividade térmica cresceu com o aumento da temperatura. Nos experimentos realizados por Song e Zhang (2020) a adição de SiCNWs no compósito de óxido de grafeno reduzido em silicone auxiliou no incremento da condutividade térmica, os autores provaram o efeito sinérgico de ambos os materiais de preenchimento.

Quanto à quantidade de partícula de preenchimento nos compósitos de silicone foi relatado que a taxa de realce da condutividade térmica varia de modo quase linear com a fração mássica de grafeno. No entanto, ao exceder 0,5 % a condutividade térmica aumentou rapidamente, o que indica a formação de uma cadeia de transporte de calor. Esta cadeia de transporte de calor beneficia o transporte de fônons. Portanto, com o aumento de cargas, a cadeia de transporte de calor formada pode aumentar a condutividade térmica repentinamente (H. ZHANG et al., 2016). No trabalho publicado por Tian et al. (2017) utilizando grafenos como enchimento termicamente condutor em frações em massa de 0,18 %, 0,36 % e 0,72 %. A condutividade térmica dos três compostos aumentou em 20 %, 40 % e 50 % em comparação com silicone puro, o teor de grafeno de 0,36 % em massa foi estabelecido como o valor limite no qual o coeficiente de condutividade térmica dificilmente se alterou ao exceder essa quantidade, sendo considerada a fração mássica mais próxima da ótima. Uma das explicações para o incremento da condutividade com a maior quantidade de partículas de preenchimento é que à medida que elas aumentam elas começam a entrar em contato umas com as outras e formam caminhos ou redes de condução térmica (Y. GUO et al., 2020).

O tamanho e forma das partículas adicionadas também têm influência nas propriedades dos compósitos. O aumento notável da condutividade térmica do compósito de silicone pode ser atribuído a uma relação superfície-volume mais elevada de grafite expandido (MU; FENG, 2007). Com relação a uma fração de volume fixo, a condutividade térmica efetiva dos compósitos aumenta com o aumento do diâmetro médio das partículas (GAO et al., 2015). Os resultados obtidos por Zhang et al. (2016) indicam que nos compósitos de silicone as partículas de grafeno formam uma estrutura de rede, que serve como uma estrutura e restringe o movimento da molécula de silicone. A área de superfície específica alta do grafeno resulta em um aumento nas áreas de contato entre o grafeno e o silicone, aumentando a resistência de ligação superficial desses dois materiais. Sendo concluído que grafenos com uma alta proporção de aspecto, podem formar uma cadeia de transporte de calor mais facilmente em comparação com outros materiais de carbono.

Alguns resultados relevantes também foram encontrados em estudos com compósitos de epóxi. No trabalho publicado por Liu; Lu; Cui (2020) a condutividade térmica da resina de

epóxi com adição de grafeno e níquel atingiu foi 915 % superior à do epóxi puro, e passou de 1,60 W/mK para 2,65 W/mK ao aumentar o tempo de deposição do grafeno de 5 para 45 minutos. Com o tempo prolongado mais grafeno foi depositado no preenchimento de níquel, possibilitando a formação da rede 3D de grafeno, incrementando a condutividade térmica do polímero. Jing et al. (2020) analisaram que quando GO, rGO ou partículas funcionalizadas de SiC foram usadas sozinhas como enchimento termicamente condutor para resina epóxi, a condutividade térmica dos compósitos foi baixa, de 0,28, 0,32 e 0,42 W/mK, respectivamente. No entanto, ao utilizar como material de preenchimento o óxido de grafeno reduzido com adição de SiC o compósito atingiu 1,02 W/mK.

A relação da quantidade de partícula de preenchimento nos compósitos de epóxi também foi analisada por alguns autores. A agregação das cargas aumenta a condutividade térmica dos compósitos, desde que não leve à encapsulação de vazios (DEPAIFVE et al., 2020). Desta forma, Yanjie Liu et al. (2020) observaram que a adição de espuma de Ni pode prevenir a aglomeração de grafeno em resina epóxi, garantindo a formação de uma rede termicamente condutora. He et al. (2020) também concluiu que o grafeno orientado pode construir um caminho de transferência de calor eficaz em compósitos com baixa carga de enchimento.

De acordo com Depaifve et al. (2020), o tamanho das partículas de enchimento tem grande influência na condutividade térmica do compósito. Foi relatado por eles que o aumento da condutividade térmica segue uma tendência de saturação em torno de uma relação de aspecto entre 500-700. Wang et al. (2020) obtiveram incrementos significativos na condutividade térmica adicionando MWCNTs e avaliaram que o aumento foi devido a elevada condutividade térmica da estrutura unidimensional das partículas, o que eleva sua área de superfície específica e possibilita alto volume interfacial, aumentando a probabilidade dos fônons passarem pelas partículas de preenchimento no processo de transmissão, o que melhora significativamente a eficiência da transferência térmica. No entanto, maior volume interfacial também leva a mais espalhamento interfacial de fônons, o que pode reduzir a eficiência de transferência térmica. Concluíram então que, melhorar a interface entre MWCNTs e matriz de resina epóxi para reduzir a resistência térmica interfacial pode permitir que os nanocompósitos adquiram maior condutividade térmica com a mesma quantidade de nanopartículas. Ao estudar compósitos de epóxi com nanotubos de carbono, Vahedi; Sadr Lahidjani; Shakhesi (2018) analisaram a influência da resistência térmica interfacial entre o CNT e o epóxi na condutividade térmica efetiva. O efeito da razão de aspecto foi superior para as partículas de maiores diâmetros, de modo que a condutividade térmica incrementou com a maior quantidade das partículas com maiores diâmetros. Chen; Gao; Song (2019) também observaram que a razão de aspecto de

nanopreenchimentos de carbono tem grande influência no desempenho térmico de materiais compósitos de matriz polimérica. Ao analisar diferentes partículas de carbono como preenchementos, concluíram que o grafeno em qualquer forma pode melhorar a condutividade térmica do composto de forma mais eficaz do que os nanotubos de carbono e nanopreenchimentos convencionais à base de carbono, devido ao fato de possibilitar razões de aspecto mais altas e menor resistência térmica interfacial. Dentre as partículas estudadas, o carbono preto teve o menor potencial de incremento na condutividade térmica do compósito, uma vez que tem condutividade térmica e relações de aspecto significativamente mais baixas.

Com relação aos compósitos de gesso, o aprimoramento do desempenho através do trabalho sinérgico de fibras de polipropileno (PPF) e adições de carga isostática de grafite (IGF) foi estudado por Flores Medina e Barbero-Barrera (2017). IGF é um subproduto de resíduo que pode incrementar as propriedades mecânicas e térmicas tanto do gesso simples, quanto em compósitos à base de gesso reforçado. O volume de fibras de polipropileno variou de 0 até 0,6 % e as frações mássicas de grafite testadas foram de 0, 5, 10, 15, 20, 25 %. A condutividade térmica cresceu com IGF em uma função linear. Foi observado incremento de quase 80 % na condutividade térmica dos compósitos com adição de 25 % de IGF e sem PPF, e de cerca de 115 % com PPF.

Flores Medina; Barbero-Barrera; Bustamante (2016) estudaram a influência do aumento da carga de pó de grafite isostático em moldes fresados para usinagem por descarga elétrica. Observaram que o material de preenchimento aumentou significativamente as propriedades mecânicas das pastas de gesso, devido à grande compatibilidade da microestrutura do gesso com os microgrãos de grafite, que preenchem a microestrutura das pastas e aumentam a densidade da pasta endurecida. Concluíram então que o incremento progressivo da quantidade de grafite influenciou nas propriedades das pastas, aumentando sua densidade e suas resistências mecânicas e reduzindo sua porosidade e sua absorção de água. Posteriormente, Flores Medina e Barbero-Barrera (2017) observaram também que a maior adição de grafite intensificou a condutividade térmica dos compósitos de gesso. A adição de grafite em matriz de gesso aumentou significativamente a densidade aparente e condutividade térmica das amostras até 19 % e 97 %, respectivamente (BARBERO-BARRERA; FLORES-MEDINA; PÉREZ-VILLAR, 2017).

A condutividade térmica é fortemente influenciada pela composição mineral, o grau de cristalinidade, o tamanho médio do grão, a porosidade e a forma dos poros dos compósitos. Em materiais porosos, a transferência de calor ocorre em três modos, condução através do esqueleto sólido e gás nos poros, convecção e radiação através dos poros. Para o modo de transferência de calor por convecção, o tamanho dos poros deve ser grande. No entanto,

como o tamanho dos poros no gesso é muito pequeno, a convecção nos poros pode ser desprezada. Portanto, o incremento da condutividade térmica de compósitos de gesso, em altas temperaturas, deve estar relacionado principalmente ao aumento da quantidade e cristalinidade da anidrita (DU et al., 2020).

2.4.2. Condutividade térmica dos compósitos

As Tabs. 2.5, 2.6 e 2.7 apresentam a condutividade térmica das matrizes puras de silicone, epóxi e gesso, respectivamente. Além do valor atingido ao se adicionar partículas de preenchimento e o incremento consequente. Também estão presentes nas tabelas as informações do método de medição da condutividade térmica e a concentração de material de preenchimento utilizada.

A partir da Tab. 2.5, pode-se inferir que na maioria dos estudos realizados foram adicionados à matriz de silicone pequenas quantidades de material de preenchimento. A baixo de 2 % de concentração volumétrica (GAO et al., 2015; SONG; ZHANG, 2020), ou com frações mássicas inferiores a 3 % (ZHANG et al., 2016; TIAN et al., 2017; CHEN; LIU, 2018; SONG; CHEN; ZHANG, 2018). Mesmo assim, foram encontrados incrementos muito elevados, que possibilitaram em alguns casos que a condutividade térmica do compósito fosse mais de 10 vezes superior à da matriz pura, como no caso dos experimentos realizados por Zhang et al. (2016), o qual foi adicionado uma fração mássica de apenas 1,5 % de grafeno.

A maior parte dos estudos realizados com compósitos de epóxi também utilizou uma pequena parcela de partículas de preenchimento, numa faixa entre 1 % e cerca de 10 % de fração mássica (CHEN; GAO; SONG, 2019; DEPAIFVE et al., 2020; YANJIE LIU et al., 2020; WANG et al., 2020; HE et al., 2020; KIM; RHEE; PARK, 2020; REN et al., 2020). Assim como mostrado na Tab. 2.6. Dentro dessa faixa, os incrementos na condutividade térmica foram de 2 a 10 vezes os valores obtidos com a matriz sem o material de preenchimento. Os valores mais destoantes foram nos estudos realizados com partículas tratadas. Como no caso do resultado apresentado por L. Guo et al. (2020) que apresentou incremento próximo a 50 vezes da condutividade térmica da matriz de epóxi pura, com uma fração mássica de cerca de 30 % de fibra de carbono. E no estudo publicado por Yeom et al. (2020), no qual, partindo de uma matriz com condutividade térmica quase 5 vezes superior à dos outros estudos, atingiu valor de condutividade aproximadamente 60 vezes superior para o compósito com adição de grafeno em concentração volumétrica de cerca de 14 %, resultando em torno de 45 W/mK.

Tabela 2.6 – Condutividade térmica dos compósitos de silicone

Autor	Matriz	Partícula de preenchimento	Método de medição	Concentração	k_m [W/mK]	k_c [W/mK]	Incremento
(MU; FENG, 2007)	Silicone	Grafite expandido	Sonda termicamente condutora	9 phr	0,24	0,32	33 %
(GAO et al., 2015)	Silicone	Al ₂ O ₃	Sonda termicamente condutora	0,62 vol%	0,15	2,25	1400 %
(H. ZHANG et al., 2016)	Silicone	Grafeno	Flash laser	1,5 m.%	0,22	2,75	1150 %
(TIAN et al., 2017)	Silicone	Grafeno	Flash laser	0,72 m.%	0,20	0,30	50 %
(CHEN; LIU, 2018)	Silicone	Óxido de grafeno reduzido funcionalizado	Disco quente transiente	2 m.%	0,21	1,31	524 %
(SONG; CHEN; ZHANG, 2018)	Silicone	Grafeno	Análise termogravimétrica (TGA)	2,53 m.%	0,229	2,03	786 %
(ZHAO et al., 2020)	Silicone	Nitreto de boro	Flash laser	50 m.%	0,16	0,88	450 %
(GE et al., 2020)	Silicone	Óxido de grafeno funcionalizado	Analizador DTC300	20 %	0,150	1,197	698 %
(SONG; ZHANG, 2020)	Silicone	Carboneto de silício e óxido de grafeno	Flash laser	1,84 vol%	0,17	2,74	1500 %
(YI LIU et al., 2020)	Silicone	Alumina híbrida	Análise termogravimétrica (TGA)	80 vol%	0,19	2,92	1437 %

Tabela 2.7 – Condutividade térmica dos compósitos de epóxi

Autor	Matriz	Partícula de preenchimento	Método de medição	Concentração	k_m [W/mK]	k_c [W/mK]	Incremento
(FU et al., 2014)	Epóxi	Grafite	Hot Disk TPS 2500S	44,3 m.%	0,17	1,68	888 %
(CHEN; GAO; SONG, 2019)	Epóxi	Óxido de grafeno	Hot Disk TPS 2500S	6 m.%	0,22	1,54	700 %
(DEPAIFVE et al., 2020)	Epóxi	Nanoplacas de grafeno	Hot Disk TPS 2500S	4 m.%	0,24	0,77	220 %
(YANJIE LIU et al., 2020)	Epóxi	Grafeno-níquel	Analizador térmico transitório de disco quente	10,1 m.%	0,2617	2,6549	915 %
(JING et al., 2020)	Epóxi	Óxido de grafeno/SiC	Hot Disk TPS 2200	30 m.%	0,22	1,02	364 %
(WANG et al., 2020)	Epóxi	BNNS/MWCNT	Flash laser	5 m.%	0,2	1,8	819 %
(HE et al., 2020)	Epóxi	Grafeno/SiC	Hot Disk TPS 2200	3,36 m.%	0,172	0,708	311,6 %
(L. GUO et al., 2020)	Epóxi	Fibra de carbono/MXenes	Flash laser	30,2 m.%	0,21	9,68	4509 %
(KIM; RHEE; PARK, 2020)	Epóxi	Nanodiamantes funcionalizados com ozônio	-	1 m.%	0,2	0,4	100 %
(YEOM et al., 2020)	Epóxi	Grafeno	Flash laser	13,6 vol.%	0,924	44,9	5800 %
(REN et al., 2020)	Epóxi	Grafeno/nanopartículas de nitreto de boro	Flash laser	5 m.%	0,18	0,43	140 %
(YETGIN et al., 2020)	Epóxi	Nitreto hexagonal-boro/Al ₂ O ₃	Medidor de fluxo de calor	30 m.%	0,19	0,35	84 %

Tabela 2.8 – Condutividade térmica dos compósitos de gesso

Autor	Matriz	Partícula	Método de medição	Concentração	k_m [W/m.K]	k_c [W/m.K]	Incremento
(MU; FENG, 2007)	Gesso	SSPCM híbrido	Analisador de condutividade térmica	30 m.%	0,35	0,60	71 %
(BARBERO-BARRERA; FLORES-MEDINA; PÉREZ-VILLAR, 2017)	Gesso	Grafite	Relação entre fluxo térmico	25 m.%	0,37	0,73	97 %
(FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017)	Gesso	Grafite/ fibras de polipropileno	Relação entre fluxo térmico	25 m.%	0,167	0,360	115 %

Ao analisar a Tab. 2.7, nota-se que as frações mássicas aplicadas aos compósitos de gesso foram maiores (25 ou 30 %). Assim como os incrementos nos valores de condutividade térmica foram menos significativos que com as outras matrizes. No entanto, foi observado incremento superior a 100 % do valor da matriz pura (FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017). Além disso, os resultados foram semelhantes para o gesso puro (Jeong et al., 2017; BARBERO-BARRERA; FLORES-MEDINA; PÉREZ-VILLAR, 2017), da mesma forma que os estudos nos quais foram adicionados grafite como material de preenchimento obtiveram incrementos equiparados (BARBERO-BARRERA; FLORES-MEDINA; PÉREZ-VILLAR, 2017; FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017). Vale ressaltar que a condutividade térmica na condição de cura úmida é superior comparado à condição de cura seca. Isso acontece devido às amostras na condição de cura úmida conterem água, de modo que o calor pode ser transmitido por ela (LIU et al., 2017).

2.4.3. Transferência de calor por condução em compósitos

O compósito de silicone com grafeno aplicado aos LEDs diminuiu a diferença de temperatura entre o substrato e a carcaça. Também melhorou a eficiência de transferência de calor do sistema. De modo que com um carregamento de 1,5 % em massa de grafeno, atingindo condutividade térmica de 1,5 W/mK, a diferença de temperatura entre o bloco de calor e o dissipador de calor foi inferior a 2 °C e entre o módulo de LED e o dissipador de calor foi de 5 °C (H. ZHANG et al., 2016).

O compósito de silicone com adição de nitreto de boro (BN) foi submetido a um ensaio de dissipação de calor, os corpos de prova foram aquecidos a 80 °C por 2 horas em um forno de ar e, em seguida, transferidos para a placa de aço fria e placa de espuma isolante térmica, respectivamente. A taxa de dissipação de calor aumentou significativamente com o aumento da quantidade de material de preenchimento, devido ao incremento proporcional na condutividade térmica dos compósitos. A temperatura da superfície do compósito com 50 % em massa de BN foi de aproximadamente 30 °C após resfriamento por 25 segundos, valor significativamente mais baixo do que a do elastômero de silicone sem adição de material de preenchimento, que com o mesmo tempo de resfriamento atingiu 65 °C. A rápida dissipação de calor e o excelente desempenho de absorção de calor do compósito demonstraram que esses materiais têm potencial promissor para aplicações de gerenciamento térmico (ZHAO et al., 2020).

Com relação aos compósitos de epóxi, os resultados obtidos por Vahedi; Sadr Lahidjani; Shakhesi (2018) indicaram que a condutância térmica interfacial entre as partículas de preenchimento de nanotubo de carbono e o polímero epóxi dominou o mecanismo de transferência de calor na escala interna do compósito. Em outra publicação, Yeom et al. (2020) provou a eficiência da remoção do acúmulo de calor em dispositivos eletrônicos a partir da aplicação de compósitos de epóxi. De maneira semelhante, Ren et al. (2020) observaram que os compósitos GBN/epóxi apresentaram condutividade térmica aprimorada e propriedades dielétricas desejáveis, sugerindo seu potencial para aplicações de gerenciamento térmico a fim de superar o crescente problema de dissipação de calor em dispositivos eletrônicos.

Jeong et al. (2017) provaram as altas propriedades térmicas, assim como, a viabilidade da utilização de placas de gesso SSPCM híbridas em estruturas de armazenamento de calor em diversos campos. Concluíram que as placas poderiam ser aplicadas como um material de construção de alto armazenamento de calor para estabelecer estruturas de armazenamento de calor para aumentar a eficiência térmica. Já no estudo de placas de gesso com adição de grafite como partícula de preenchimento, Barbero-Barrera; Flores-Medina; Pérez-Villar (2017) relataram redução de 54 % nos fluxos térmicos para o meio exterior quando as placas de grafite-gesso substituíram as de gesso puro em soluções construtivas radiativas.

2.5 Grafite como partícula de preenchimento

Grafite é um mineral em camadas composto de folhas de grafeno fracamente ligadas com uma grande proporção de aspecto que possui excelentes condutividades elétrica e térmica. No entanto, misturado com polímeros, suas propriedades geralmente são bastante reduzidas. O composto de floco de grafite natural intercalado com ácido é capaz de expandir até centenas de vezes seu volume inicial em alta temperatura, denominado grafite expansível (MU; FENG, 2007). O pó de grafite é um produto residual obtido de blocos de grafite isostáticos triturados para a produção de moldes (FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA; BUSTAMANTE, 2016). As normas europeias colocam grande ênfase na reintrodução de resíduos na cadeia de produção. Já tendo sido realizadas análises do uso de resíduos de pó de grafite isostático revalorizado em placas à base de gesso (BARBERO-BARRERA; FLORES-MEDINA; PÉREZ-VILLAR, 2017). De modo que a carga isostática de grafite (IGF) é um subproduto de resíduo que tem apresentado bom desempenho em gesso simples, podendo ser revalorizado como ativador de matriz de gesso em compósitos à base de gesso reforçado (FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017).

Além dos compósitos de gesso, já mencionados, foram encontrados diversos estudos a respeito da condutividade térmica de compósitos à base de cimento com adição de grafite. Vários métodos foram usados para fazer a medição desta propriedade. Os autores Zhang et al. (2013) utilizaram um analisador de constante térmica de disco quente (Hot Disk TPS2500), de modo que a sonda foi colocada entre duas placas de argamassa contendo as mesmas porcentagens de material. Já no trabalho de Fraç et al. (2021) as medições foram realizadas pelo método transiente usando um analisador de transferência de calor, com o auxílio de uma sonda de superfície projetada para medir materiais com uma condutividade térmica na faixa de 0,3–2,0 W/mK. Wei et al. (2018) inferiu o valor de condutividade térmica a partir dos valores de difusividade térmica, capacidade de calor específica e massa específica, estes foram determinados pelo método de difusividade de flash laser.

Um outro método utilizado para avaliar a condutividade térmica dos compósitos à base de cimento foi calculá-lo com base na Lei de Fourier (FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA; JOVÉ-SANDOVAL, 2018). Com auxílio desse método os autores estudaram compósitos de cimento com GI. A trabalhabilidade das pastas de cimento e argamassas no estado fresco foi reduzida com grafite e devido ao aumento da porosidade e à capacidade do GI em reter CO₂, houve o aumento da profundidade de carbonatação nas misturas com a adição de grafite. Foi obtido aumento da condutividade térmica tanto nas pastas quanto nas argamassas com adição de GI, sendo esse incremento proporcional à quantidade de partícula de grafite, adicionada até 30 % da fração mássica de cimento. A condutividade

térmica foi aumentada em até 50 % nas pastas, enquanto nas argamassas o incremento superou 150 %.

Yuan et al. (2012) analisaram que a pasta de cimento com 10 % em massa de grafite apresentou condutividade térmica 2,65 vezes maior que a da pasta pura. Além disso, os autores relataram que as pastas sem pré-aquecimento apresentaram instabilidade com o aumento da temperatura, enquanto as que sofreram tratamento térmico se mantiveram estáveis. Song et al. (2019) produziram cimento termo condutor misturando cimento de poço de petróleo com grafite. Além disso, quanto mais alta a temperatura, menor foi a condutividade térmica da pasta de cimento. Quando o conteúdo de grafite variou de 0 a 5 % em fração mássica, a alta condutividade térmica do grafite foi dominante, então a condutividade térmica da pasta de cimento aumentou até cerca de 20 %, comparado ao cimento puro. Porém, para conteúdo de grafite de 5 % até 20 %, o isolamento térmico do poro foi dominante, então a condutividade térmica da pasta de cimento diminuiu.

Chougan et al. (2020) avaliaram a condutividade térmica de compósitos de cimento com nano-grafite. Os testes de condutividade térmica foram realizados por meio de um medidor de fluxo de calor. Foram fabricadas três amostras, endurecidas por 28 dias. Estas foram colocadas entre uma placa fria (0 °C) e uma placa quente (20 °C). O maior incremento foi obtido para a menor adição de nano-grafite. Assim, para o compósito com 0,01 %, em massa, a condutividade térmica foi elevada em 55 % comparado ao cimento puro. Os autores também observaram que ao endurecer as amostras por 28 dias em água elas apresentaram maior densidade e incremento nas propriedades mecânicas, resultando na diminuição da permeabilidade com o aumento do conteúdo de nano-grafite. Sendo obtido redução de até 12 % no volume de vazios permeáveis dos compósitos.

A Fig. 2.5 reuni valores relatados na literatura a respeito da condutividade térmica de compósitos de cimento com adição de grafite. Os trabalhos apresentados no gráfico estudaram pastas de cimento com diferentes razões de água. Dentre os resultados apresentados, a maior condutividade foi vista para a pasta que utilizou menor quantidade de água na produção, ou seja, que apresentou menos poros após a cura. Este compósito de cimento com elevada condutividade, fabricado por Yuan et al. (2012), reduziu significativamente os valores ao ser submetido a 6 horas de aquecimento a 350 °C. Nota-se também que o aumento da fração mássica de grafite resulta em um incremento na condutividade térmica das pastas. No entanto, para alguns trabalhos, foi observado um limite de quantidade de grafite, no qual, acima deste a condutividade passa a reduzir. Este limite foi de 20 % no trabalho de Flores Medina; Barbero-Barrera; Jové-Sandoval (2018) e de 5 % nos testes realizados por Song et al. (2019). De acordo com os experimentos exibidos, o GE foi o que possibilitou os maiores incrementos na condutividade térmica e o GI

os menores. Ademais, são dispostas algumas das curvas calculadas a partir do modelo de Maxwell-Garnett (M-G) do meio efetivo (HE et al., 2020; L. GUO et al., 2020), a partir da Eq. (2.1), no qual a condutividade térmica do compósito com grafite (k_g) é obtida com base no resultado para o cimento puro (k_0), no valor de condutividade térmica da partícula de grafite (k_p) e na fração volumétrica (\emptyset), que é adquirida a partir da fração mássica multiplicada pelas massas específicas da matriz e do grafite. Os cálculos foram realizados com base nas propriedades termofísicas das partículas de grafite e cimento separadamente (YUAN et al., 2012; SONG et al., 2019). No modelo de M-G a condutividade térmica do compósito incrementa sempre com a adição de partícula de preenchimento e não varia de acordo com a quantidade de poros no material. Dessa forma, nota-se que alguns resultados experimentais apresentaram valores distantes do previsto pelo modelo, além do fato que em alguns dos estudos foi analisado redução na condutividade térmica a partir de uma certa fração mássica de grafite.

$$k_g = k_0 \frac{2k_0 + k_p + 2\emptyset(k_p - k_0)}{2k_0 + k_p - \emptyset(k_p - k_0)} \quad (2.1)$$

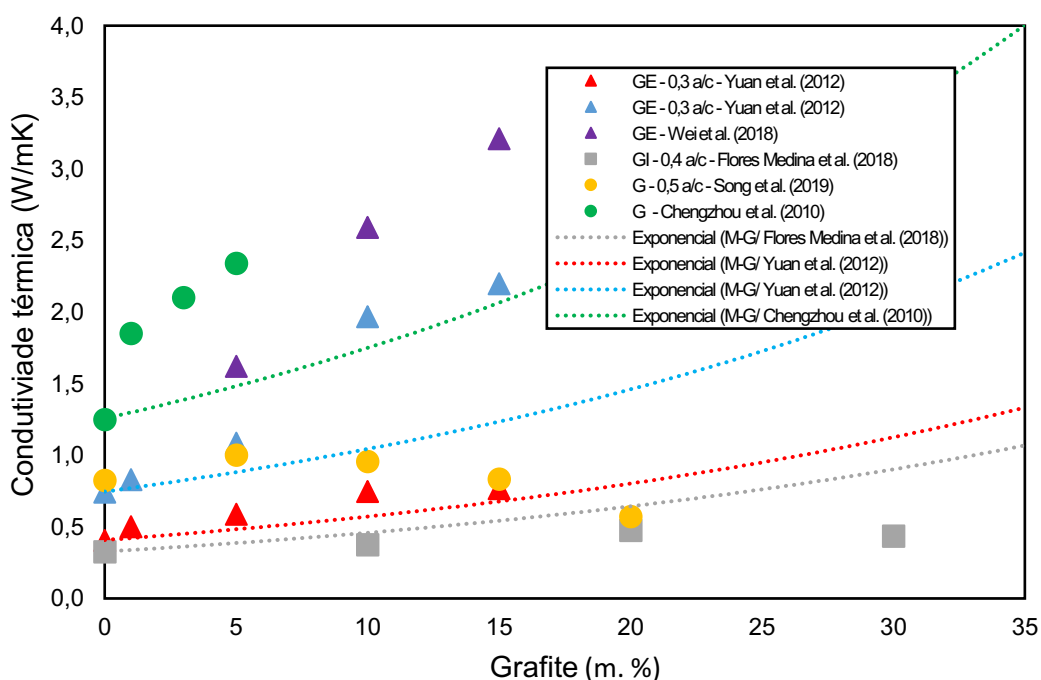


Figura 2.5 – Condutividade térmica de compósitos de cimento com adição de grafite, com diferentes razões de água sobre cimento, em função da fração mássica de grafite e comparado ao modelo de Maxwell-Garnett (M-G)

Alguns outros trabalhos se atentaram nas alterações da condutividade térmica ao se adicionar GE em conjunto com PCM nos compósitos de cimento. Zhang et al. (2013) produziram uma argamassa de cimento com PCM de n-octadecano com adição de grafite expandida (EG). A porcentagem de massa de n-octadecano no PCM composto pode chegar a 90 % devido à excelente capacidade de adsorção do GE. Os autores observaram que a microestrutura do GE contribuiu para evitar o vazamento de n-octadecano derretido após ele mudar de fase do estado sólido para o estado líquido e auxiliou na redução da variação da temperatura interna. He et al. (2016) estudaram o comportamento térmico de um PCM de ácido láurico e mirístico com grafite expandida adicionado à argamassa de cimento. A adição de GE incrementou significativamente a taxa de armazenamento e liberação de calor dos compósitos e auxiliou no controle de temperatura e no retardo da mudança de temperatura, possibilitando maior grau de resfriamento. Franç et al. (2021) utilizaram GE como preenchimento condutor térmico da parafina, com uma temperatura de transição de fase de aproximadamente 58 °C. A proporção parafina/grafite foi de 4 para 1, de maneira que quanto maior quantidade de parafina, menor a condutividade térmica dos grãos. Foi observado que a taxa de mudança de fase do processo aumentou com a adição de GE à parafina. Além disso, a diferença entre as temperaturas de fusão e solidificação reduziu de 8 para 4 °C. Os resultados revelaram que os compósitos de cimento com GE/parafina garantiram boa capacidade de armazenamento térmico.

A Tab. 2.8 sintetiza os resultados dos trabalhos que avaliaram a condutividade térmica dos compósitos de cimento com adição de grafite, comparando com os valores obtidos para a matriz de cimento sem adição de grafite. Ela também indica qual foi o método de medição aplicado e qual a razão mássica de grafite, de água e de agregado (como areia ou outras partículas de preenchimento, exceto grafite). Dentre os trabalhos apresentados, estão presentes aqueles que adicionaram PCMs com grafite como material de preenchimento para os compósitos de cimento.

De modo geral, fica evidente a influência do grafite no aprimoramento da condutividade térmica dos compósitos de cimento. Os incrementos mais significativos devido à adição de grafite foram observados por Flores Medina; Barbero-Barrera; Jové-Sandoval (2018) e Yuan et al. (2012), ambos superaram o dobro da condutividade térmica para o material sem grafite. No primeiro trabalho houve uma fração mássica significativa de agregados que podem ter influência na interação do grafite no compósito. No entanto, Yuan et al. (2012) obteve aumento muito expressivo, atingindo cerca de 2 W/mK de condutividade, ao adicionar apenas 10 % de grafite em comparação à massa de cimento, sem aplicar nenhum outro agregado.

Tabela 2.9 – Condutividade térmica dos compósitos de cimento com grafite

Autor	Partícula de preenchimento	Método de medição	g/c [m. %]	a/c [m.%]	agr/c [m.%]	k_0 [W/m.K]	k_g [W/m.K]	Incremento [%]
(CHENGZHOU et al., 2010)	Grafite	-	5**	-	850	1,25	2,43	94
(YUAN et al., 2012)	Grafite	Hot Disk TPS2500	10	30	0	0,74	1,97	165
(YUAN et al., 2012)*	Grafite	Hot Disk TPS2500	10	30	0	0,41	0,75	83
(ZHANG et al., 2013)	N-octadecane/Grafite (9:1)	Hot Disk TPS2500	10	50	300	2,20	1,85	(-)16
(WEI et al., 2018)	GE	Método de difusividade de flash laser	15	30	0	1,6***	3,2	100
(FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA; JOVÉ-SANDOVAL, 2018)	GI	Lei de Fourier	30	40	0	0,33	0,50	51
(FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA; JOVÉ-SANDOVAL, 2018)	GI	Lei de Fourier	30	70	300	0,17	0,47	176
(SONG et al., 2019)	Grafite	Instrumento de condutividade térmica TC3200	5	50	0	1,0	0,8	20
(CHOUGAN et al., 2020)	Nano-grafite	Medidor de fluxo de calor	0,01	18	200 (areia) 75 (cal hidratado)	0,86	1,33	55
(FRAC et al., 2021)	Parafina/GE (4:1)	Analizador de transferência de calor (método transiente)	10	50	75	1,14	1,43	25

* Depois do aquecimento; ** Massa dos demais agregados foi adicionada à do cimento ao se calcular a fração mássica de grafite; *** Condutividade térmica do composto com 5 m.% de grafite foi usado como parâmetro " k_0 ".

Dessa forma, com o entendimento de como os compósitos com adição de grafite são capazes de incrementar o armazenamento de energia térmica, somado à revisão a respeito dos sistemas de refrigeração com R-290 e com relação às perdas nos sistemas intermitentes, como os resfriadores de líquido, foi possível se obter as informações necessárias para o desenvolvimento de um equipamento que seja capaz de operar com carga reduzida de propano devido ao auxílio do material intermediário com grafite. Logo, nos capítulos seguintes são descritas e discutidas as análises das propriedades termofísicas dos materiais intermediários e do processo de transferência de calor nos mesmos, assim como a aplicação do MI no resfriador de líquido projetado para pequenas quantidades de R-290.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Propriedades termofísicas do material intermediário

Nesse item serão apresentados os equipamentos usados na obtenção dos valores das propriedades termofísicas dos materiais fabricados. Além dos detalhes da produção das amostras de compósitos de cal hidratado, gesso e cimento.

3.1.1. Aparato experimental

Para medição da condutividade e difusividade térmica foi utilizado o condutímetro da LINSEIS THB-1 com a sonda “B76210”, mostrados na Fig. 3.1. Para o instrumento de medição obter leituras adequadas o tamanho mínimo das amostras é 10 mm x 20 mm x 3 mm. As faixas de medições do equipamento são ilustradas na Tab. 3.1. Os parâmetros de medições utilizados no condutímetro foram mantidos constantes para todas as amostras. Assim, foram feitos 3 testes múltiplos com 5 medidas em cada. Os testes foram realizados na temperatura ambiente, entre 20 e 25 °C. A massa específica dos materiais foi calculada a partir da obtenção da massa, utilizando a balança ilustrada na Fig. 3.2, e do volume das amostras que varia de acordo com os moldes, como pode ser visualizado nas Fig. 3.4 (a), Fig. 3.5 (a) e (b). Com os valores de condutividade e difusividade térmica além da massa específica, é possível estimar o calor específico dos compósitos estudados.

Tabela 3.1 – Faixa de medição e erros do condutímetro LINSEIS THB-1 com a sonda “B7620”

Propriedade	Faixa de medição	Erro do instrumento
Condutividade térmica (k)	0,01–5 [W/mK]	< 2 %
Difusividade térmica (α)	0,05–10 [mm ² /s]	< 5 %
Calor específico (cp)	0,01–1 [J/gK]	< 2 %

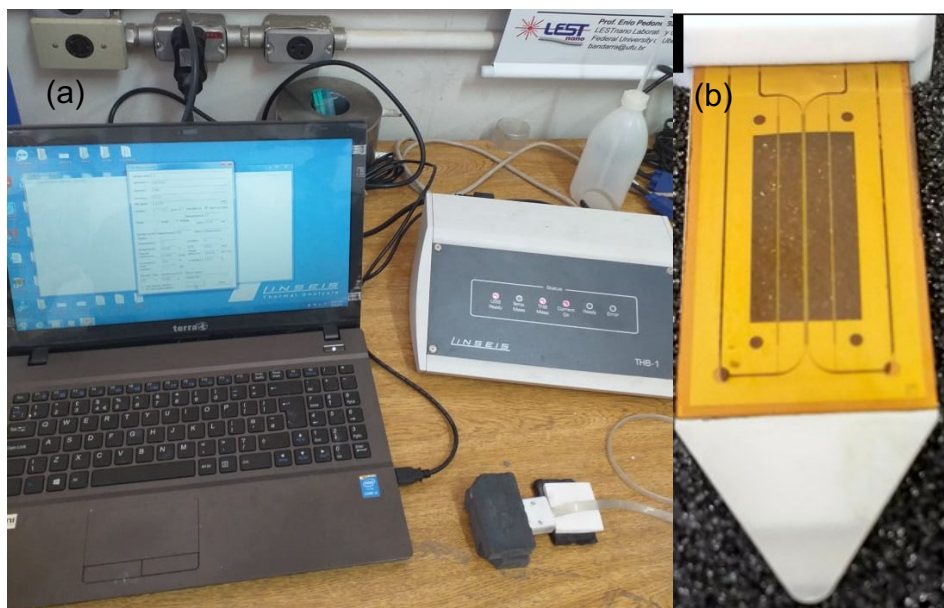


Figura 3.1 – (a) Condutivímetro LINSEIS THB-1 no momento da medição da amostra com grafite e (b) Sensor “B7620”

A validação do condutivímetro foi realizada a partir de materiais conhecidos na literatura, sendo esses: (1) PMMA (acrílico) – material fornecido em conjunto com o aparato experimental como forma de verificação do equipamento; (2) EPS (isopor expandido) – dados de condutividade térmica baseados na literatura (SHI et al., 2019); (3) Isolamento – dados retirados do catálogo da “Armacell”, considerando o modelo “AF/Armaflex BR”. Desta forma a Tab. A.1.1 apresenta as propriedades termofísicas esperadas e medidas desses materiais. Logo, os resultados obtidos garantem a confiabilidade do instrumento de medição.

3.1.2. Fabricação das amostras

Com relação à preparação dos materiais sólidos, para a avaliação das propriedades são necessárias duas amostras dos materiais, de maneira que a sonda é posicionada entre elas. Foi utilizado uma balança digital modelo GEHAKA BK500 com resolução de três casas decimais, como pode ser observado na Fig. 3.2. A faixa de medição vai de 0,01 até 510 g com incerteza de $\pm 0,002$ g. Ela foi utilizada para obter a massa de cada componente da amostra e garantir que a fração mássica dos componentes fosse correta, e também após a produção dos materiais, para analisar a variação da massa com o tempo.



Figura 3.2 – Balança de precisão BK500

O material de preenchimento utilizado foi o pó de Grafite (C95/10 μm) e com relação às matrizes, foram produzidos materiais à base de cal hidratado, gesso e cimento Portland. Inicialmente foram produzidas diversas amostras de compósitos, com base em cal hidratado ou gesso, com e sem adição de pó de grafite, mantendo a massa da matriz e da água, em aproximadamente 100 g e 75 g, respectivamente. Variando apenas a proporção de pó de grafite para avaliar a influência desse material na condutividade do compósito. Além disso, todas as amostras foram lixadas para garantir a planicidade das peças e, conseqüentemente, um contato uniforme entre as peças e a sonda que possibilitasse a leitura. As amostras de cal com grafite passaram por um processo de secagem em um forno a 30 °C com duração entre 15 e 20 horas. A Fig. 3.3 apresenta o equipamento utilizado, com faixa de medição de 20-100 °C e resolução de 1 °C.



Figura 3.3 – Forno: Estufa S.E. Retilínea Fanem Ltda. (ajustada para 30 °C)

A Tab. A.2.1 apresenta os detalhes da produção e cada amostra de cal hidratado, ela especifica a massa de matriz, de grafite e de água e o tempo de secagem. A Fig. 3.4 é uma foto das amostras de cal hidratado com água, sem a adição de pó de grafite. Sendo que a Fig. 3.4 (a) foi obtida logo após a mistura da cal com a água, antes da secagem. Enquanto a Fig. 3.4 (b) apresenta a primeira e a segunda leva de amostras em momentos diferentes de secagem. É possível notar visualmente a diferença da umidade entre as amostras de cal, sem grafite, visto que os blocos à esquerda estão mais claros, tendo sido os primeiros a serem produzidos e, assim, com o processo de secagem já finalizado. Por outro lado, os blocos à direita da imagem estão mais escuros devido ao fato que foram produzidos a menos tempo e ainda estavam em processo de secagem, de modo que a amostra ainda estava úmida.

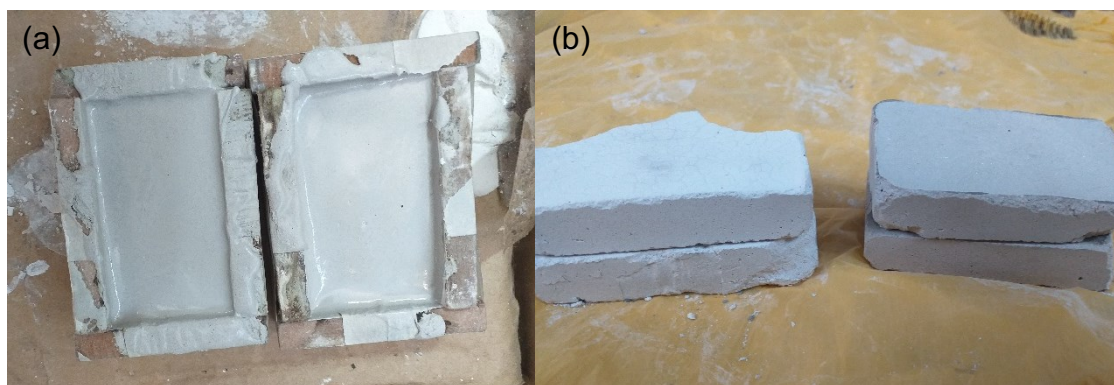


Figura 3.4 – Amostras de cal hidratado com água (a) no momento da mistura (pré secagem) e (b) pós secagem

A seguir, a Fig. 3.5 apresenta as amostras com fração mássica de 1/20 (grafite/cal). A Fig. 3.5 (a) mostra a mistura ainda bem úmida, antes de ser levada ao forno. Já a Fig. 3.5 (b) apresenta as mesmas amostras logo após passarem 17 horas no forno, a 30 °C. Vale ressaltar que essa temperatura foi utilizada para evitar ao máximo que a estrutura trincasse e esfrelasse durante o processo de secagem. A Fig. 3.5 (c) é uma fotografia das peças logo após terem sido lixadas.

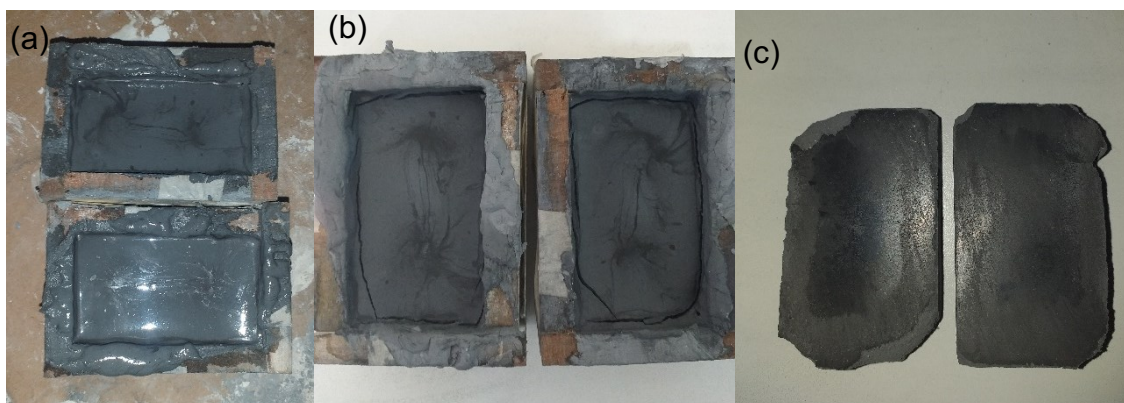


Figura 3.5 – Amostras com fração mássica de 1/20 (a) pré secagem; (b) pós secagem, (c) pós lixa

Foram produzidas mais duas amostras de cal hidratado sem adição de grafite. A Tab. A.2.2 indica os detalhes da produção sem a utilização de forno, ela especifica a massa de matriz e de água e o tempo de secagem. Em seguida, os compósitos de cal com as três menores frações mássicas de grafite também foram reproduzidos aumentando o tempo de forno para 25 horas. A Tab. A.2.3 apresenta os detalhes da fabricação das amostras, ela especifica a massa de matriz, de grafite e de água e o tempo de secagem.

Em seguida, a Fig. 3.6 apresenta as amostras de gesso com diferentes quantidades, em massa, de pó de grafite. Assim como as amostras de cal hidratado, essas também precisam ser lixadas e planificadas para que seja possível as medições das propriedades pela sonda. A Tab. A.2.4 apresenta os detalhes da produção das amostras de gesso, que foram secadas sem o auxílio do forno, nela é especificado a massa de matriz, de grafite e de água.

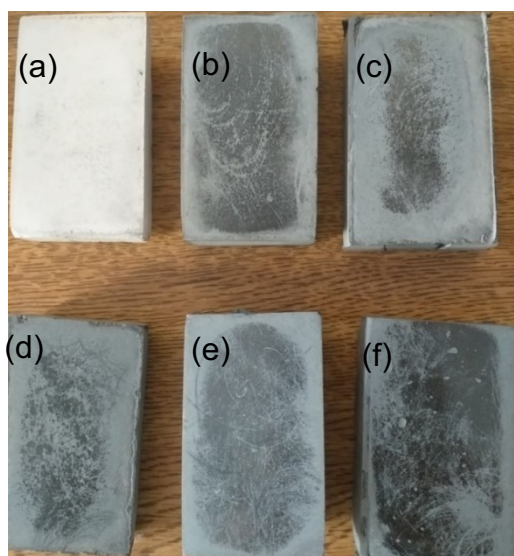


Figura 3.6 – Amostras de gesso estáveis com distintas frações mássicas de grafite: (a) 4:0:3; (b) 20:1:15; (c) 16:1:12; (d) 12:1:9; (e) 8:1:6; (f) 4:1:3

A repetibilidade dos materiais à base de cal hidratado e gesso com 5 % de grafite em massa foram medidas a partir da produção de 5 amostras para que se pudesse validar a produção e a medição das propriedades termofísicas desses materiais. As amostras necessitaram de 4 dias no forno a 30 °C para completar a secagem. A Fig. 3.7 apresenta os 5 pares de amostras produzidos de gesso com 5 % de grafite em massa.



Figura 3.7 – Amostras de gesso estáveis com fração mássica de grafite de 5 % em relação ao gesso (1/20)

Foram produzidos materiais à base de cal hidratado e gesso para analisar a viabilidade de misturar as matrizes a fim de atingir propriedades intermediárias. Amostras com a mesma massa (50 g) de cal hidratado e gesso foram fabricadas com 75 g de água e são apresentados na Fig. 3.8.



Figura 3.8 – Amostras de cal hidratado e gesso na mesma proporção

3.1.3. Planejamentos estatísticos

Para a aplicação da metodologia estatística de planejamento de superfícies triangulares, utilizado em misturas ternárias dependentes. Foram fabricadas 5 amostras com

frações distintas de matriz, água e grafite para materiais à base de cal hidratado e cimento. De modo que foram produzidas 3 amostras do ponto central, totalizando 7 amostras de cal e 7 de cimento. Assim, foi possível observar a influência de cada componente nas propriedades termofísicas dos materiais. A Tab. A.2.5 e a Tab. A.2.6 apresentam as quantidades, em massa, utilizadas na produção de cada amostra de cal e cimento, respectivamente. A soma da massa de todos os componentes resulta em aproximadamente 200 g e a soma das frações mássicas deve ser igual a um. As amostras passaram por um processo de secagem com duração de uma semana em um forno a 30 °C. A Fig. 3.9 mostra os compósitos de cimento curados, sendo a Fig. 3.9 (a) das 5 amostras com frações distintas e a Fig. 3.9 (b) das 3 amostras do ponto central.



Figura 3.9 – Compósitos de cimento após secagem. (a) S1, S2, S3, S4, S5; (b) S5, S6, S7

Com o auxílio do programa Statistica® foi aplicado um modelo linear de misturas ternárias dependentes. A Fig. 3.10 apresenta a região das frações mássicas analisadas, esta região foi delimitada de acordo com o limite técnico, sendo possível fabricar os materiais sólidos garantido boa estabilidade com o tempo e com a secagem. A Tab. A.2.7 indica a fração mássica real e normalizada de cada componente.

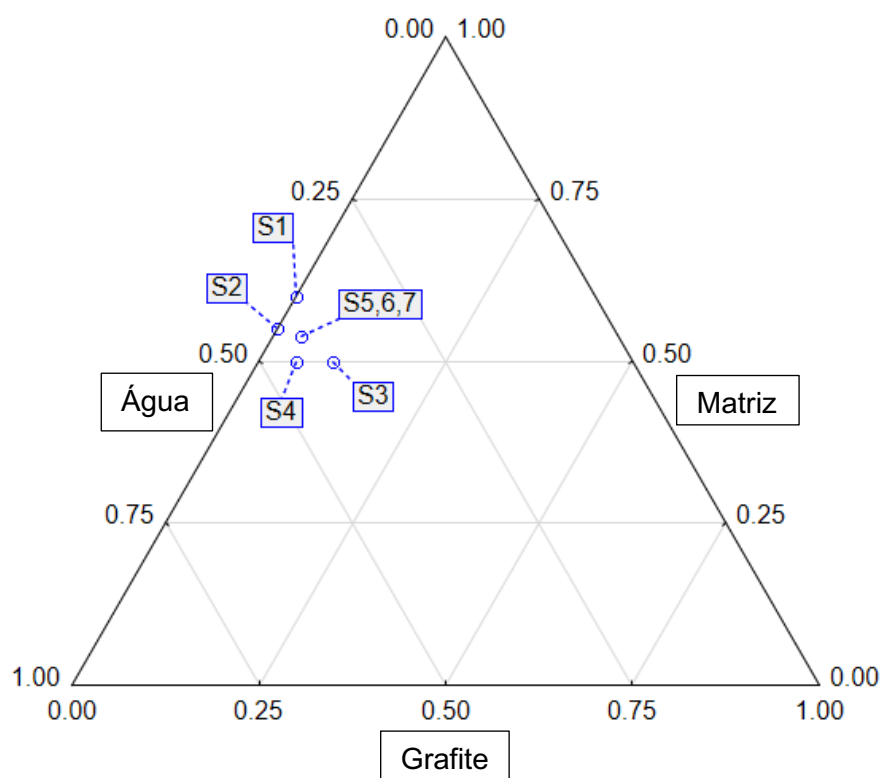


Figura 3.10 – Frações mássicas analisadas para gerar as superfícies triangulares

Para os compósitos de gesso, no intuito de planejar uma análise mais ampla dos efeitos que afetam na condutividade e difusividade térmica, além da massa e calor específicos e da quantidade de água presente no material após o processo de cura, foi realizado um planejamento 2k para avaliar quais variáveis são de fato significativas para cada propriedade do compósito. Ao considerar 4 variáveis (fração mássica de água e de grafite, tempo e temperatura de secagem), o planejamento mais adequado que possibilita a menor quantidade de amostras e testes é o 2^{4-1} . A Tab. A.2.8 apresenta o planejamento fracionado utilizado.

Foram fabricadas 8 amostras distintas de gesso com grafite que foram secadas entre 30 e 50 °C na estufa em 4 ou 8 dias. Os valores de cada variável está presente na Tab. A.2.9, de modo que os valores inferiores correspondem ao “-1” do planejamento e os superiores ao “1”.

Assim como nos demais experimentos, é necessário produzir dois moldes retangulares de materiais compósitos para fazer a análise dos valores de condutividade e difusividade térmica. Ademais, foram realizados 3 testes por amostra para garantir a repetibilidade das respostas. Logo, a Tab. A.2.10 apresenta os detalhes na produção de cada amostra.

Após a avaliação das variáveis significativas para cada propriedade (apresentado no item 4.1.3), foi escolhido o planejamento em três níveis considerando duas variáveis como o mais adequado para analisar os compósitos de gesso com adição de grafite. A Tab. A.2.11 apresenta o planejamento 3^2 utilizado. O índice “0” indica o valor intermediário da variável, sendo equivalente à fração mássica de água e grafite em 0,45 e 0,06, respectivamente.

A Tab. A.2.12 apresenta os detalhes da produção. Foram fabricadas mais 5 amostras de compósitos para que pudesse ser realizada a análise estatística, estas foram submetidas a 4 dias de secagem em 30 °C (amostras 2, 4, 5, 6 e 8). As demais 4 amostras foram selecionadas do planejamento anterior, sendo escolhidas aquelas que foram submetidas à estufa em 30 °C.

3.2 Análise da transferência de calor no material intermediário

A segunda parte dos experimentos foi direcionada para a análise do processo de transferência de calor no material intermediário. A matriz selecionada para fabricação dos compósitos foi o cal hidratado, devido ao fato de ter um tempo de cura mais prolongado, permitindo o estudo do tempo de secagem e a análise de materiais com quantidade significativa de água, além de ser mais fácil a moldagem do material dentro do tanque com a serpentina helicoidal imersa. Além disso, o compósito de cal com grafite foi o que sofreu maior incremento na condutividade térmica (apresentado no item 4.1), o que indica que a alteração no comportamento do material na análise de transferência de calor tende a ser mais acentuada.

Com base em trabalhos encontrados na literatura (ANISH et al., 2021; LIN et al., 2020), um tanque cilíndrico foi construído e o material intermediário foi preenchido no interior, em contato direto com uma serpentina na qual foi circulado a mistura de água com 15 % em massa de etileno glicol. Logo, as variações de temperatura no líquido e MI, a vazão do líquido e o tempo necessário para que o material reduzisse ou incrementasse sua temperatura em uma variação específica foram medidos e os dados utilizados para realização das análises da transferência de calor nos materiais intermediários.

3.2.1. Componentes básicos da bancada experimental

O material foi fabricado dentro de um cilindro, envolvendo uma serpentina destinada ao transporte de líquido. O restante da bancada experimental foi composto por dois banhos térmicos, um medidor de vazão Coriolis fabricado pela empresa Rheonik, modelo RHM-04980, o conjunto de mangueiras com 8 válvulas de passagem manuais e o isolamento

utilizado tanto no cilindro quanto na mangueira. A Tab. 3.2 apresenta os componentes básicos da bancada experimental e suas especificidades.

Tabela 3.2 – Componentes e detalhes da bancada experimental

Componente	Material	Especificidades
Cilindro	Aço inox	Diâmetro: 15 cm Altura: 22 cm
Serpentina	Alumínio	Diâmetro enrolamento: 8,5 cm Quantidade enrolamento: 7 Diâmetro tubo: 0,8 cm Distância entre tubo: 2,4 cm Espessura: 0,2 cm
Banho aquecimento	-	Temperatura: 0-80 °C Precisão: 0,1 °C Estabilidade: 0,02 °C
Banho resfriamento	-	Capacidade: 2250 W
Coriolis	-	Vazão mássica: 0,1-5,0 kg/min (1,7-83,3 g/s)
Mangueira	Silicone	Tamanho: 10 metros Diâmetro externo: 3/8" (9,53 mm) Diâmetro interno: 1/4" (6,35 mm)
Válvula de passagem	Plástico/Engate rápido	Quantidade: 8 Diâmetro: 3/8" (9,53 mm)
Conexão tipo Y	Plástico/Engate rápido	Quantidade: 4 Diâmetro: 3/8" (9,53 mm)
Isolamento	Espuma elastomérica	Diâmetro interno mínimo: 11 mm Espessura nominal: 13 mm

3.2.2. Instrumentação e monitoramento da bancada

Um conjunto de 9 termopares tipo K presos a um suporte ligado a serpentina possibilitou a medição da temperatura do material intermediário. Para posicionar os termopares foi utilizada uma estrutura de arames fixada no exterior e interior do conjunto de serpentinas. Assim, após a mistura dos componentes do compósito com água, as serpentinas, com os termopares acoplados, foram imersas no material, ainda na fase líquida e moldável. De maneira que as sondas ficam localizadas como ilustrado no esquema da Fig.

3.11. Elas foram numeradas de 3 a 11. Semelhante ao apresentado por Lin et al. (2020) as sondas térmicas em contato com o MI foram localizados em três alturas diferentes no interior do cilindro: superior (“T3”, “T4”, “T5”), plano médio (“T6”, “T7”, “T8”) e inferior (“T9”, “T10”, “T11”) e as fiações dos termopares ficaram dispostas acima do cilindro, o que possibilitou a conexão delas com sistema de aquisição de dados, apresentado a seguir.

A respeito da temperatura do líquido, ela foi medida através de dois termopares, na entrada (“T1”) e na saída (“T2”) da serpentina, ambas na parte superior do cilindro. Desta forma, com o auxílio do analisador de sinais do fabricante National Instruments (NI) composto por um sistema modular NI cDAQ-9178, um módulo NI 9213 e da interface desenvolvida em LabVIEW®, foi possível a visualização das leituras dos sensores de temperatura em tempo real e avaliação da variação de temperatura nos meios, assim como a transferência de calor do líquido para o material e vice-versa. Foi selecionado o tempo de 1 segundo para a aquisição dos dados. Além disso, a vazão mássica medida através do Coriolis foi registrada manualmente a cada 5 minutos. A precisão dos sensores de temperatura calibrados foi de $\pm 0,5$ °C e as incertezas na leitura do medidor de vazão foram especificadas pelo fabricante como ± 4 % da vazão total.

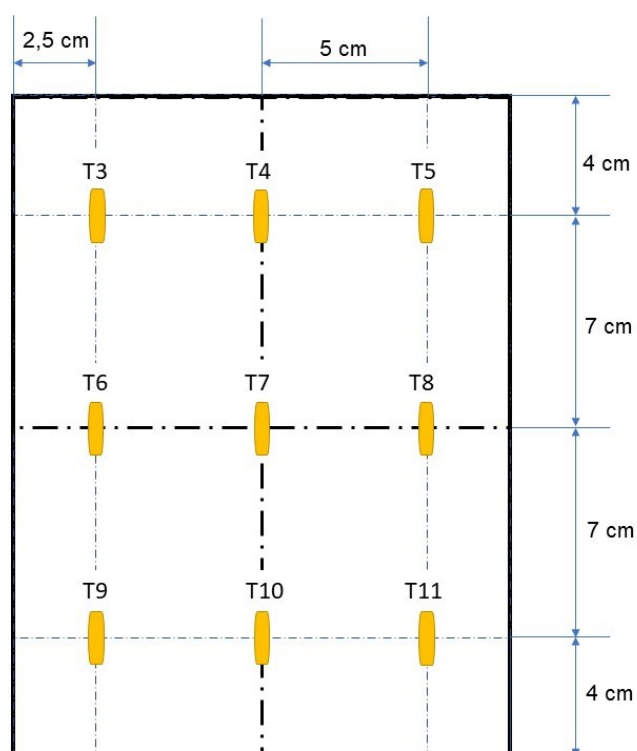


Figura 3.11 – Localização dos termopares no tanque cilíndrico

3.2.3. Metodologia dos testes e condições avaliadas

A bancada experimental ilustrada na Fig. 3.12 tem a função de aquecimento e de resfriamento do material intermediário. No aquecimento, o líquido circula por um banho térmico, ajustado para 32 °C, e rejeita calor para o material através da serpentina. O teste da início com o material na temperatura inicial de 8 °C. É necessário circular o líquido em temperaturas inferiores à 8 °C por um tempo até atingir a condição inicial, a partir de então é possível começar o teste de aquecimento. Para iniciar a circulação do líquido na serpentina, as válvulas A1, A3 e A4 são abertas e a válvula A2 é fechada. O final do teste ocorre no instante em que o material atinge 26 °C. Já o teste de resfriamento inicia-se logo após a finalização do aquecimento do material, neste experimento o líquido passa por outro banho térmico, ajustado para 2 °C. Nessa condição, o líquido recebe calor do material que parte da temperatura de 26 °C (temperatura final do teste anterior). No momento em que as válvulas R1, R3 e R4 são abertas o líquido passa a circular na serpentina e o teste é finalizado quando o material atinge a temperatura de 8 °C.

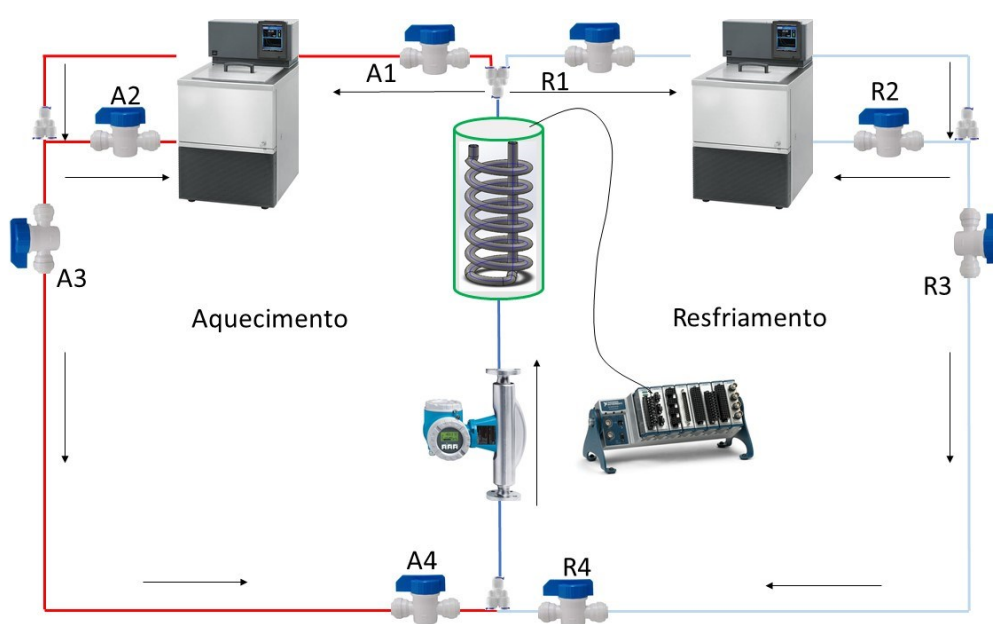


Figura 3.12 – Desenho esquemático da bancada experimental para análise da transferência de calor no material intermediário

Para cada material fabricado foram realizadas diversas tomadas de testes para garantir a repetibilidade e confiabilidade dos resultados. Além disso, assim como nas análises das propriedades termofísicas dos materiais, eles foram secados em um forno de maiores dimensões, com faixa de medição partindo da temperatura ambiente mais 7 °C até 200 °C e resolução de 1 °C (Fig. 3.13). A perda de massa com o tempo de secagem

também foi observada com o auxílio da balança digital TOLEDO com faixa de medição de 0,125 kg até 25 kg e resolução de 0,005 kg. Em todos os materiais fabricados a temperatura de secagem foi de 60 °C. Vale ressaltar que, comparado à temperatura utilizada na secagem das amostras para observação das propriedades termofísicas, foi necessária uma temperatura maior neste experimento devido ao fato da massa e volume de material, conseqüentemente de água, presente nos cilindros ser significativamente superior aos compósitos fabricados anteriormente. Não foram aplicadas temperaturas superiores à 60 °C para que não houvesse o risco de trincamentos excessivos no material produzido. Os materiais fabricados em diferentes estágios de secagem estão apresentados nas Figs. 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17.

Todos os componentes dos compósitos foram injetados no interior do tanque cilíndrico de maneira gradativa com a adição de água para que a mistura ficasse homogênea. A soma das massas no momento da produção foi equivalente a 5 kg para todas as amostras. A mistura foi feita de modo manual e parte da massa foi perdida na tentativa de manter o volume do tanque preenchido no limite necessário para que pudesse ser imerso a serpentina com os termopares. A Fig. 3.14 (a) é uma fotografia da mistura de cal hidratado puro logo após a fabricação, ainda úmida e moldável, na qual havia sido mergulhado a serpentina a poucos instantes.



Figura 3.13 – Estufa Marconi MA035 utilizada para secagem do MI (a) desligada e (b) com o conjunto cilindro, MI, serpentina e sensores

(b)



Figura 3.14 – Cal puro (a) logo após a fabricação, (b) passado uma semana na estufa e (c) ao final do processo de secagem

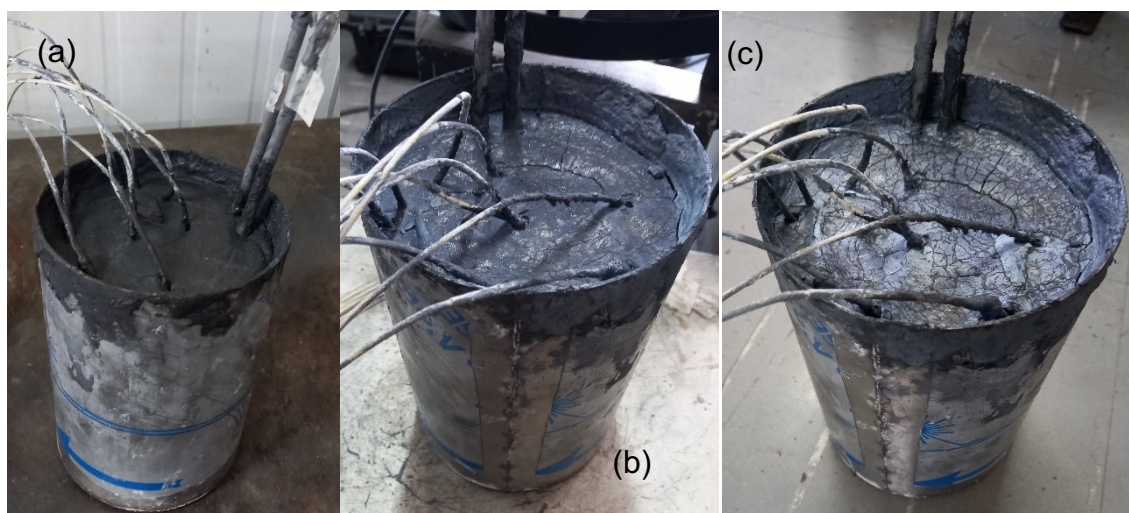


Figura 3.15 – Cal com grafite (a) logo após a fabricação, (b) passado uma semana na estufa e (c) passados 17 dias na estufa



Figura 3.16 – Segundo composto de cal com grafite (a) uma semana de secagem, (b) duas semanas de secagem e (c) três semanas de secagem

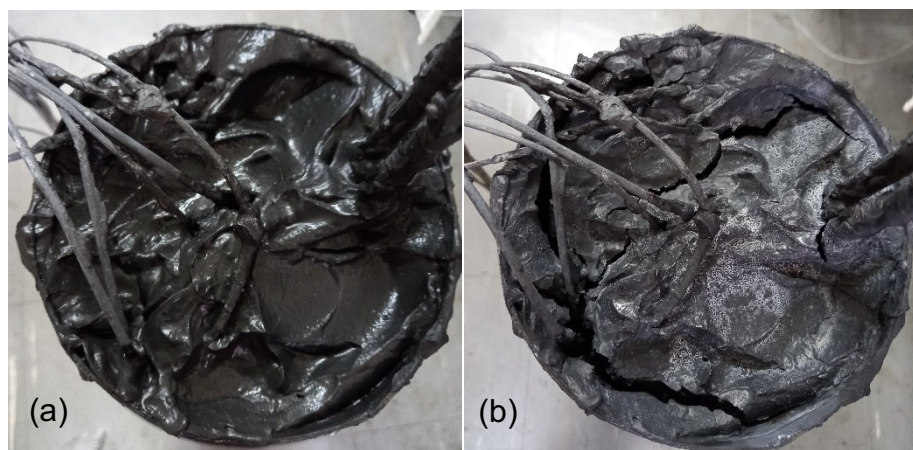


Figura 3.17 – Terceiro composto de cal com grafite (a) logo após a fabricação, (b) passado um dia na estufa

A Fig. 3.17 é a fotografia do composto com frações mássicas de água, cal hidratado e grafite iguais a 0,6250, 0,1875 e 0,1875, respectivamente. Essa foi a proporção utilizada na fabricação do material intermediário aplicado ao resfriador de líquido. Visivelmente é possível perceber a textura mais úmida e pastosa do material. Mesmo após um dia de secagem o material manteve-se pastoso, ao contrário das outras amostras que enrijeceram mais rápido, devido à menor quantidade de água e maior massa de cal.

3.3 Resfriador de líquido

A bancada experimental desenvolvida no presente estudo se fundamenta no funcionamento de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor convencional. Ela atua como resfriador de líquido, de maneira que foi utilizado uma mistura de água com álcool. A Fig. 3.18 apresenta um desenho esquemático da bancada com seus respectivos componentes, além dos pontos nos quais foram situados transmissores de temperatura e pressão. Em seguida, o resfriador e o reservatório de líquido estão dispostos na Fig. 3.19.

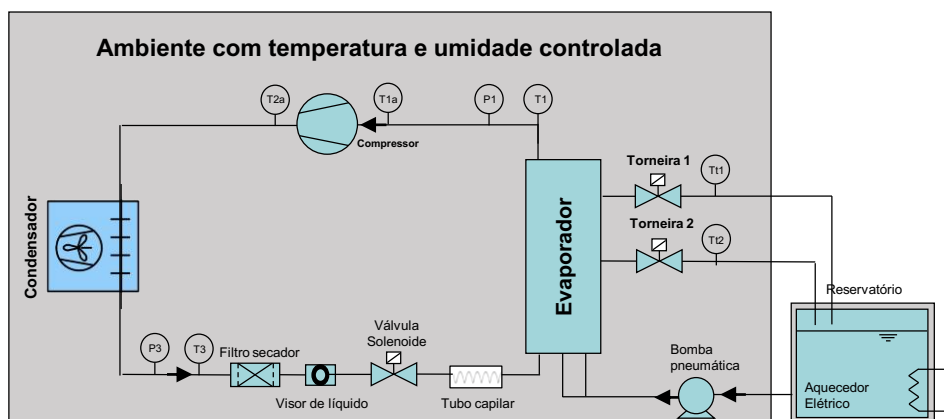


Figura 3.18 – Desenho esquemático para a bancada experimental desenvolvida para a análise no resfriador de líquido

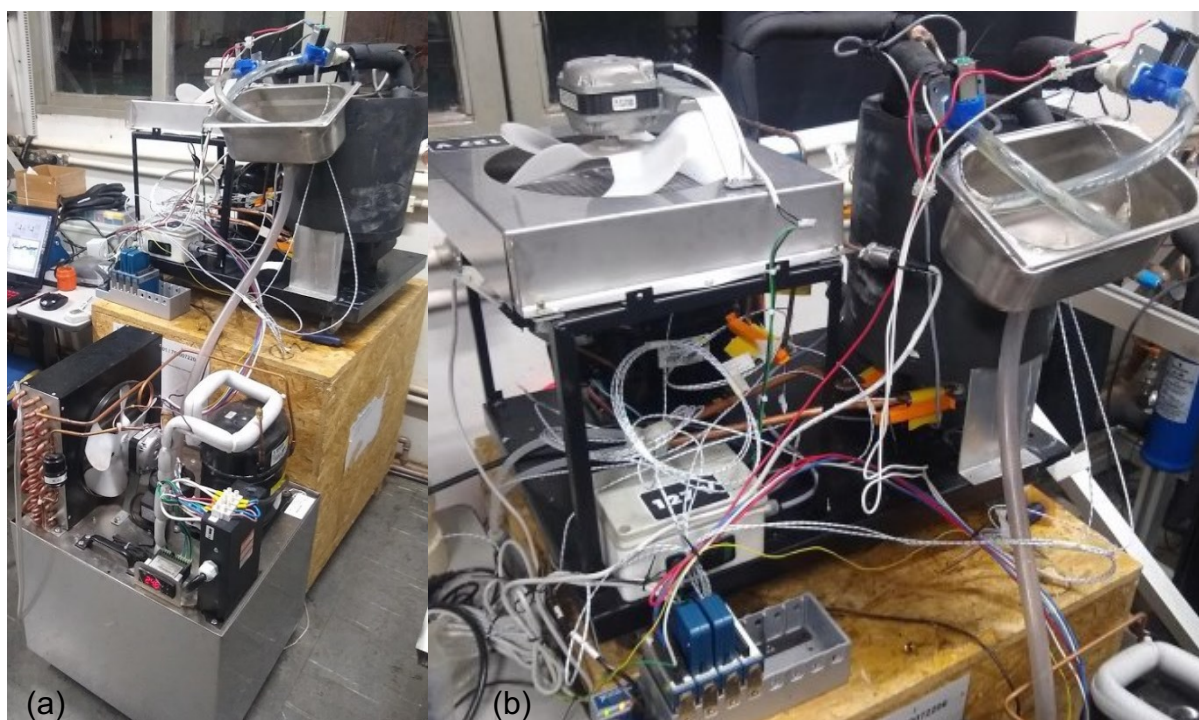


Figura 3.19 – Fotografia do (a) resfriador e reservatório de líquido e (b) resfriador de líquido com sistema de monitoramento

Dentro das principais características construtivas do equipamento, o processo de compressão é realizado utilizando um compressor alternativo, do tipo hermético de média e baixa pressão de sucção; o processo de condensação é realizado em um trocador de calor de fluxo cruzado, que troca calor com o ar exterior; a expansão do fluido refrigerante é realizada por um tubo capilar; por fim, o processo de evaporação se dá dentro de um evaporador do tipo inundado, no caso do sistema operando com o fluido refrigerante R-22. No entanto, esse tipo de evaporador demanda uma grande quantidade de fluido refrigerante

na fase líquida, o que deve ser evitado quando se opera com fluido refrigerante inflamável. Desta forma, o evaporador do resfriador de líquido foi alterado para que a carga de refrigerante ficasse abaixo do limite permitido na legislação. Desta forma, foi desenvolvida uma nova tecnologia, na qual o sistema opera com um evaporador seco. Logo, o fluido refrigerante fica confinado no interior das serpentinas e a carga de fluido é reduzida drasticamente.

3.2.1. Componentes básicos da bancada experimental

O modelo inicial do resfriador de líquido opera com 4,5 kg de R-22, o que é uma grande desvantagem. Visto que, além do iminente aumento de custo, tamanha carga de fluido refrigerante incrementa os impactos ambientais do resfriador. O sistema é composto por uma válvula solenoide na linha de retorno, entre a saída do evaporador e a sucção do compressor. Esta válvula é normalmente fechada, de forma que ela atua enquanto o resfriador estiver desligado para evitar a partida do compressor em pressão elevada.

Caso fosse utilizado o mesmo trocador de calor do sistema para R-22, a carga inicial de fluido refrigerante estimada para o resfriador de R-290 seria próxima de 2 kg, utilizando um fator de ajuste de 0,41 (COULBOURNE et al., 2015). Logo, foi desenvolvido outro trocador de calor para atuar como evaporador do resfriador de líquido com propano dentro da carga limite permitida pelas normas de segurança atuais.

Desta forma, os testes com o fluido refrigerante R-290 foram realizados em um resfriador com evaporador seco que atua em expansão indireta, no intuito de manter, ou aprimorar, a eficiência do sistema reduzindo significativamente a carga de fluido. As Fig. 3.20 (a) e (b) apresentam o desenho técnico desse trocador de calor e a Tab. 3.3 explicita cada componente presente no evaporador.

O trocador de calor desenvolvido para atuar como evaporador do sistema contém um material intermediário com propriedades termofísicas adequadas para aplicações de resfriamento de líquidos. Assim, torna-se possível a utilização de menores quantidades de fluido refrigerante, respeitando o limite imposto pelas normas vigentes. A carga então foi reduzida para 150 gramas de fluido refrigerante inflamável, no entanto, foi possível manter a capacidade de refrigeração requerida, acima de 70 l/h.

O trocador de calor dispõe-se de quatro tubulações, sendo duas destinadas ao escoamento do fluido refrigerante e, as outras, destinadas ao líquido que está sendo resfriado. Sendo que, para um melhor rendimento do trocador de calor aplicado ao resfriamento de líquidos, o fluido refrigerante e o líquido escoam por intermédio do trocador de calor em contracorrente.

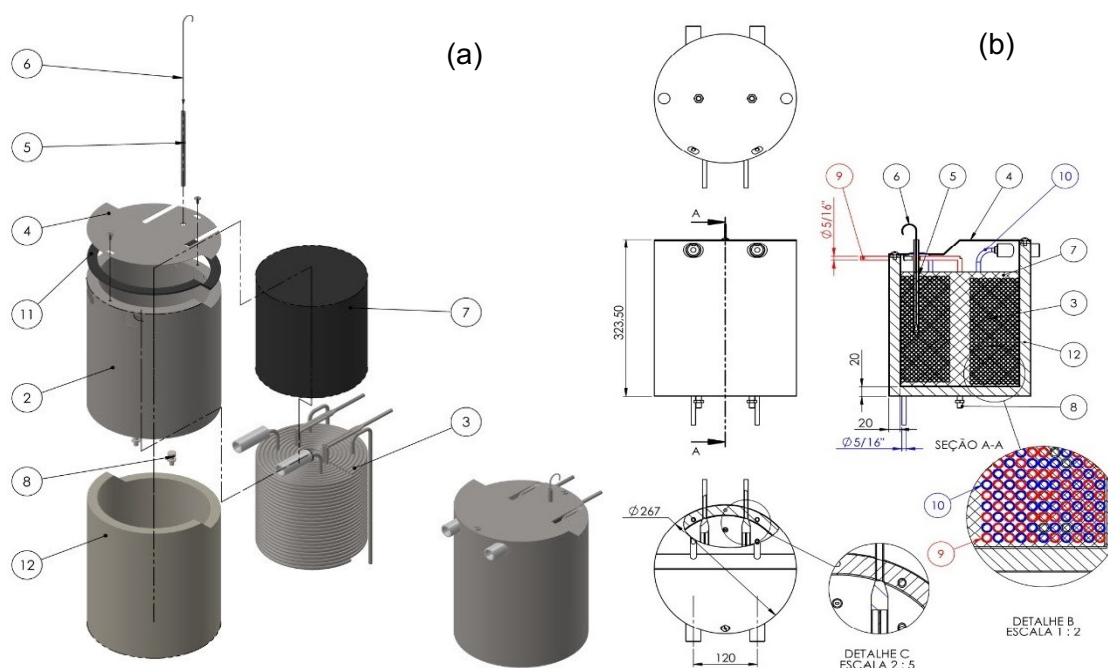


Figura 3.20 – Desenho técnico do trocador de calor. (a) Componentes e (b) detalhamento interno

Tabela 3.3 – Componentes presentes no evaporador seco utilizado no resfriador de líquido com R-290

Numeração	Componentes
1	Trocador de calor
2	Reservatório
3	Conjunto de serpentinas
4	Tampa hermética
5	Poço
6	Sonda de temperatura
7	MI (compósito com elevada condutividade térmica)
8	Elementos de fixação
9	Duas tubulações para passagem de fluido refrigerante
10	Duas tubulações para o líquido a ser resfriado
11	Mecanismo de vedação
12	Isolamento térmica

Com relação aos demais componentes do resfriador de líquido. O condensador utilizado no sistema projetado para operar com R-22 é um trocador de calor tubo-aletado,

enquanto no sistema para propano foi utilizado um condensador de micro canal. O fluido refrigerante circula pelo sistema de refrigeração por meio de tubulações de cobre, tanto na linha de alta pressão como na de baixa pressão. Já o líquido arrefecido, em todas as partes do sistema, circula por uma tubulação de aço inox, com diâmetro nominal de 3/8" (10 mm) e espessura de 1/32" (0,8 mm). Com relação às condições de teste para ambos os resfriadores testados, tanto o sistema com R-22 quanto o com R-290, a temperatura ambiente foi controlada por uma câmara fria, mantendo-se em 24 ± 2 °C e a temperatura de entrada do líquido a ser resfriado esteve na faixa de $24,0 \pm 0,5$ °C.

3.2.2. *Instrumentação e monitoramento da bancada*

Como mencionado anteriormente, para monitorar o funcionamento dos resfriadores de líquido foram utilizados 6 termopares do tipo K com precisão de $\pm 0,5$ °C e 2 transmissores de pressão da CAREL da linha SPKT com faixa de 0–45 bar (0–4500 kPa) e incerteza média de medição de 25 kPa. Dois sensores de temperatura foram alocados nas torneiras nas quais ocorre a saída do líquido, outros dois foram responsáveis pelo monitoramento das temperaturas de sucção e descarga no compressor, estando dispostos na entrada e saída deste componente, respectivamente. Um par de sensores de temperatura e pressão ficou localizado na saída do evaporador para controlar o estado do fluido refrigerante em baixa pressão e o superaquecimento do vapor, e o outro par na saída do condensador para avaliar o estado do líquido sub resfriado de fluido refrigerante. Além disso, no sistema operando com R-290, a sonda (6) foi aplicada em conjunto com um controlador digital de temperatura para regular o funcionamento do compressor de acordo com a temperatura do MI presente no interior do evaporador.

Assim como na bancada de transferência de calor, foi utilizado o chassi (NI cDAQ-9178) e módulos da NI para monitoramento dos parâmetros de medição, com auxílio de uma interface desenvolvida em LabVIEW® para visualização das leituras em tempo real. Nesse caso, foram utilizados módulos para corrente elétrica (NI 9246) e tensão (NI 9242) do compressor e para leitura dos transmissores de pressão (NI 9207) e temperatura (NI 9214).

3.2.3. *Metodologia dos testes e condições avaliadas*

Os ensaios foram realizados na condição de regime transiente. Foi elaborado um sistema no qual o teste foi realizado em 10 ciclos de maneira que são preenchidos 10 copos de 300 ml por ciclo. Cada ciclo foi dividido em duas etapas, (1) a de enchimento, ou seja, na qual uma das torneiras se encontra aberta no tempo necessário para encher um copo, (2) e a de espera, que se inicia com o fechamento da torneira e é finalizado com a abertura da outra.

No sistema operando com R-22 a etapa de enchimento teve duração de 12 segundos e a de espera 3 segundos. Já para o teste com o fluido refrigerante R-290, a etapa de enchimento foi definida com a duração de 9 segundos, enquanto a de espera 6 segundos. Entre cada ciclo de enchimento, o líquido a ser resfriado permanece dentro do resfriador com as torneiras fechadas durante 180 segundos para ambos os sistemas ensaiados.

Além disso, antes de dar início aos ciclos de enchimento, é necessário um tempo para que a temperatura do líquido atinja a temperatura desejada, chamado PDT. O sistema com evaporador inundado, carregado com R-22, necessitou de 300 segundos antes do primeiro ciclo, enquanto o sistema desenvolvido com MI e carregado com R-290 teve PDT de 540 segundos. Esse processo é de suma importância para que haja a troca de calor inicial do líquido com o fluido refrigerante e o MI, para que assim, a temperatura desejada seja alcançada antes do início de cada ciclo. A abertura e fechamento de ambas as torneiras foi controlada por uma válvula solenoide.

Assim, descrito os ciclos de abertura das válvulas para o teste em regime transiente, é possível realizar o cálculo da vazão volumétrica de líquido por abertura de torneira através do tempo necessário para encher um copo, especificado na Eq. 3.1, além do cálculo da vazão volumétrica programada para cada ciclo, em que o tempo considerado passa a ser a soma do tempo de enchimento e de espera, tal como apresentado na Eq. 3.2.

$$Q_{\text{abertura}} = \frac{V_C \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{T_{\text{enc}}} \quad (3.1)$$

$$Q_{\text{ciclo}} = \frac{V_C \cdot 10^{-3} \cdot 3600}{T_{\text{enc}} + T_{\text{esp}}} \quad (3.2)$$

Ambas as vazões são calculadas para l/h, sendo 'T_{enc}' o tempo de enchimento para preencher um copo de 300 ml e 'T_{esp}' o tempo de espera entre o fechamento de uma das torneiras e abertura da outra. Desta forma, o resfriador operando com o fluido refrigerante R-22 possibilitou uma vazão volumétrica de líquido para cada abertura de torneira de 90 l/h, enquanto considerando com mesmo parâmetro o resfriador com propano permitiu vazão de 120 l/h. Enquanto a vazão volumétrica programada para cada ciclo foi de 72 l/h para ambas as configurações de resfriadores de líquido. Outra condição para avaliação dos testes nos resfriadores foi que a temperatura de saída do líquido estivesse na faixa -2 °C – 3°C.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Propriedades temofísicas do material intermediário

Inicialmente foram produzidas diversas amostras de cal hidratado e água com a adição do pó de grafite para observar o comportamento dos materiais de acordo com a variação da fração mássica de grafite. Variou-se a fração mássica de grafite em relação ao cal hidratado para cada amostra. A Tab. A.1.2 indica os valores de condutividade e difusividade térmica, além de massa e calor específico aproximados das amostras, logo após terem sido removidas do molde, ou seja, após a secagem inicial apenas. Essa quantidade de massa perdida para a amostra contida em um molde representa a massa de água que evaporou na secagem inicial.

Foi observada uma alteração significativa nas propriedades dos materiais com o passar dos dias. Logo, a Tab. A.1.3 apresenta os parâmetros obtidos com o passar do tempo, indicando a mudança da estrutura e a influência da umidade nas propriedades temofísicas dessas misturas à base de cal. E a Fig. 4.1 ilustra a variação da condutividade térmica das amostras com distintas frações mássicas de grafite ao longo dos dias, com o decorrer do processo de cura.

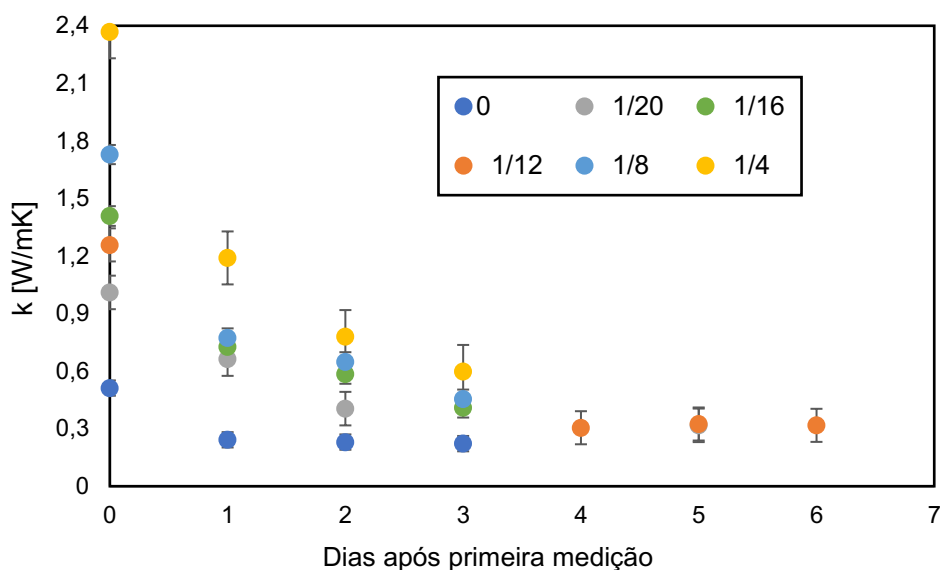


Figura 4.1 – Condutividade térmica das amostras com distintas frações mássicas de grafite ao longo dos dias

A partir da Fig. 4.1 é possível notar o quanto a perda de água e mudança na estrutura interna dos materiais altera os valores de condutividade térmica durante o processo de secagem, enquanto as amostras ainda não estabilizaram. Mesmo assim, a amostra com maior quantidade em massa de grafite, 1/4 de grafite com relação ao cal, apresentou para todos os dias a maior condutividade, enquanto a amostra sem grafite, apenas com cal, apresentou os menores valores de condutividade. Esse comportamento era esperado, visto que, o aumento progressivo da adição de grafite modifica as propriedades do compósito, aumentando as resistências mecânicas, densidade e condutividade térmica e reduzindo sua porosidade e sua absorção de água (FLORES MEDINA; BARBERO-BARRERA, 2017).

A condutividade térmica dos materiais é inversamente proporcional à quantidade de ar presente no material e diretamente proporcional à massa específica aparente. Essa propriedade ainda aumenta em função do teor de umidade contido nos materiais, devido ao fato da água substituir parte do volume gasoso contido nos poros e possuir valor de condutividade térmica superior ao ar. A influência da umidade contida no compósito também foi analisada por Liu et al. (2017) que observou que a condutividade térmica na condição de cura úmida foi maior do que na condição de cura seca.

A Tab. A.1.4 apresenta os últimos valores obtidos para cada amostra nessa tomada de testes diárias. Enquanto a Tab. A.1.5 indica os resultados adquiridos para as amostras após um mês da fabricação, considerando que com esse período elas já estão estáveis. Fica claro o quanto os valores de condutividade térmica têm uma tendência em aumentarem com o aumento da fração mássica de grafite. Nota-se que houve pouca alteração nas

propriedades termofísicas depois de aproximadamente 5 dias da produção, diferente do que ocorreu nos primeiros dias. Além disso, a amostra com fração mássica de 1/12 foi a única que não sofreu decremento nos valores de condutividade térmica e massa específica, isso porque, ela havia secado por completo antes das outras amostras.

A seguir, no intuito de sintetizar os valores de condutividade térmica em três diferentes estados de cura. A Fig. 4.2 apresenta a condutividade térmica em função da fração mássica de grafite considerando os testes no primeiro dia após a retirada da amostra do forno, no último dia da primeira tomada de testes, enquanto a propriedades ainda variavam, e os testes com as amostras estáveis. Pode-se concluir, então, que a condutividade térmica reduz com o passar do tempo, até que o material estabilize, devido à perda de água na estrutura.

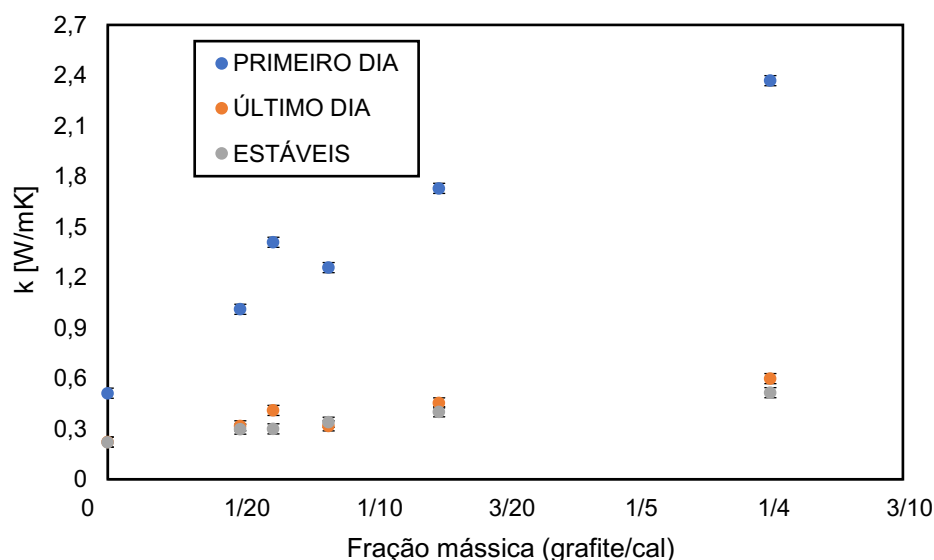


Figura 4.2 – Condutividade térmica em função da fração mássica de grafite considerando as diferentes fases da secagem

A influência do meio externo foi avaliada ao serem realizados testes em dias distintos nas amostras já estabilizadas com fração mássica de 1/16 e 1/8 (razão de massa de grafite sobre a da cal). As amostras já haviam sido fabricadas a mais de uma semana para garantir a estabilidade. A umidade e a temperatura externa variaram ao longo dos dias, o que alterou de maneira amena os resultados das propriedades das amostras. Assim, a Tab. A.1.6 apresenta os valores da condutividade e difusividade térmica, além da massa e calor específicos para ambas as concentrações e horários em que os testes foram realizados.

Para analisar melhor a variação das amostras em função do tempo de cura, comparou-se os resultados dos materiais de cal puro apresentados da primeira leva de

amostras com mais duas amostras de cal hidratado sem adição de grafite. A Tab. A.1.7 indica os resultados das propriedades termodinâmicas das amostras variando ao longo do tempo. Comparando as medições iniciais, pode-se notar que ao variar o tempo de secagem (sem a utilização do forno) as propriedades dos materiais foram distintas. De forma que, como a primeira amostra ficou mais tempo no processo de secagem, ou seja, perdeu mais água antes das primeiras medições, ela apresentou condutividade térmica inferior as outras, que passaram pouco mais de um dia secando. A Fig. 4.3 apresenta a condutividade térmica das 3 amostras de cal hidratado em função dos dias após a fabricação das amostras.

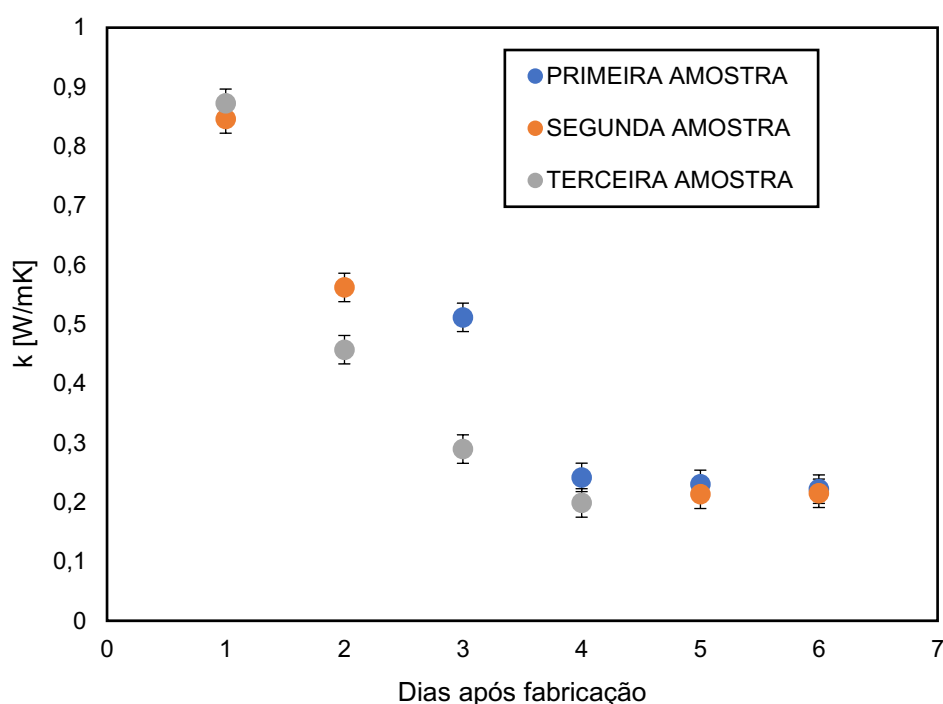


Figura 4.3 – Condutividade térmica para as amostras de cal puro em função do tempo de cura (dias após a fabricação)

Nota-se que todas as amostras sofreram decremento da condutividade térmica com o passar dos dias, ou seja, com a perda de água na estrutura do material à medida que ele secou. Também é possível observar que todas as amostras de cal pura estabilizaram seus valores de condutividade térmica em torno de 0,2 W/mK , como mostrado nas Tabs. A.1.8 e A.1.9. A diferença na condutividade térmica das três amostras para o mesmo dia de medição, em que a influência do meio externo é reduzida, foi devido à variação na estrutura dos materiais, que surge no processo de fabricação e secagem. No entanto, para nível de confiança de 95 % o intervalo obtido valida a metodologia experimental para as misturas de cal e água.

As propriedades termofísicas dos compósitos de cal com as três menores frações mássicas de grafite e com tempo de forno de 25 horas também foram avaliadas. A Tabs. A.1.10 e A.1.11 indicam os resultados logo após as amostras serem retiradas do forno e depois de passarem mais tempo secando sem o auxílio do forno e estabilizarem. As condutividades térmicas em função da fração mássica de grafite para as amostras logo após o forno e estáveis são apresentadas na Fig. 4.4. A partir dela é possível comprovar que a perda de água da estrutura do material mesmo após a secagem de 25 horas tem grande influência na condutividade térmica. E mais uma vez foi provado a melhora da condutividade das amostras com o aumento da quantidade de grafite, em massa, sendo esse incremento praticamente linear para as concentrações testadas.

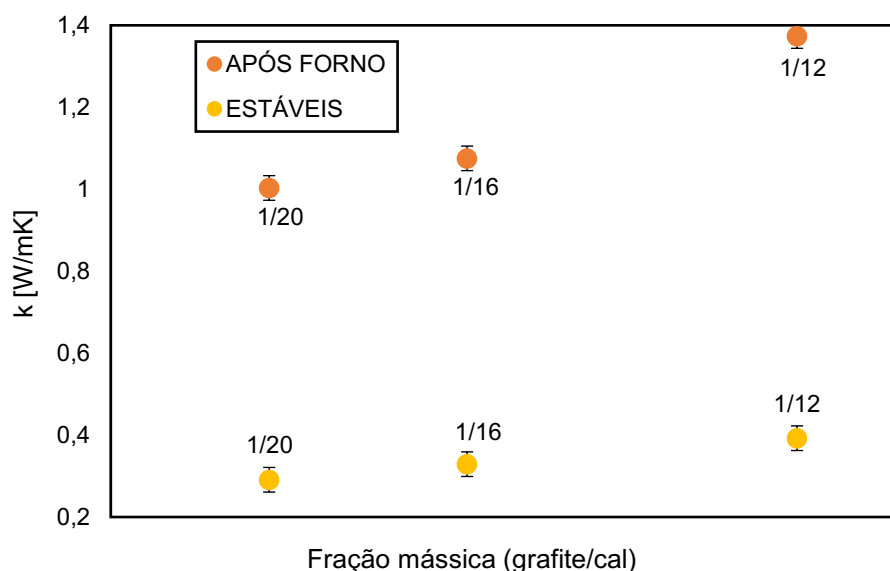


Figura 4.4 – Condutividade térmica para as amostras de cal variando a fração mássica de grafite, medições logo após retirada do forno e posteriormente, com as amostras estáveis

Também foi observada a variação das propriedades termofísicas das amostras de gesso puro com a quantidade de água utilizada na fabricação do material. Os resultados das medições para gesso puro são apresentados na Tab. A.1.12. A diferença entre a condutividade térmica das amostras foi devido à quantidade de pó de gesso adicionado na produção, já que na amostra que conteve mais gesso em proporção com a quantidade de água o material possuiu menos poros ao secar. Com isso, a amostra com menos poros recebe menor influência do ar – com baixa condutividade térmica – e apresenta maior valor. Vale ressaltar que essa influência dos poros só é vista no caso das amostras completamente secas, pois no caso de umidade o comportamento seria diferente. Assim,

fica evidente a relação de proporcionalidade entre a menor quantidade de água na fabricação com o aumento da condutividade térmica para materiais curados.

A influência da umidade na condutividade térmica dos materiais também foi visto por Gusyachkin et al. (2019) e por Gomes et al. (2017), nessas publicações a maior umidade das amostras proporcionou aumento na condutividade térmica. Além disso, Gomes et al. (2017) analisaram que a condutividade térmica desses agregados porosos foi afetada não apenas pela umidade e densidade aparente, mas também pela porosidade, tamanho dos poros e estrutura interna. Observando a influência do local em que as amostras passam pelo processo de secagem, Wang et al. (2016) obtiveram resultados que indicam que a condutividade térmica diminui ligeiramente com o tempo de cura nas amostras compactadas em ambiente seco, com 17 % de teor de umidade, enquanto o efeito do tempo de cura foi insignificante nas amostras compactadas em ambiente úmido, com 22 % de teor de umidade.

Além disso, foram realizadas diversas medições na amostra de gesso 2/1 (gesso/água) para avaliar a variação das propriedades com o passar dos dias, nos quais as condições externas variam e influenciam nos resultados. A Tab. A.1.13 apresenta todos os resultados obtidos para a mesma amostra. É possível notar que a condutividade térmica variou pouco entre as medidas. Além disso, a massa específica da amostra alterou um pouco desde a primeira medição devido a influência da umidade externa.

As amostras de gesso também variaram suas propriedades durante o processo de secagem, devido à perda da água utilizada na sua produção. Porém, esse processo foi mais rápido comparado às amostras de cal. De modo que na fabricação das primeiras amostras não foi necessário o auxílio do forno para a secagem. A Tab. A.1.14 mostra a variação dos resultados das propriedades termofísicas da amostra com fração mássica de 1/20 (grafite/gesso) ao comparar as medições do segundo, quinto e décimo dia a partir da produção da amostra. Foi concluído que na primeira medição a amostra ainda não havia finalizado o processo de cura. De modo que, a umidade contida dentro do material influenciou no resultado com maior condutividade térmica, semelhante ao que ocorreu nas amostras de cal hidratado. Prova disso é a redução da massa específica que foi causada devido a diminuição da massa da amostra, passando de 53,5 g para 50,7 g. Já o segundo, terceiro e quarto valores foram considerados estáveis. Sendo avaliado que são necessários 5 dias para a cura do compósito de gesso sem o auxílio de qualquer equipamento. Assim, a Tab. A.1.15 apresenta as propriedades termofísicas dos compósitos de gesso para todas as amostras estabilizadas.

Os resultados de condutividade térmica das amostras apresentaram tendência bem evidente quanto à relação do aumento da fração mássica de grafite no incremento da

propriedade. Desta forma, os valores obtidos para as amostras de cal hidratado e gesso foram dispostos em um mesmo gráfico na Fig. 4.5 para que haja uma noção mais clara da influência do grafite em ambas as matrizes. Além disso, são apresentadas as linhas de tendência obtidas com os resultados experimentais, assim como as curvas obtidas a partir do modelo de Maxwell-Garnett (M-G) do meio efetivo, já apresentado na Eq. (2.1). Os cálculos foram realizados considerando a condutividade térmica e a massa específica das partículas de grafite iguais a 1,29 W/mK e 2,25 g/cm³, respectivamente (YUAN et al., 2012; SONG et al., 2019). E a massa específica das partículas de gesso e cal hidratado a partir dos valores aproximados obtidos com os fabricantes, equivalentes a 2,6 g/cm³ e 2,6 g/cm³, respectivamente.

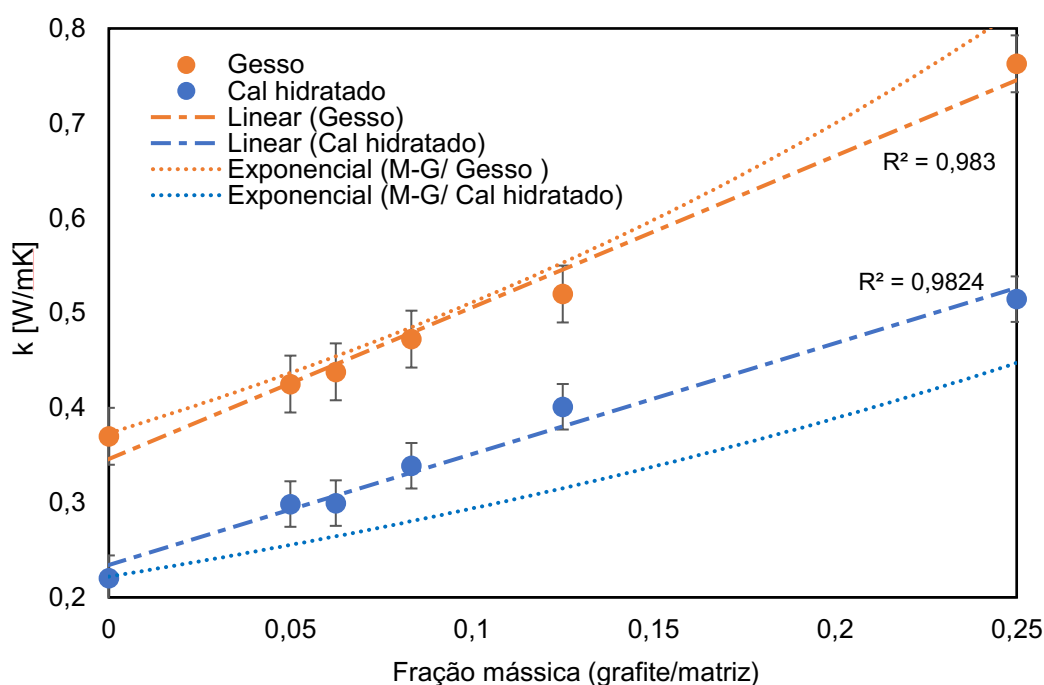


Figura 4.5 – Condutividade térmica em função da fração mássica de grafite para as amostras estáveis de gesso e cal hidratado

Nota-se que para ambos os materiais o pó de grafite impactou no incremento da condutividade térmica. Os dados nos permitem inferir que esse aumento para as frações de grafite testadas foi linear. Além disso, nota-se que o modelo representou melhor os resultados para os compósitos de gesso com grafite. Com relação aos incrementos nos valores de condutividade térmica das amostras de compósitos estáveis em comparação às amostras estáveis da matriz sem adição de grafite, foi analisado aumento de cerca de 134 % no material à base de cal hidratado, enquanto para o compósito de gesso o incremento máximo foi de 106 %, atingindo 0,76 W/mK. O valor obtido foi muito semelhante ao

encontrado por Barbero-Barrera; Flores-Medina; Pérez-Villar (2017) ao utilizar a mesma matriz e material de enchimento, no qual a condutividade térmica analisada pelos autores foi de aproximadamente 0,73 W/mK, com incremento de 97 % em relação à matriz pura de gesso. A Fig. 4.6 apresenta uma comparação entre os incrementos obtidos na condutividade térmica para compósitos com diferentes matrizes utilizando grafite como material de preenchimento. O acréscimo no valor de condutividade térmica foi calculado de acordo com a Eq. (4.1).

$$k_{\text{incremento}}[\%] = [(k_c - k_m) / k_m] \cdot 100 \quad (4.1)$$

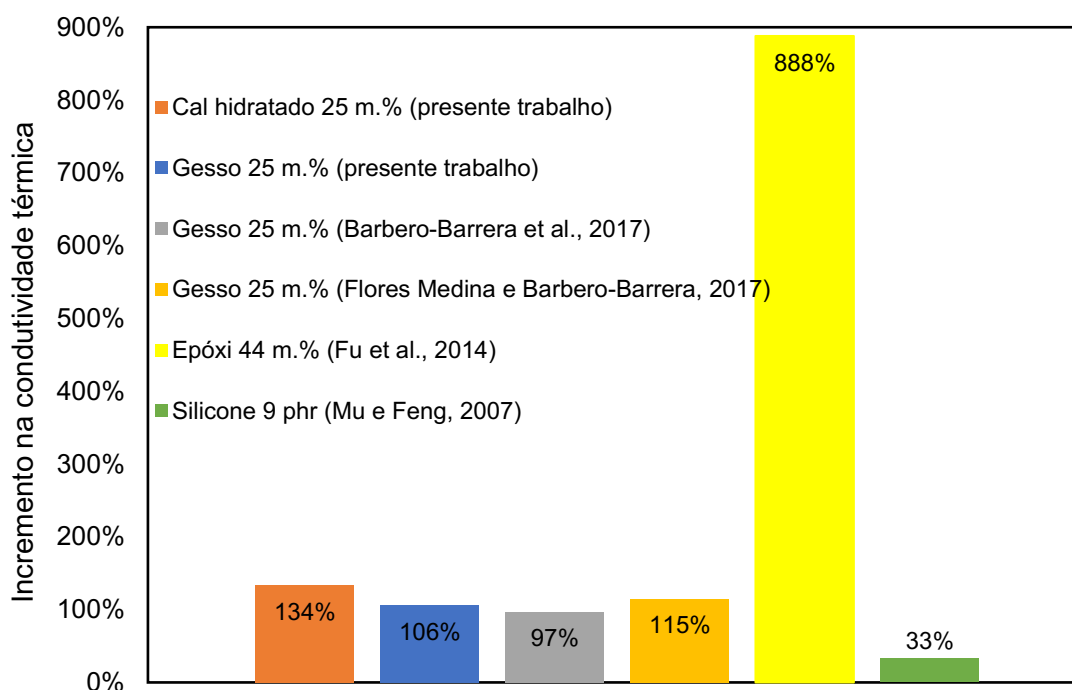


Figura 4.6 – Incremento na condutividade térmica para compósitos com diferentes matrizes utilizando grafite como material de preenchimento

Para avaliar a repetibilidade dos resultados. Foram avaliadas as propriedades de mais 5 amostras dos materiais à base de cal hidratado e gesso com adição de 5 % de fração mássica de grafite em comparação à massa da matriz. Vale ressaltar que todas as medições foram realizadas após a finalização da cura dos materiais.

O desvio padrão adquirido para medir a variação das medidas foi calculado a partir de todos os valores obtidos, sendo que para cada amostra foram realizadas 4 medições. Totalizando em 20 medições das propriedades termofísicas. As Tabs. A.1.16 e A.1.17 apresentam os valores médios das propriedades para cada amostra fabricada, além da média total com nível de confiança de 95 %.

A variação dos resultados obtidos pode ser aplicada para todas as outras amostras produzidas com diferentes quantidades de grafite. De modo que podemos saber a faixa esperada para cada propriedade temofísica medida. Sendo que a menor variação dos resultados é atingida para os valores de condutividade térmica. Logo, a Fig. 4.7 indica a condutividade térmica obtida para os compósitos de ambos os materiais base com fração mássica de 5 % de grafite. As incertezas das medições foram semelhantes e, assim como já havia sido obtido, a condutividade térmica para os materiais completamente curados à base de gesso foi superior aos valores encontrados para as amostras à base de cal hidratado.

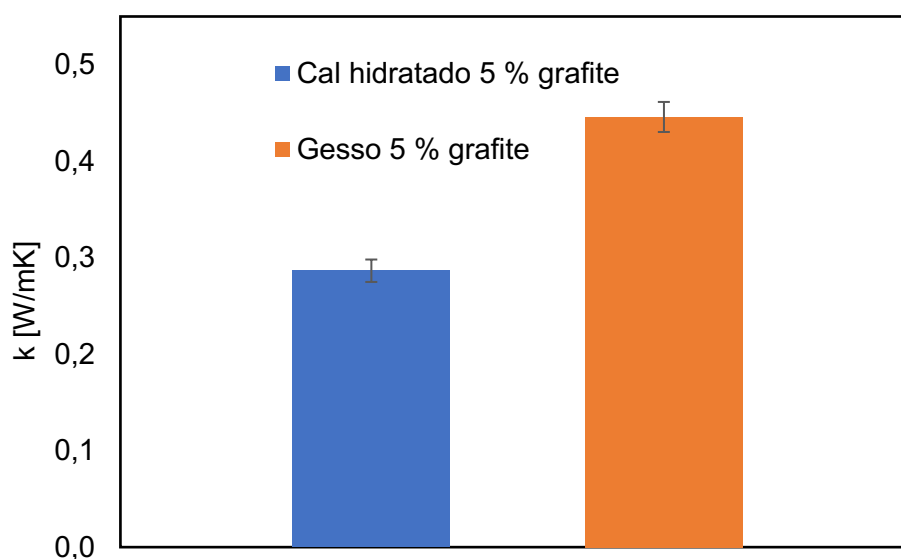


Figura 4.7 – Condutividade térmica para as amostras estáveis de cal hidratado e gesso fração mássica de 5 % de grafite

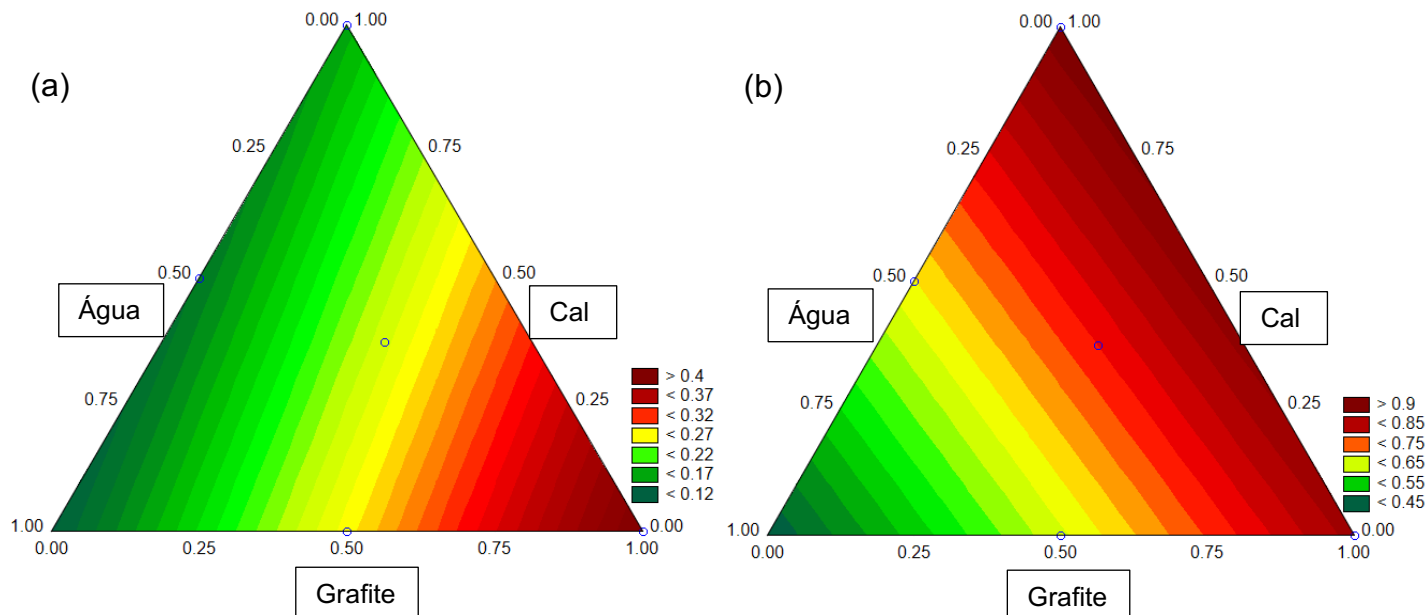
Foram produzidos materiais à base de cal hidratado e gesso para analisar a viabilidade de mistura-las a fim de atingir propriedades intermediárias. Amostras com a mesma massa (50 g) de cal hidratado e gesso foram fabricadas com 75 g de água. A medição das propriedades foi realizada nas amostras totalmente curadas e os resultados, assim como a média com intervalo de confiança de 95 % são apresentados na Tab. A.1.18. Foi observado que o compósito híbrido resultou em propriedades temofísicas intermediárias às amostras puras de cal e gesso. De forma que a mistura entre os dois materiais base pode ser utilizada para balancear as propriedades.

Após essa análise inicial das propriedades temofísicas dos materiais compósitos de cal e gesso, foram planejados testes estatísticos para que fossem obtidos resultados sobre a influência de cada componente do compósito. Para isso, planejamentos diferentes foram desenvolvidos para analisar os materiais à base de cal hidratado, cimento e gesso.

4.1.1. Compósito de cal hidratado

A Tab. A.1.19 expõe os valores obtidos experimentalmente das propriedades termofísicas para cada amostra fabricada após todo o processo de cura. A partir desses resultados foi realizada a análise estatística para ampliar o conhecimento a respeito da influência que cada componente da mistura tem no incremento ou decréscimo das determinadas propriedades. A incerteza das amostras centrais de condutividade térmica, difusividade térmica, massa específica e calor específico foram de $\pm 0,0131$ W/mK, $\pm 0,2195$ mm²/s, $\pm 0,0925$ g/cm³, $\pm 0,1012$ J/gK, respectivamente, para intervalo de confiança de 95 %.

A Fig. 4.8 apresenta as superfícies de resposta geradas a partir da análise estatística, nas quais é possível perceber quais são os componentes que têm mais influência em cada propriedade termofísica dos compósitos de cal hidratado com grafite. As superfícies triangulares formadas pelos fatores de cada componente estão normalizadas, de modo que apresentam apenas a região entre os pontos indicados na Fig. 3.10 (no item 3.1.3). Além disso, são apresentados também as equações compostas pelos valores de correção (Eq. 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5) que possibilitaram gerar cada uma das superfícies.



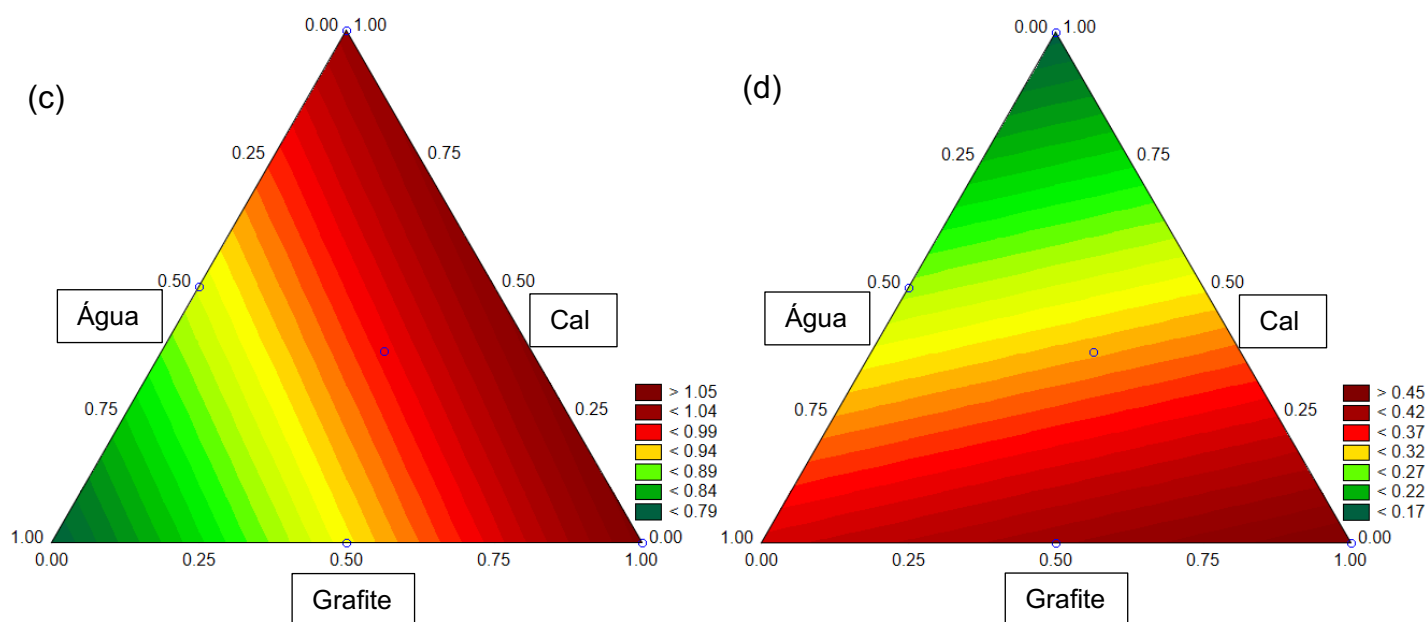


Figura 4.8 – Superfícies triangulares (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica (c) massa específica (d) calor específico

$$k = 0,1178.m_{\text{água}} + 0,4129.m_{\text{grafite}} + 0,1654.m_{\text{cal}} \quad (4.2)$$

$$\alpha = 0,4267.m_{\text{água}} + 0,8618.m_{\text{grafite}} + 0,9207.m_{\text{cal}} \quad (4.3)$$

$$\rho = 0,7888.m_{\text{água}} + 1,0638.m_{\text{grafite}} + 1,0358.m_{\text{cal}} \quad (4.4)$$

$$c = 0,3849.m_{\text{água}} + 0,4513.m_{\text{grafite}} + 0,1640.m_{\text{cal}} \quad (4.5)$$

As equações apresentadas são utilizadas para calcular o valor de cada propriedade a partir da fração mássica normalizada de cada componente, representada por “ $m_{\text{água}}$ ”, “ m_{grafite} ” e “ m_{cal} ” para a água, o grafite e o cal, respectivamente. Essas frações normalizadas são multiplicadas por um fator obtido através da análise estatística. Desta forma, a Tab. A.2.7 indica os valores de fração mássica de cada componente seguido pelo valor normalizado correspondente.

Ao observar os gráficos é importante ter a noção que quanto maior a quantidade de água utilizada na produção das amostras maior a quantidade de vazios no material sólido após o processo de secagem. Desta forma, podemos concluir que quanto mais vazios, menor será a condutividade térmica do material, adquirindo características de isolante térmico, devido à influência do ar, assim como é possível observar na Fig. 4.8. Nela, nota-se também que o componente que teve maior impacto no incremento da condutividade térmica foi o pó de grafite. Enquanto o aumento da quantidade de matriz, na faixa analisada, resultou em um decréscimo na condutividade.

Analisando as outras propriedades termofísicas foi possível observar que a difusividade térmica, assim como a massa específica, tende a crescer com a maior quantidade de grafite e que quanto maior a fração mássica de água na produção do compósito, menor serão os valores dessas propriedades. Com relação ao calor específico, a maior fração mássica de grafite não teve influência tão significativa quanto nas outras propriedades. De modo que uma produção com maior quantidade de água resultará em valores superiores de calor específico, enquanto uma maior fração mássica de cal hidratado fará com que essa propriedade reduza.

4.1.2. Compósito de cimento

O mesmo modelo linear de misturas ternárias dependentes, apresentado anteriormente para os compósitos de cal hidratado, foi utilizado para analisar a influência de cada componente nas propriedades termofísicas dos compósitos de cimento. A incerteza das amostras centrais de condutividade térmica, difusividade térmica, massa específica e calor específico foram de $\pm 0,0286$ W/mK, $\pm 0,1161$ mm²/s, $\pm 0,0746$ g/cm³, $\pm 0,2367$ J/gK, respectivamente, para intervalo de confiança de 95 %. Elas podem ser consideradas para todas as amostras com distintas proporções dos componentes, dentro da faixa analisada. A Tab. A.1.20 apresenta os resultados médio obtidos e as Figs. 4.9 e 4.11 apresentam as superfícies de resposta geradas a partir da análise estatística para as propriedades termofísicas dos compósitos de cimento com grafite.

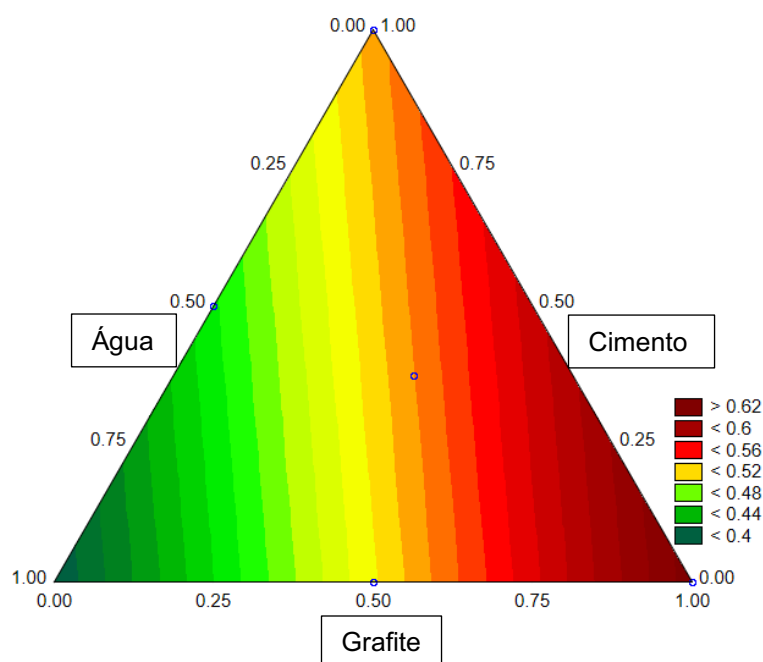


Figura 4.9 – Superfície triangular da condutividade térmica para compósito de cimento

Ao observar a superfície ajustado com modelo linear pode-se observar que quanto mais água e, conseqüentemente, mais poros, menor será a condutividade térmica do material à base de cimento, devido à influência do ar. Assim como é possível observar na Fig. 4.9. Na qual, as regiões da superfície que apresentaram menores valores de condutividade térmica foram aqueles com as maiores frações mássicas de água estudadas, equivalente a 0,45 da massa total (0,5 para a fração normalizada). O que prova a influência negativa do excesso de água na fabricação após a secagem do material. Assim como avaliaram Yuan et al. (2012) ao observarem que a condutividade térmica aumentou com a diminuição da razão de água sobre cimento e com o aumento do teor de grafite e concluíram que a proporção de água afeta diretamente as propriedades térmicas das pastas, de modo que o grafite tem influência no processo de hidratação. O aumento da condutividade térmica com a menor quantidade de água foi justificado pela menor porosidade. A condutividade térmica de materiais sólidos é várias vezes maior que a do ar. Quando há gás nos poros, as partículas sólidas transferem calor pela vibração das moléculas, enquanto o gás transfere principalmente calor pela difusão das moléculas. Conseqüentemente, a existência de dois mecanismos de transferência de calor levam a uma grande resistência térmica na superfície de contato, reduzindo assim a condutividade térmica dos materiais (SONG et al., 2019).

Nota-se também que o componente que teve maior impacto no incremento da condutividade térmica foi o pó de grafite. A mesma relação foi observada em outros estudos de pasta de cimento com grafite (WEI et al., 2018; YUAN et al., 2012) e em argamassas com adição de grafite e outros agregados (CHENGZHOU et al., 2010). A faixa de condutividade térmica obtida, entre cerca de 0,4 e 0,7 W/mK, foi muito próxima a medida nas pastas de cimento com grafite, após processo de secagem, por Yuan et al. (2012). Enquanto Wei et al. (2018) relataram valores de condutividade acima de 3 W/mK a partir da adição de GE.

A maior fração mássica de grafite, equivalente a 0,1 da massa do compósito, possibilitou o maior valor de condutividade térmica. Como tecnicamente não foi possível fabricar um material sólido homogêneo com mais grafite, pode-se concluir que essa fração mássica de grafite, que representa 20 % da quantidade de cimento, foi a ótima para os compósitos de cimento sem a adição de outros agregados. Ao comparar a condutividade térmica das amostras "S2" com "S3" foi observado incremento de 38 % para o compósito de cimento. Semelhante ao obtido no trabalho de Flores Medina; Barbero-Barrera; Jové-Sandoval (2018), no qual o incremento foi proporcional à quantidade de partícula de grafite, sendo de cerca de 45 % para o cimento com 20% de grafite em massa, comparado à pasta sem grafite.

A comparação entre “S2” e “S3” também leva em conta o fato de que houve uma redução na fração mássica de água, além do aumento da quantidade de grafite. Já na comparação entre “S1” e “S3” e entre “S2” e “S4”, a quantidade de água é a mesma, sendo a variação do valor de condutividade térmica resultado apenas da substituição de cimento por grafite. Assim, houve incremento de 16 % para ambas as análises, ocasionado pela adição de grafite e redução na quantidade de cimento. Os valores são apresentados na Fig. 4.10 comparados a outros trabalhos. De modo que, os incrementos na condutividade térmica se assemelharam aos resultados obtidos por Flores Medina; Barbero-Barrera; Jové-Sandoval (2018). Enquanto Song et al. (2019) avaliaram um limite na quantidade de grafite, no qual, a partir desse a adição extra de grafite reduziu a condutividade térmica do compósito.

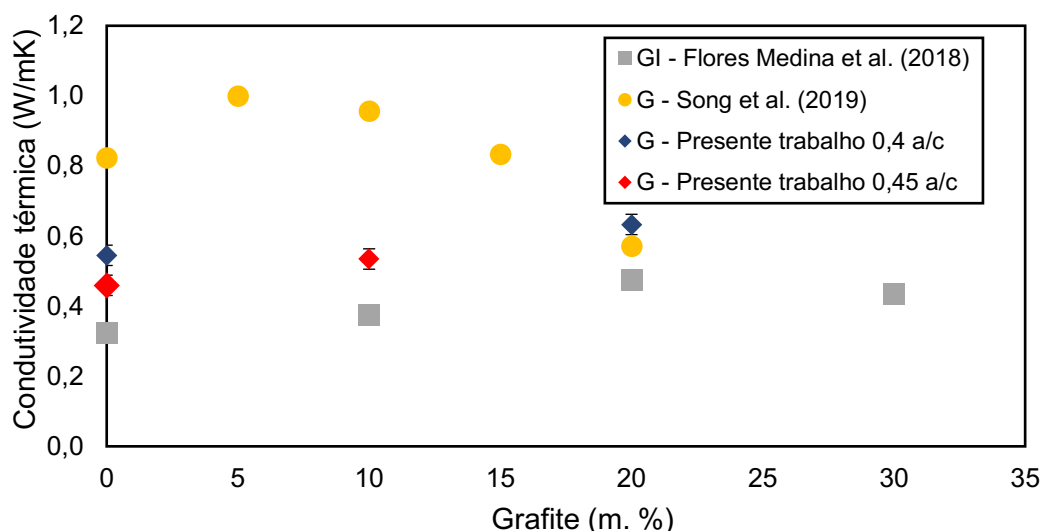


Figura 4.10 – Variação da condutividade térmica com o aumento da fração mássica de grafite

A Fig. 4.11 apresenta o ajuste linear para a difusividade térmica e massa específica. Nota-se que a difusividade térmica tende a crescer com a maior quantidade de grafite, atingindo valores superiores a $0,7 \text{ mm}^2/\text{s}$, e a reduzir com a maior fração de cimento. A fração mássica de grafite de 20 % comparado ao cimento possibilitou incremento de 53 % comparado ao cimento puro, sem alteração na quantidade de massa. A faixa de difusividade térmica medida ($0,4\text{-}0,8 \text{ mm}^2/\text{s}$) ficou próxima da obtida por Fraç et al. (2021), entre $0,6\text{-}0,9 \text{ mm}^2/\text{s}$, no entanto, os autores relataram comportamento contrário com a adição da partícula de preenchimento, devido ao fato de terem utilizado PCM com GE, o qual teve efeito negativo na difusividade com as maiores frações mássicas.

A massa específica sofre maior influência da quantidade de cimento e água utilizada na mistura, de modo que, quanto maior a quantidade de cimento maior será esta propriedade. No entanto, a variação da massa específica não é tão expressiva, ficando na faixa de 1,1 e 1,4 g/cm³, considerando a incerteza. Pelo fato dos resultados de calor específico apresentarem elevado erro estatísticos não foi considerado válido o ajuste. No entanto, a partir dos valores médios e da incerteza, observa-se que a faixa desta propriedade ficou entre 0,4 e 1,1 J/gK para as amostras analisadas.

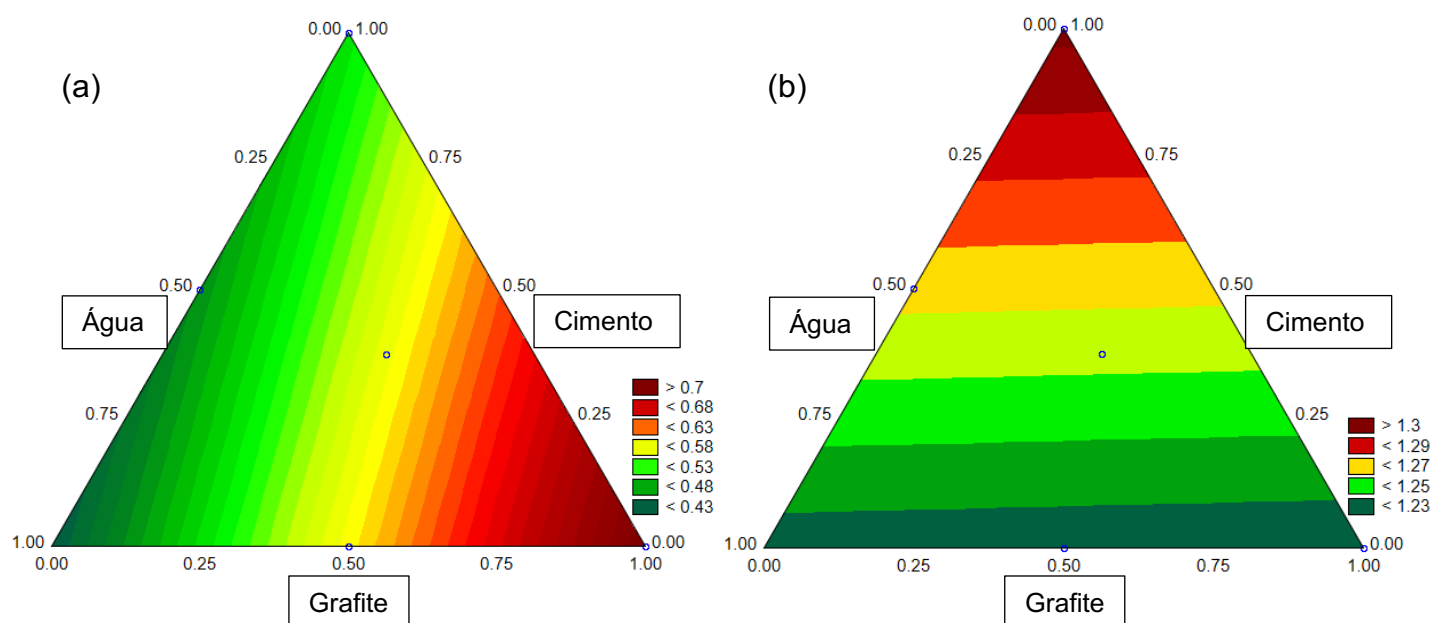


Figura 4.11 – Superfície triangular gerada para (a) difusividade térmica e (b) massa específica

Em seguida são apresentados os valores de massa medidos no momento em que os materiais foram produzidos e ao final do processo de cura. De modo que, é possível quantificar a quantidade de água, em massa, que é perdida no processo de secagem, até o instante em que o material estabiliza. A incerteza obtida através da medição da massa foi igual a $\pm 0,004$ g.

Devido ao processo de medição, cada material fabricado foi dividido em dois moldes. A massa de cada molde preenchido pelo material foi medida logo após a produção do conteúdo e ao final do processo de secagem. Logo, considerando que a massa perdida nesse período foi devido a evaporação da água contida no material, pode-se calcular quanto de água foi perdida no processo de cura. Vale ressaltar que o cimento absorve parte da água que é utilizada no processo de fabricação, de modo que essa parcela fica retida no material e tem influência nas propriedades termofísicas.

A Tab. A.2.13 apresenta as massas iniciais e finais para cada molde das amostras à base de cimento. Além de mostrar a massa de cada molde, a massa de água presente em cada amostra antes da secagem e de água perdida após o processo de cura. Observa-se que a amostra que reteve mais água foi a “S1”, retendo cerca de 23 %, sendo aquela que possui maior fração mássica de cimento (60 %), o que significa que quanto maior a quantidade de cimento mais água o material absorve, mesmo após a cura. Com relação ao restante das amostras, a proporção de água retida pelo material compósito, após uma semana de secagem, ficou entre 12,0 % e 18,5 %.

4.1.3. *Compósito de gesso*

De acordo com os experimentos anteriores ficou evidência a influência da quantidade de grafite e de água na fabricação dos compósitos com relação às propriedades dos materiais curados. No entanto, não foi avaliado o quanto a temperatura e o tempo de secagem afetam na condutividade e difusividade térmica, além da massa e calor específicos e da quantidade de água presente no material após o processo de cura. Os compósitos de gesso foram escolhidos para os experimentos, visto que foram os que propiciaram maiores valores de condutividade e difusividade térmica, além de serem os que necessitam de menor tempo de secagem. A Tab. A.2.14 mostra a quantidade de água perdida em cada molde de cada amostra, enquanto as médias e desvios obtidos para as propriedades termofísicas dos compósitos de gesso com grafite estão presentes na Tab. A.1.21.

Com a análise estatística é possível avaliar quais as variáveis que têm influência em cada propriedade dos compósitos. Desta maneira, foi realizado a análise para cada uma das propriedades separadamente. A partir do gráfico dos efeitos com os valores das normais, apresentados na Fig. 4.12, é possível ter uma boa estimativa de quais são as variáveis significativas. Aquelas que possuem erros próximos do erro estatístico não podem ser consideradas como significativas para a resposta final. Assim, fica evidente que a temperatura e o tempo de secagem não têm influência comprovada estatisticamente nos valores de condutividade e difusividade térmica. Sendo apenas a fração mássica de água e grafite as variáveis que influenciam na resposta.

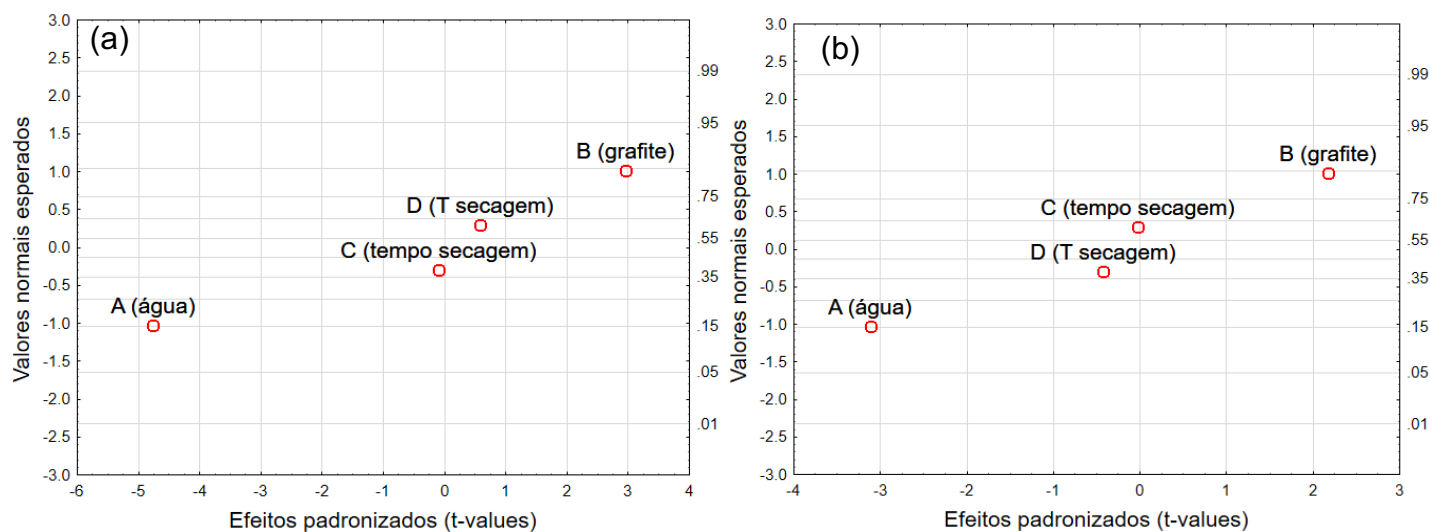


Figura 4.12 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica

Excluindo os efeitos das variáveis que não são significativas obtêm-se os coeficientes de cada variável, presentes na Tab. A.3.1. É possível concluir que quanto maior a fração mássica de água, ou seja, quanto maior a quantidade de água utilizada na produção dos compósitos de gesso com grafite, menor será a condutividade e a difusividade térmica do material. Isso porque o coeficiente equivale a cerca de -0,06 e -0,16 para condutividade e difusividade, respectivamente. Enquanto o coeficiente relacionado à fração mássica de grafite foi próximo de 0,04 para a análise de condutividade térmica e cerca de 0,11 para os valores de difusividade térmica. Portanto, a quantidade de grafite incrementa ambas as propriedades termofísicas do material.

A Fig. 4.13 apresenta os efeitos com os valores das normais para a massa e calor específico e para a perda de água no processo de secagem. Observa-se que apenas a fração mássica de água influenciou nas respostas de massa e calor específico. Excluindo os efeitos das variáveis que não são significativas obtêm-se o coeficiente relacionado a fração mássica de água. É possível concluir que quanto maior a fração mássica de água, ou seja, quanto maior a quantidade de água utilizada na produção dos compósitos de gesso com grafite, menor será a massa específica e maior será o calor específico do material. Isso porque os coeficientes equivalem a cerca de -0,13 e 0,11, respectivamente. No entanto, o erro estatístico para a análise de calor específico foi muito alto, o que inviabilizou o ajuste adequado. Desta maneira, decidiu-se não realizar a análise de regressão para esta propriedade, devido às incertezas.

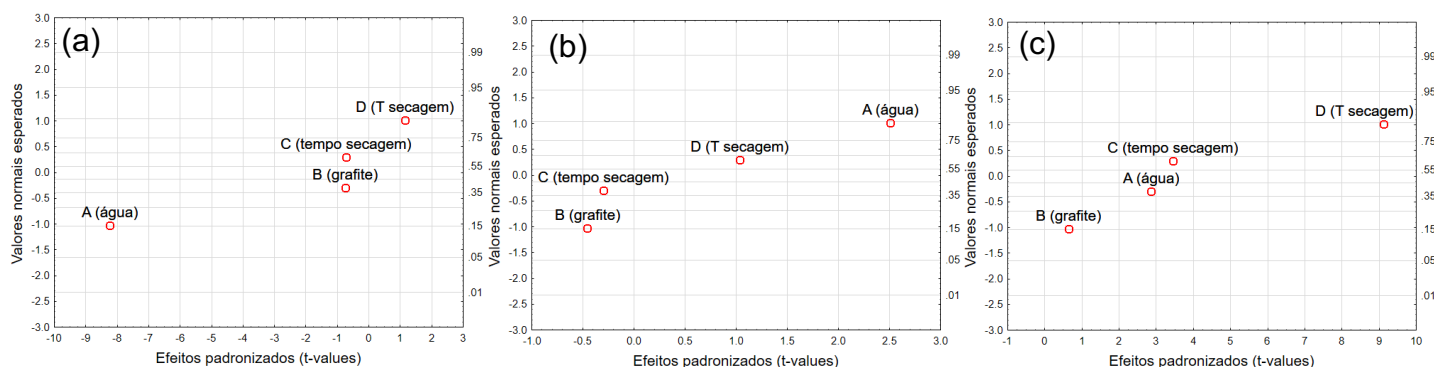


Figura 4.13 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) massa específica, (b) calor específico e (c) perda de água

Com relação à perda percentual de água nos compósitos de gesso, observou-se que apenas a fração mássica de grafite não teve influência na resposta. A partir das análises dos efeitos das demais variáveis, conclui-se que quanto maior a fração mássica de água, o tempo e a temperatura de secagem, maior será a perda de água no processo de cura. Sendo a temperatura a variável que apresentou maior coeficiente, o que indica que este é o parâmetro da produção de compósitos que tem mais influência na secagem do material. No entanto, como para as outras propriedades termofísicas a temperatura nem o tempo de secagem tiveram influência comprovada estatisticamente dentro da faixa avaliada, ambas variáveis não serão consideradas no planejamento estatístico posterior.

Avaliada as variáveis significativas para cada propriedade, foi escolhido o planejamento em três níveis considerando duas variáveis como o mais adequado para analisar os compósitos de gesso com adição de grafite, já que tanto a condutividade quanto a difusividade térmica são influenciadas apenas pela fração mássica de grafite e de água. Assim, a temperatura e o tempo de secagem pode ser qualquer valor entre a faixa analisada anteriormente. A Tab. A.2.15 mostra a quantidade de água perdida em cada molde de cada amostra, enquanto as médias e desvios obtidos para as propriedades termofísicas dos compósitos de gesso com grafite estão presentes na Tab. A.1.22.

Com a análise estatística 3^2 foi possível obter as equações mais adequadas para a condutividade térmica, difusividade térmica e massa específica. A Fig. 4.14 apresenta os efeitos de cada componente com os valores das normais para condutividade e difusividade térmica. Enquanto as superfícies de resposta das propriedades termofísicas estão presentes na Fig. 4.15. A Tab. A.3.2 reuni os coeficientes de cada variável para essa análise estatística.

Analisando quais fatores têm maior influência nessas propriedades termofísicas, a quantidade de água foi o efeito que mais interferiu nas respostas de condutividade e difusividade térmica dos compósitos de gesso. O grafite teve maior efeito na difusividade

que na condutividade térmica. Além disso, ficou evidente que para a variação dos valores de massa específica apenas a fração mássica de água interferiu nos resultados e, com exceção da análise para difusividade, não houve nenhuma comprovação estatística da influência da interação entre a porção de água e grafite nas demais propriedades.

Assim como nas análises para os compósitos à base de cal hidratado e cimento, a maior quantidade de grafite auxiliou no incremento da condutividade e difusividade térmica. Enquanto a maior porção de água utilizada na fabricação dos materiais teve efeito negativo nessas propriedades, devido ao aumento da porosidade dos compósitos.

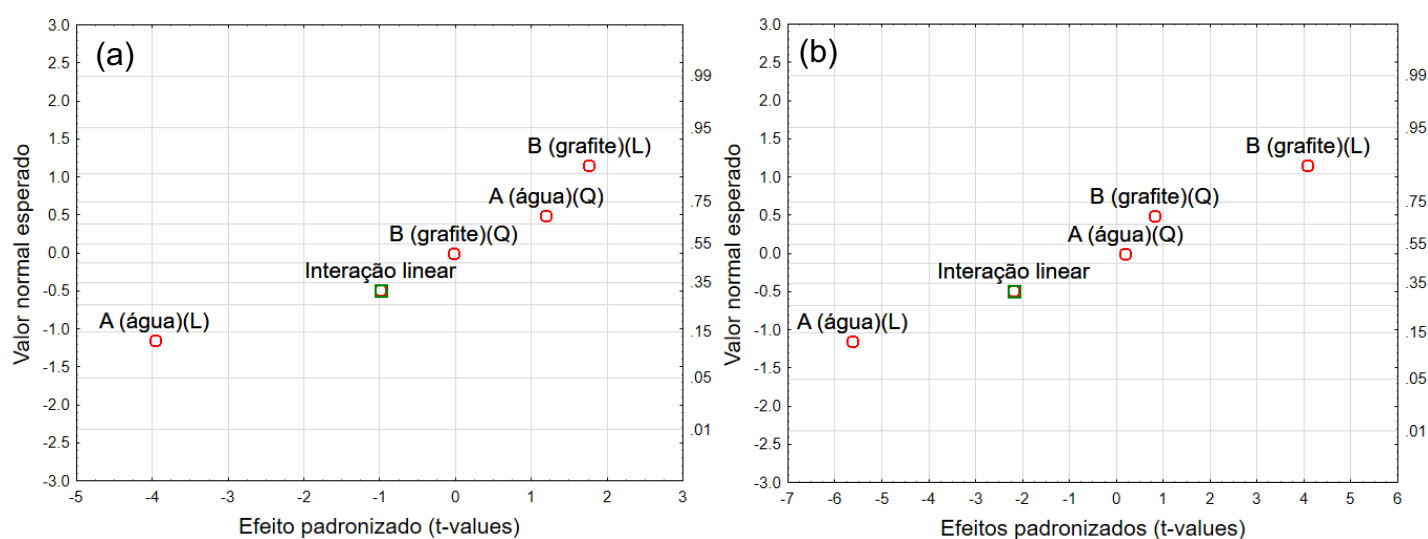


Figura 4.14 – Gráfico dos efeitos com os valores das normais (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica

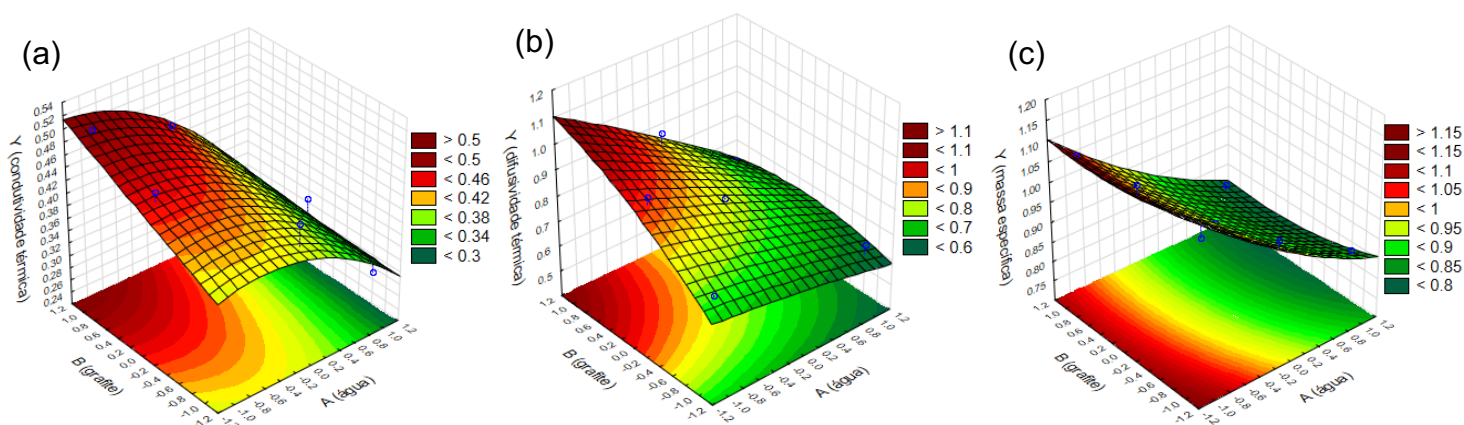


Figura 4.15 – Superfícies de resposta (a) condutividade térmica (b) difusividade térmica (c) massa específica.

4.2. Transferência de calor no material intermediário

Foram fabricados compósitos de cal hidratado com pó de grafite para análise do processo de transferência de calor no material intermediário. Foi observado a variação da temperatura do material ao longo do teste, obtido através da média dos termopares, e a diferença entre a temperatura de entrada e saída do líquido na serpentina. A partir dos valores de vazão mássica do líquido obtém-se valores estimados de calor específico para cada material. Além disso, a variação da massa dos materiais com o tempo de secagem também foi analisada no intuito de quantificar a quantidade de água remanescente e a influência dela nos resultados.

Com os experimentos do material intermediário fabricado apenas com cal hidratado e água e do compósito de cal com 20 % de grafite em massa, foi possível notar o efeito que o grafite causa no comportamento do material. As Figs. 4.16 e 4.17 apresentam os resultados para o resfriamento e o aquecimento do material intermediário, respectivamente. Com o intuito de ressaltar os diferentes resultados obtidos para cada ensaio em ambos os materiais, a Fig. 4.16 (b) apresenta a diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de resfriamento do MI em uma faixa reduzida de tempo, de 0 até 2000 s.

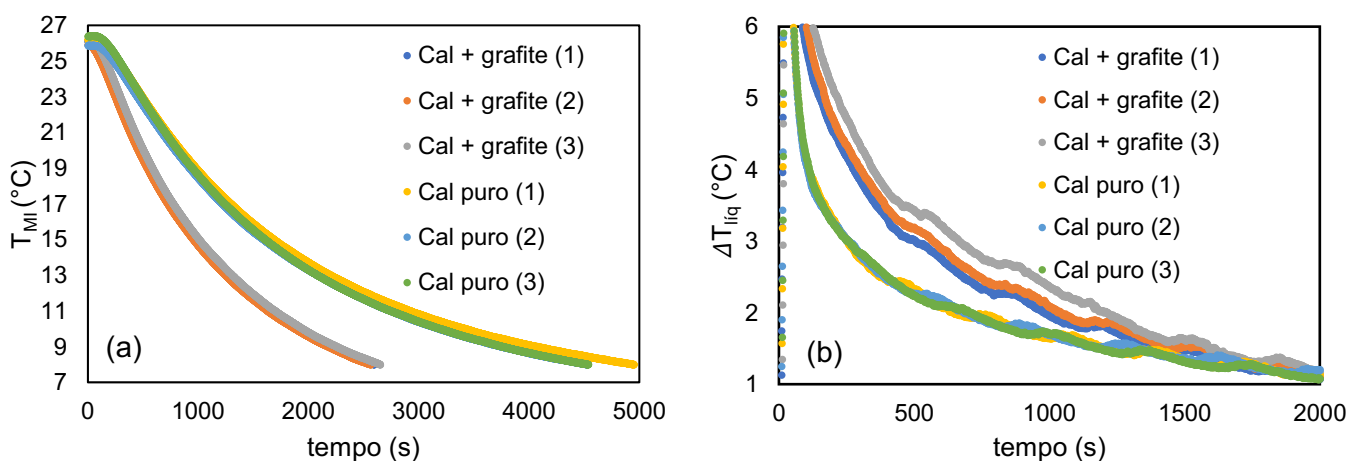


Figura 4.16 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de resfriamento do MI (cal puro e cal + grafite)

O tempo para que o material resfriasse 18 °C reduziu quase pela metade ao se adicionar grafite. Isso indica uma taxa de transferência de calor mais elevada entre o líquido e o material compósito. O aumento dessa taxa também ocorreu no aquecimento do material, reduzindo o tempo do teste para o compósito de cal com grafite. Em ambos os casos a

diferença de temperatura entre a entrada e saída do líquido na serpentina foi maior, em módulo, para o material com grafite

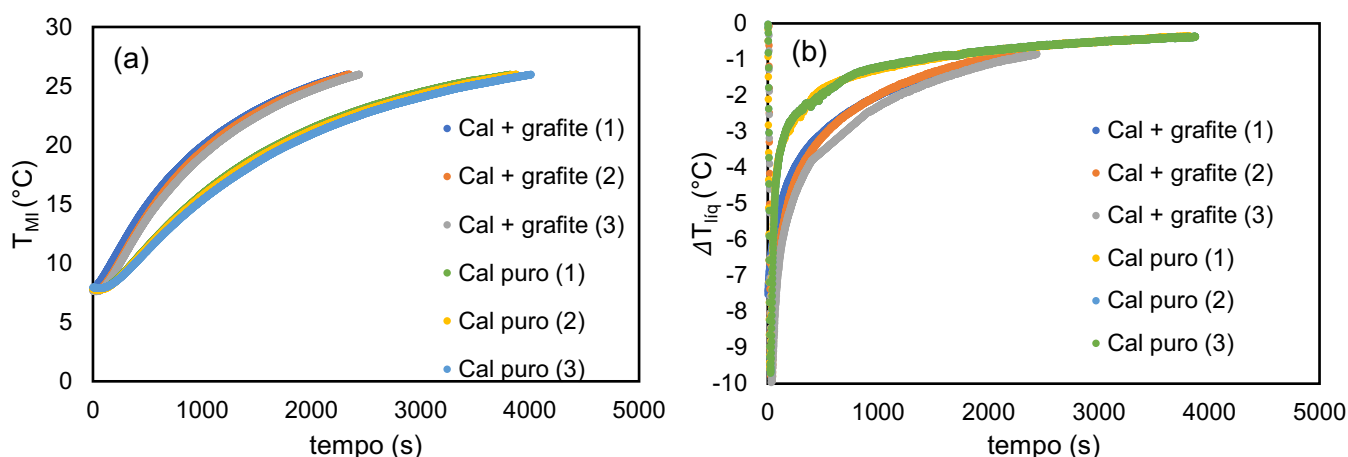


Figura 4.17 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de aquecimento do MI (cal puro e cal + grafite)

Foi observado também a influência da secagem no compósito no processo de transferência de calor. Para isso, foi fabricado um compósito com 20 % de grafite em massa e foram comparados os resultados obtidos após uma semana de secagem e após duas semanas, apresentados nas Fig. 4.18 e 4.19.

De modo geral, é possível observar que com maior tempo de secagem e uma menor fração de água no material o tempo do teste foi um pouco maior para o resfriamento e aquecimento. No entanto, teve pouca influência devido ao fato do material já estar próximo da condição de estabilização após a primeira semana de secagem. Foi observado também que a vazão mássica do líquido tem influência significativa nas respostas de temperatura do material, assim como no trabalho de Lin et al. (2020), no qual o PCM levou menos tempo para fundir com taxas de vazões mais elevados. Porém, os autores consideraram insignificante a diferença de potência com a variação das taxas de vazão e que a maior resistência à transferência de calor não está relacionada à convecção. Por outro lado, eles observaram que a redução do período de fusão e a potência de aquecimento foram muito influenciadas pela temperatura do líquido circulante. Anish et al. (2021) observaram o mesmo efeito e consideraram a baixa condutividade térmica do PCM, e consequente resistência térmica contra a transferência de calor dentro do material, o motivo da maior influência da temperatura do que da vazão do líquido no processo de transferência de calor.

No caso dos experimentos em material sólido desse trabalho, quanto maior a vazão, menor o tempo necessário para o material resfriar ou aquecer a diferença de 18 °C. A taxa de vazão e a convecção provocada pelo fluxo do líquido teve efeito na variação dos

resultados de dissipação e acúmulo de energia e nos cálculos de calor específico, analisados adiante. Relacionado ao efeito convectivo provocado pela vazão mássica de líquido, Eisapour et al. (2021) observaram que aumentar o diâmetro do tubo da serpentina pode aumentar a área do coeficiente de transferência de calor entre o trocador de calor e o material, resultando em uma maior taxa de transferência de calor. E que para essa configuração de serpentina helicoidal o uso de um tubo de retorno central na estrutura aumenta a área de transferência de calor e, mais importante, tem uma distribuição de calor uniforme no centro do material.

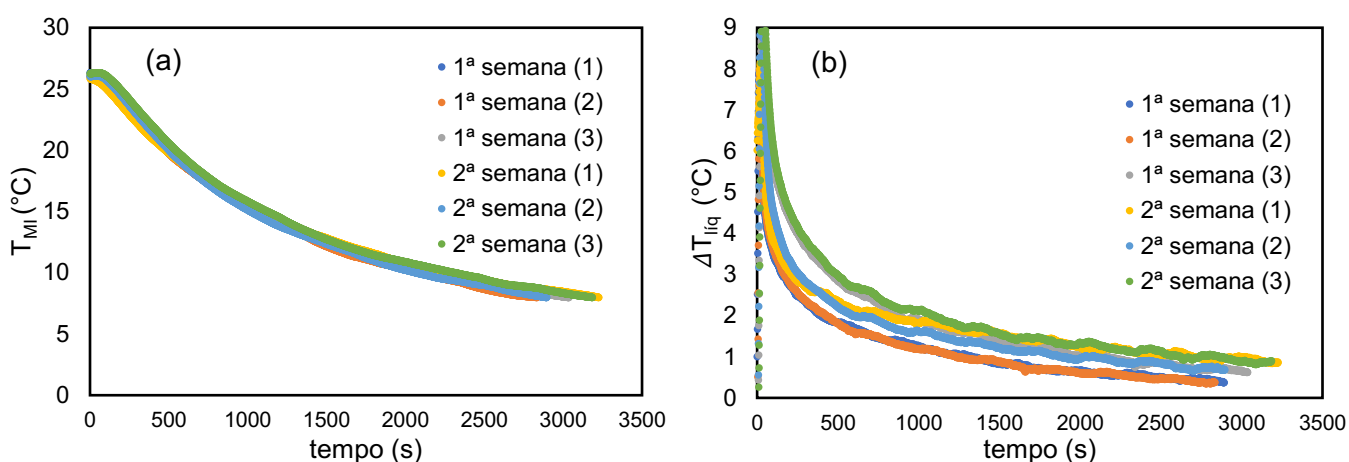


Figura 4.18 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de resfriamento do MI (cal + grafite 2) com uma e duas semanas de secagem

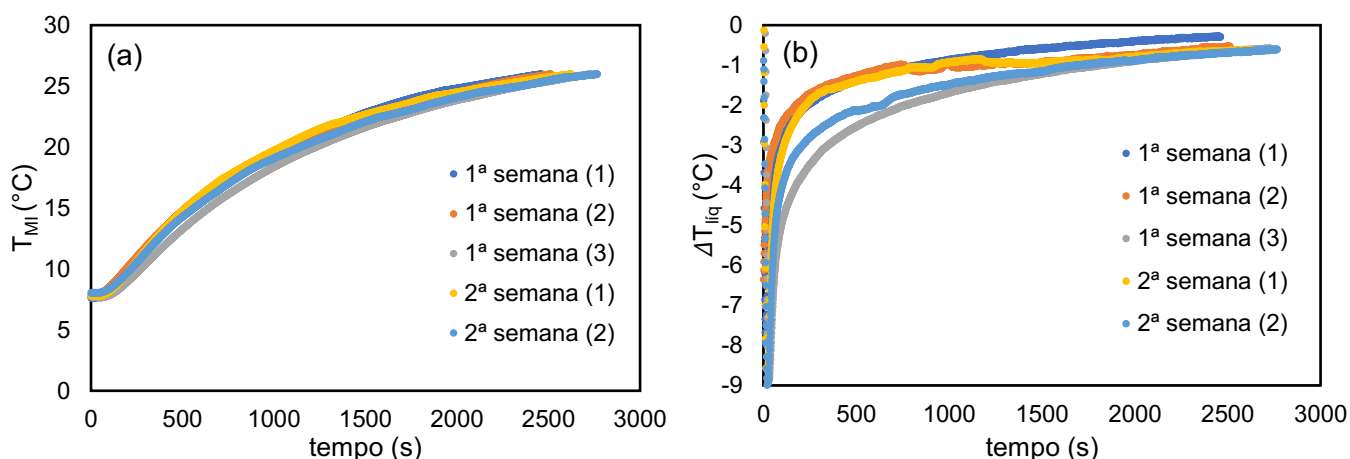


Figura 4.19 – (a) Temperatura média do material intermediário e (b) Diferença de temperatura entre a entrada e a saída do líquido no processo de aquecimento do MI (cal + grafite 2) com uma e das semanas de secagem

A variação da massa dos materiais em função do tempo de secagem no forno é apresentada na Fig. 4.20. É possível notar que o material sem adição de grafite demorou mais a estabilizar. Além disso, o segundo compósito fabricado de cal hidratado com grafite (cal + grafite 2), com maior quantidade de água na fabricação, perdeu água mais rápido. Para ambos os materiais com adição de grafite, 3 semanas no forno a 60 °C pode ser considerado um período adequado para boa estabilização do compósito com relação à variação da massa de água em sua estrutura.

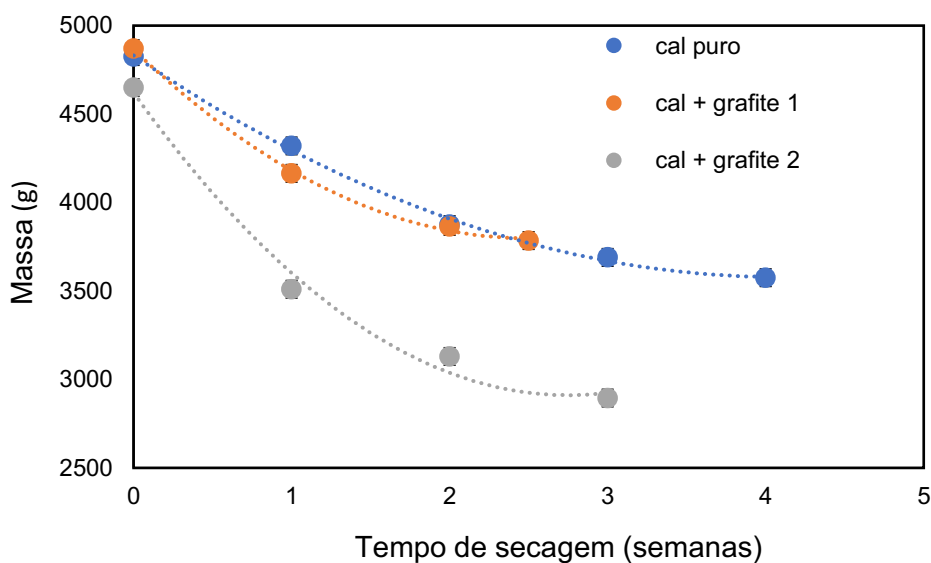


Figura 4.20 – Variação da massa dos materiais em função do tempo de secagem no forno

Também foi possível avaliar a variação da temperatura no interior do material para as diferentes posições. As Fig. 4.21 e 4.22 apresentam o perfil de temperatura no MI composto apenas por cal hidratado e no compósito de cal com 20 % de grafite e 17 dias de secagem, respectivamente. Os testes ilustrados foram realizados com vazão média próxima de 9 g/s. Foi observado que a diferença de temperatura foi mais significativa na direção radial e que o centro do MI, no interior da serpentina, foi o local onde houve maior taxa de variação de temperatura, o que indica maior transferência de calor. Notou-se que com a adição de grafite a variação de temperatura na direção longitudinal vertical foi muito pequena e que, de modo geral, assim como foi observado por Lin et al. (2020) a diferença entre as temperaturas inferidas pelas sondas foi pequena, o que indica que a distribuição de temperatura foi mais homogênea graças à melhor condutividade térmica do compósito com adição de grafite e que a resistência térmica foi menor com esse material.

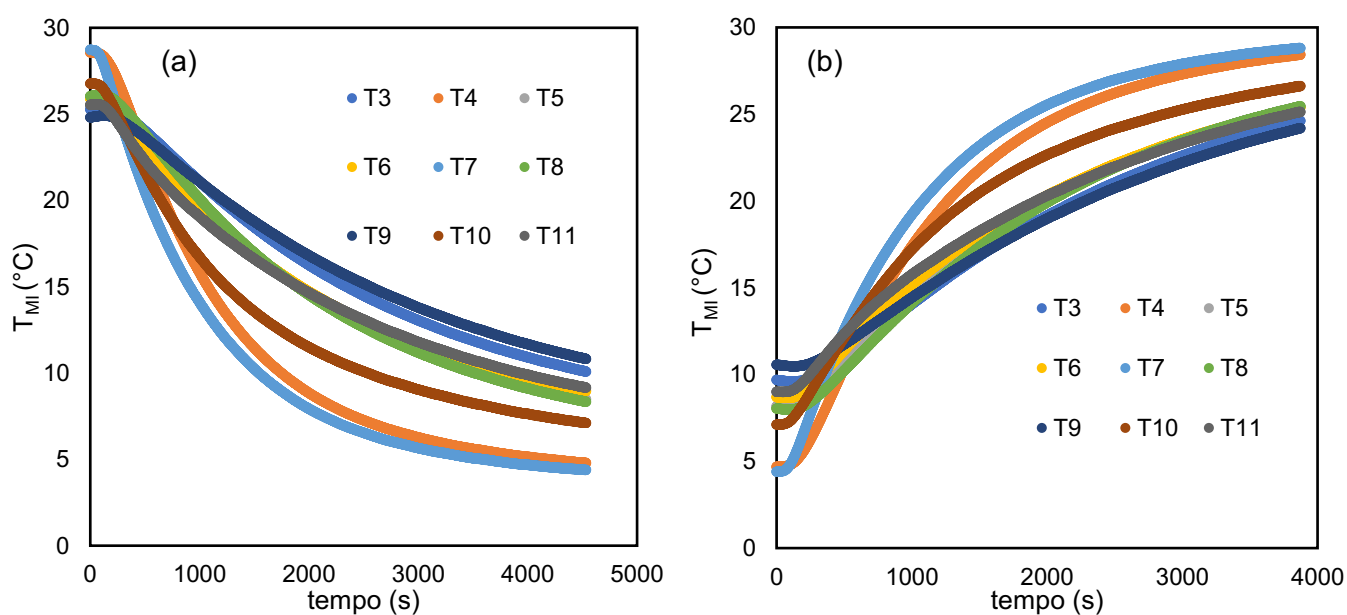


Figura 4.21 – Perfil de temperatura cal puro (a) resfriamento (b) aquecimento

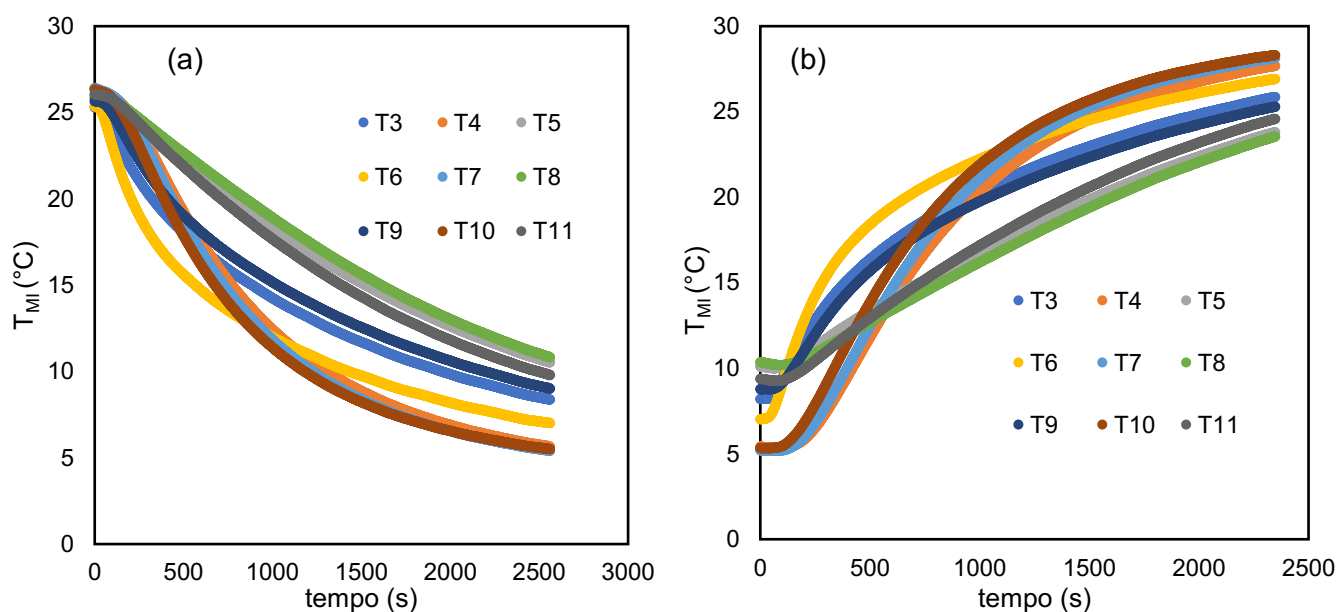


Figura 4.22 – Perfil de temperatura cal + grafite (a) resfriamento (b) aquecimento

O último material analisado possuiu as proporções de cada componente iguais ao do material intermediário aplicado no resfriador de líquido. A amostra conteve a mesma quantidade de grafite e de cal hidratado e uma massa expressivamente superior de água comparado aos outros materiais estudados. Além disso, a secagem de cerca de 20 % de água foi obtida com apenas um dia no forno a 60 °C. A Fig. 4.23 apresenta o perfil médio de temperatura no compósito para as condições de resfriamento e de aquecimento. O tempo para que o material atingisse a temperatura prevista foi semelhante àquele obtido para as outras duas amostras com grafite. O que indica novamente a eficácia da adição de grafite. Além disso, apesar da quantidade de cal hidratado ser inferior para essa amostra, o fato dos testes terem sido realizados em uma condição de umidade bem superior fez com que o material possuísse menos poros e mantivesse uma boa transferência de calor nos processos de aquecimento e resfriamento.

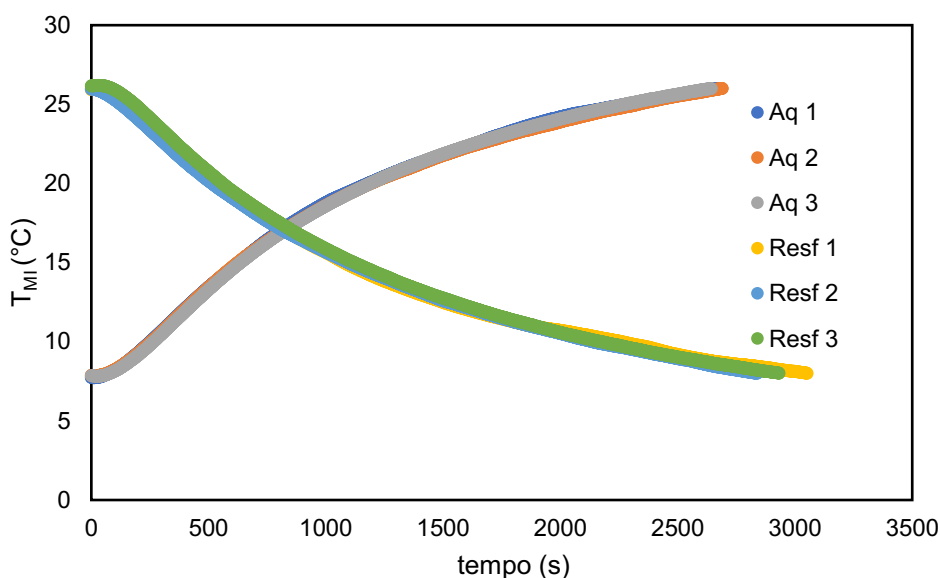


Figura 4.23 – Perfil médio de temperatura do MI (cal + grafite 3) para as condições de resfriamento e de aquecimento

A Tab. 4.1 apresenta os valores obtidos de calor específico através da energia acumulada ou dispensada pelo líquido no processo, da massa e da variação de temperatura do MI (Eq. 4.6, 4.7 e 4.8), para cada material fabricado nos processos de resfriamento e aquecimento. Suposições necessárias e razoáveis foram feitas para simplificar o cálculo, a dissipação de calor para o ambiente foi desprezada e o calor específico do líquido foi considerado constante. Os termos “ cp_{MI} ” e “ $cp_{líquido}$ ” correspondem ao calor específico do MI e do líquido, respectivamente. O segundo foi considerado constante, sendo equivalente a 3,96 kJ/kgK para a condição de resfriamento e a 3,99 kJ/kgK para o aquecimento (calculados através do EES). A temperatura de entrada e saída do líquido, além da inicial e final do MI são indicadas como “ $T_{entrada}$ ”, “ $T_{saída}$ ”, “ $T_{inicialMI}$ ” e “ $T_{finalMI}$ ”, respectivamente. A massa de MI (“ m_{MI} ”), vazão mássica do líquido (“ $\dot{m}_{líquido}$ ”), calor acumulado/dispensado pelo líquido em todo o processo (“ $Q_{líquido}$ ”), que foi estimado como equivalente ao calor trocado pelo MI, a taxa de calor (“ $\dot{Q}_{líquido}$ ”), e os instantes de tempo, iniciados em “ t_i ” e finalizados em “ t_f ” também são utilizados nas equações.

$$cp_{MI} = Q_{líquido} / (m_{MI} \cdot (T_{inicialMI} - T_{finalMI})) \quad (4.6)$$

$$\dot{Q}_{líquido} = \dot{m}_{líquido} \cdot cp_{líquido} \cdot (T_{entrada} - T_{saída}) \quad (4.7)$$

$$Q_{líquido} = \sum_{t_i}^{t_f} \dot{Q}_{líquido} \quad (4.8)$$

Houve uma diferença significativa entre os valores obtidos para as condições de aquecimento e resfriamento do material, principalmente para os testes com cal hidratado puro. Isso ocorreu pois, apesar de serem sólidos, os materiais estudados são porosos e sofrem influência da umidade e do ar preso internamente. A influência da umidade e porosidade já foram observados anteriormente e são um dos motivos para que o comportamento no aquecimento e resfriamento sejam distintos. A menor variação para as duas condições de testes foi avaliada para o material mais úmido, provavelmente devido à quantidade inferior de poros. Além disso, esse material com uma proporção elevada de água resultou em um calor específico próximo ao da água líquida pura, o que indica que no material com pouca porcentagem de secagem a água influencia diretamente nas propriedades termofísicas do compósito. As diferenças nos resultados para condições de aquecimento e resfriamento também foi avaliada nos trabalhos que estudaram os processos de transferência de calor em materiais de mudança de fase (ANISH et al., 2021; LIN et al., 2020).

A Tab. A.4.1 apresenta os parâmetros adicionais de cada teste, como a vazão mássica média do líquido, a temperatura do meio externo e o tempo decorrido dos experimentos. A variação desses valores também interfere nas médias e desvios calculados de calor específico, sendo a vazão de líquido um dos principais parâmetros que influenciam na redução ou incremento da transferência de calor.

Tabela 4.1 – Calor específico calculado através dos experimentos com cada MI

Composição MI (m.%)			t _{sec}	P _{água} (%)	Resfriamento do MI			Aquecimento do MI		
cal	água	Grafite			cp (kJ/kgK)	Média (kJ/kgK)	s (kJ/kgK)	cp (kJ/kgK)	Média (kJ/kgK)	s (kJ/kgK)
0,6	0,4	-	28 dias	62,5	3,350	3,224	0,090	2,392	2,340	0,053
					3,176			2,361		
					3,147			2,267		
0,5	0,4	0,1	17 dias	59,6	2,737	2,916	0,130	2,639	2,668	0,110
					3,044			2,815		
					2,968			2,550		
0,40	0,52	0,08	7 dias	50,8	2,601	2,747	0,207	2,001	2,217	0,309
					2,600			1,997		
			14 dias	66,1	3,039	2,654				
					3,021	2,559				
0,1875	0,6250	0,1875	1 dia	21,4	3,406	3,236	0,160	2,803	2,681	0,122
					3,282			-		
					4,112			4,012		
					4,190	4,342	0,272	4,092	4,070	0,041
					4,724			4,105		

Para finalizar a análise de transferência de calor nos materiais fabricados, a variação entre a temperatura de entrada e saída do líquido na serpentina imersa no compósito está ilustre na Fig. 4.24, para ambas as condições ensaiadas, e a Fig. 4.25 apresenta a energia total acumulada pelo líquido no processo de resfriamento do MI e aquela dispensada no processo de aquecimento do material. Os desvios foram calculados por meio dos resultados obtidos nos demais testes com os mesmos materiais intermediários. Entre parênteses, na legenda, é apresentado a porcentagem de água que evaporou dos compósitos nos processos de secagem. Em ambas as análises foram comparados os resultados para todos os materiais fabricados: cal hidratado sem adição de grafite (cal puro), o primeiro compósito produzido com grafite (cal + grafite 1), o segundo compósito com grafite (cal + grafite 2) e o ultimo material fabricado que possui as mesmas composições daquelas do compósito aplicado no resfriador de líquido (cal + grafite 3).

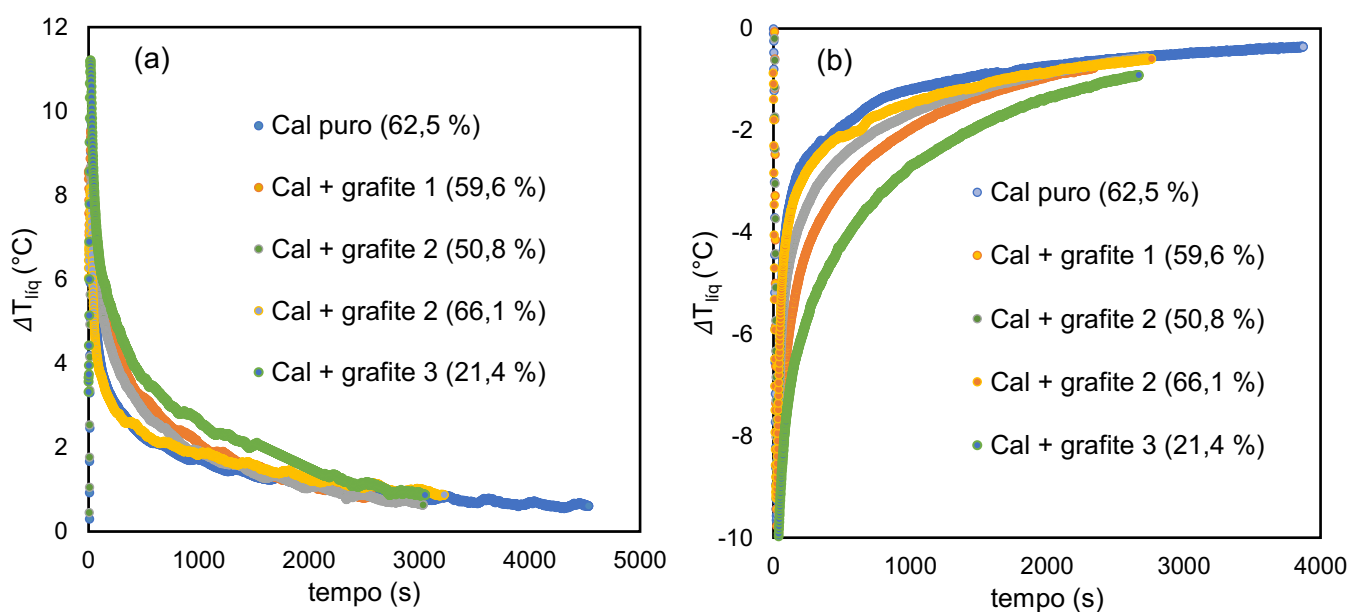


Figura 4.24 – Diferença de temperatura entre entrada e saída do líquido nos processos de (a) resfriamento do MI (b) aquecimento do MI

Foi observado maior transferência de calor no processo de resfriamento, principalmente para o cal hidratado puro. Além disso, o compósito com a segunda maior quantidade de água na fabricação e que foi submetido a secagem prolongada apresentou o menor armazenamento de energia principalmente no teste do material com 66,1 % de perda de água, indicando a influência negativa do incremento de poros na estrutura do material. Esse fenômeno observado está em coerência com os estudos de Yuan et al. (2012) e Song et al. (2019) em compósitos de cimento, nos quais foi observado redução na condutividade térmica com o incremento da razão de água sobre cimento. O que indica a relação de

proporcionalidade entre a condutividade térmica e o armazenamento de energia nesses materiais. Vale ressaltar que o material com maior umidade e menor tempo de secagem foi o que apresentou o maior armazenamento de energia e seu teste resultou na maior diferença de temperatura do líquido por instante de tempo.

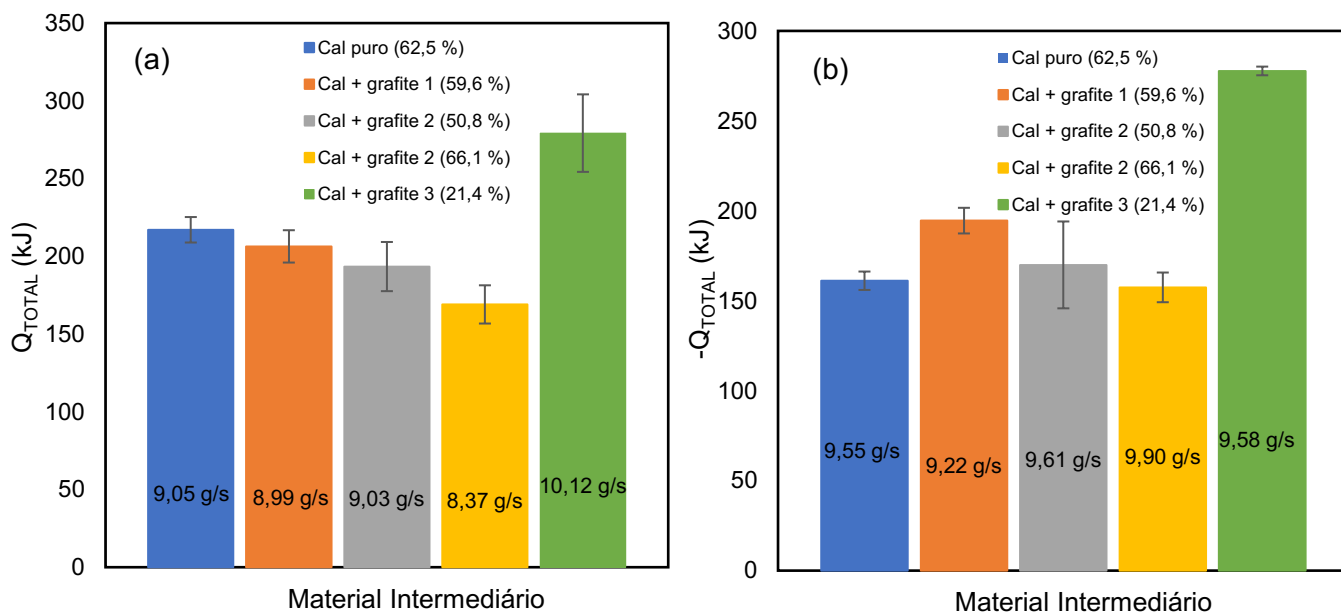


Figura 4.25 – Energia total (a) acumulada pelo líquido no resfriamento do MI (b) dispensada no aquecimento do MI

4.3. Teste de aplicação do MI no resfriador de líquido

O material compósito com grafite foi aplicado no resfriador de líquido e foram comparados os resultados do sistema operando com elevada carga de R-22 e do sistema desenvolvido para operar com reduzida carga de R-290 com auxílio do MI para aprimorar o processo de transferência de calor entre o líquido a ser resfriado e o fluido refrigerante. Dessa forma, o compósito foi aplicado no evaporador de formato cilíndrico. Nesse trocador de calor, o fluido refrigerante escoava por intermédio de tubos em contato com o MI e com as serpentinas por onde escoava o líquido, e não mais no interior de um vaso de pressão no qual havia a presença de grande quantidade de fluido refrigerante na fase líquida, como no sistema com R-22. Logo, uma das vantagens operacionais é que são eliminados os problemas relacionados ao acúmulo e à retenção do óleo lubrificante quando o fluido refrigerante na fase líquida é inundado no evaporador.

O material foi fabricado na intenção de se obter frações mássicas de água, cal hidratado e grafite iguais a 0,6250, 0,1875 e 0,1875, respectivamente. Foi produzido 7,380 kg do compósito que passou pelo processo de secagem até atingir 5,810 kg, o que equivale a uma perda de 21,2 % da massa de água. Foi possível a aplicação desse material compósito com menor tempo de secagem e maior quantidade de água devido ao fato de o evaporador ser selado após a fabricação do material e posicionamento da serpentina e sensores. Dessa forma, por ser evaporador hermético, não houve a preocupação com o processo de secagem após a construção do equipamento.

A seguir são apresentados os dados experimentais do desempenho dos resfriadores trabalhando com R-22 e com R-290. Ambas as configurações foram capazes de atingir a vazão volumétrica desejada de líquido resfriado no processo (72 l/h), além de terem apresentado temperaturas de saída dentro da faixa necessária, entre -2 °C e 3 °C.

As Fig. 4.25 (a) e (b) apontam as temperaturas de saída do líquido resfriado adquiridas pelos sensores presentes nas duas torneiras para o sistema com R-22 e com R-290, respectivamente. Nelas é possível observar que em todos os ciclos a temperatura de saída esteve próxima de zero para praticamente todos os enchimentos de copos, apresentando uma tendência bem estável, não havendo diferenças de temperaturas significativas entre os copos durante o ciclo, nem comparando os diferentes ciclos de retirada de líquido. Além disso, pode ser visto, na maioria dos ciclos, uma tendência sutil de incremento na temperatura do líquido à medida que a torneira retorna a abrir, porém não o bastante para que ultrapassasse a faixa desejada de 3 °C. Foi observado a semelhança das temperaturas de saída para ambos os sistemas.

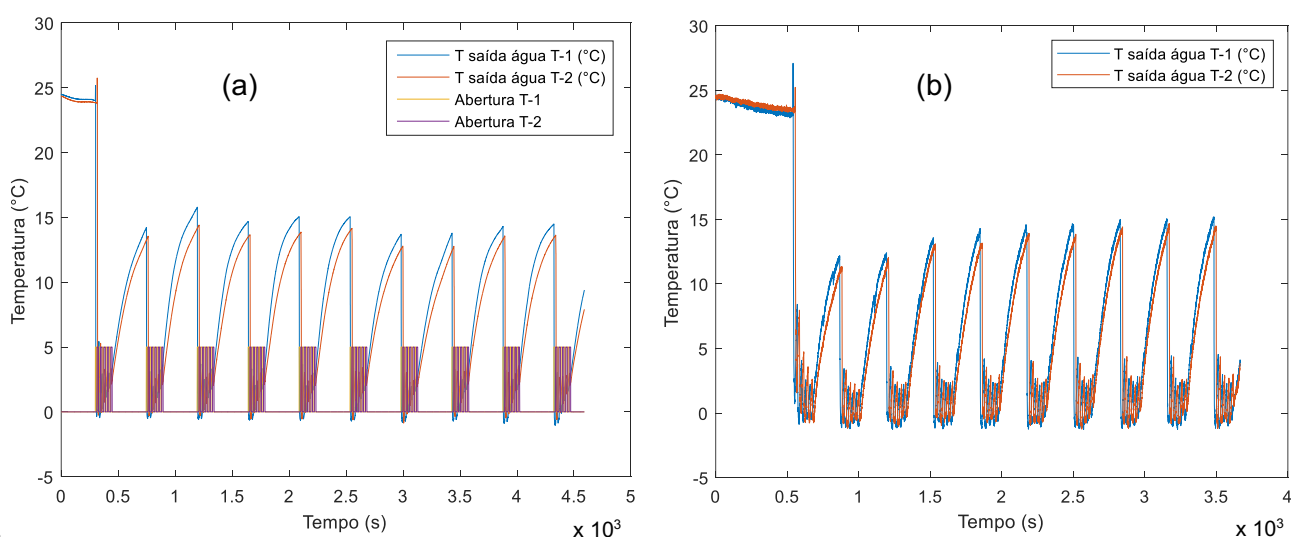


Figura 4.26 – Temperatura de saída da água no resfriador de líquido operando com (a) R-22 e (b) R-290

A temperatura dos refrigerantes R-22 e R-290 na sucção e descarga do compressor são apresentadas na Fig. 4.26 (a) e (b). As curvas nos indicam os instantes em que o compressor ligou e desligou (pelos pontos de inflexão), devido ao regime intermitente testado. A temperatura de descarga atingiu valores elevados para o R-22, ultrapassando 100 °C nos últimos ciclo. Já para o R-290, a temperatura de descarga, com exceção do primeiro momento em que o compressor esteve ligado, não superou 60 °C, o que prolonga a vida útil do compressor e integridade das propriedades do óleo (CHOUHARI; SAPALI, 2017). A redução na temperatura de descarga no compressor também foi observada em diversos outros estudos (CHEN et al., 2018; CHOUHARI; SAPALI, 2020; DEVOTTA; PADALKAR; SANE, 2005; PARK; JUNG, 2007).

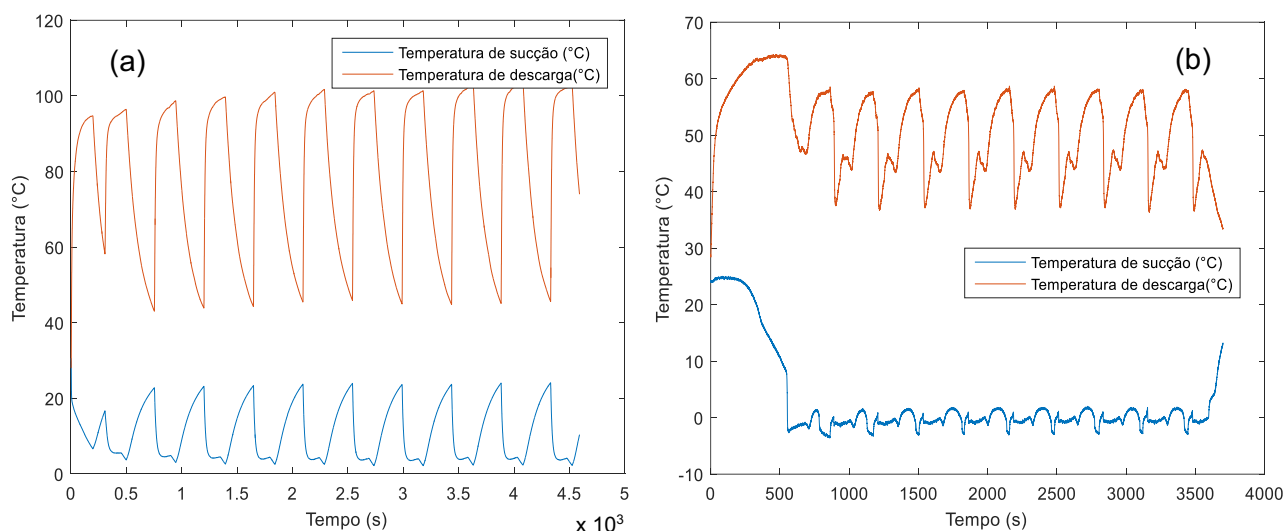


Figura 4.27 – Temperaturas de sucção e de descarga do fluido refrigerante para o (a) R-22 e (b) R-290

Os dois últimos gráficos, presentes nas Fig. 4.27 (a) e (b), apresentam a potência ativa e a corrente do compressor durante os testes. Para o sistema operando com R-22 a potência média foi de aproximadamente 1560 W, enquanto os valores aproximados para a corrente média e máxima foram de 7 A e 14 A, respectivamente. A potência média despendida pelo compressor para o resfriador projetado para operar com R-290, a partir da aplicação do MI, foi significativamente inferior, equivalente a cerca de 850 W. Ou seja, mesmo com um PDT superior, a operação desse sistema resulta em menor dispêndio de energia. Além disso, os valores aproximados para a corrente média e máxima obtidos nesse sistema foram próximos dos atingidos com o resfriador carregado de R-22. Conseqüentemente, considerando que ambos os resfriadores apresentaram praticamente a

mesma quantidade de ciclos de funcionamento do compressor e duração de teste semelhantes, essa potência média inferior no sistema com hidrocarboneto, sendo quase metade do sistema atuando com o fluido halogenado, pode ser considerada uma vantagem significativa com relação ao consumo de energia elétrica.

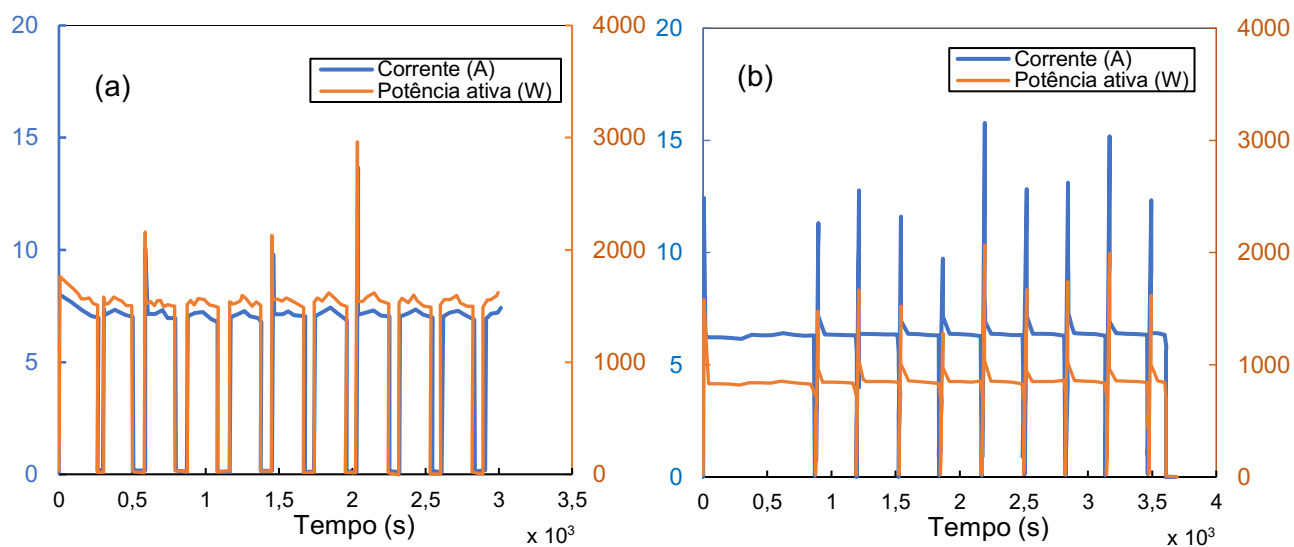


Figura 4.28 – Potência ativa e corrente gerada pelo compressor durante o teste do resfriador de líquido operando com (a) R-22 e (b) R-290

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Com o objetivo de avaliar experimentalmente o processo de transferência de calor em diversos compósitos com adição de grafite, no intuito de possibilitar a substituição de fluidos refrigerantes halogenados por fluidos naturais hidrocarbonetos em sistemas de refrigeração. A dissertação teve início a partir de uma extensa revisão bibliográfica a respeito do estado da arte dos sistemas de refrigeração por compressão de vapor e dos materiais utilizados para aprimorar processos de transferência de calor, com foco nos compósitos que utilizaram grafite como partícula de preenchimento. Foram avaliadas as propriedades termofísicas dos materiais compósitos, posteriormente, analisou-se os processos de transferência de calor nesses materiais para que por fim pudesse ser aplicado o material intermediário desenvolvido em um resfriador de líquido que substitui o fluido refrigerante halogenado R-22 pelo fluido natural hidrocarboneto R-290. Desse modo, o presente trabalho contribuiu para o melhor conhecimento da substituição do fluido refrigerante R-22 pelo R-290. Além do estudo dos materiais que podem ser aplicados para aprimorar a eficiência dos sistemas de refrigeração.

A seguir, serão apresentadas as principais conclusões referentes aos resultados da presente pesquisa:

- Nos compósitos de cal hidratado, cimento e gesso o grafite influenciou no incremento da condutividade e difusividade térmica, e a maior quantidade de água utilizada na fabricação dos materiais teve efeito negativo nessas propriedades, devido ao aumento da porosidade dos compósitos quando curados;
- Com relação às amostras estáveis e sólidas de cal hidratado, foi analisado incremento de aproximadamente 134 % na condutividade térmica comparando a amostra sem adição de pó de grafite (0,22 W/mK) com a amostra contendo a maior massa de grafite, 25 m.% (0,51 W/mK);

- Para os compósitos de gesso, foi observado incremento máximo de 106 % no caso do material com maior quantidade de pó de grafite (25 m.%), com condutividade térmica de 0,76 W/mK, visto que o gesso puro, com a mesma quantidade de água na produção resultou em condutividade térmica de 0,37 W/mK;
- Foi obtido valor absoluto de 0,63 W/mK na condutividade térmica dos compósitos de cimento com 20 m.% de grafite. Equivalente a 38 % de incremento com relação ao cimento puro com excesso de água e de 16 % com o cimento puro que utilizou a mesma quantidade de água;
- Concluiu-se que à medida que o material seca e perde água a condutividade térmica decrementa. De modo que as amostras recém produzidas e ainda contendo uma quantidade significativa de água utilizada na mistura apresentaram condutividade térmica significativamente superiores às amostras secas;
- Nos ensaios de transferência de calor no MI a diferença de temperatura entre a entrada e saída do líquido na serpentina foi maior, em módulo, para o material com grafite;
- O tempo para que o material resfriasse ou aquecesse 18 °C reduziu ao se adicionar grafite no compósito, o que evidencia o incremento da taxa de transferência de calor entre o líquido e o material compósito;
- Foi provado a influência negativa do incremento de poros na estrutura do material para a eficiência dos processos de transferência de calor;
- O MI com maior umidade e menor tempo de secagem foi o que apresentou o maior armazenamento de energia;
- A substituição do fluido refrigerante sem alterações no resfriador de líquido, não foi viável devido à elevada demanda de carga de fluido refrigerante, superior ao permitido pelas normas de segurança atuais (150 g de hidrocarboneto);
- Foi realizada a conversão do resfriador de líquido com capacidade de 72 l/h para operar com R-290, com carga reduzida;
- As temperaturas de saída do líquido medidas na saída das torneiras foram bem semelhantes para o sistema operando com R-22 e o com carga reduzida de R-290 e auxílio do MI. Em ambos sistemas essa temperatura ficou dentro da faixa desejada;
- A temperatura de descarga do propano no compressor foi bem inferior àquela observada para o R-22, contribuindo para um menor consumo de energia e podendo aumentar a vida útil do resfriador;
- Ao comparar os valores médios de potência ativa dos dois resfriadores ensaiados, o novo sistema com propano obteve valores 40 % menores comparados ao resfriador de R-22, contribuindo significativamente em termos de economia de energia.

Por fim, são expostas algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos:

- Avaliar mais matrizes em que é possível adicionar grafite e se obter compósitos com propriedades termofísicas que possibilitem aprimorar ainda mais os processos de transferência de calor, como materiais de mudança de fase;
- Desenvolver estudos que possibilitem a melhor avaliação das propriedades termofísicas de materiais pastosos que contém elevada proporção de água e aplicá-los em diversos sistemas de refrigeração;
- Desenvolver técnicas para que os materiais compósitos sejam mais estáveis e possibilitem repetibilidade e confiabilidade;
- Utilizar diferentes partículas de preenchimento em conjunto com o grafite para incrementar as propriedades termofísicas dos compósitos;
- Desenvolver processos de fabricação e secagem mais eficientes que consigam minimizar a influência da porosidade nas respostas dos compósitos produzidos;
- Aplicar o material intermediário em outros sistemas de refrigeração além de resfriadores de líquido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAS, N.; KALAIR, A.R.; KHAN, N.; HAIDER, A.; SALEEM, Z.; SALEEM, M.S. Natural and Synthetic Refrigerants, Global Warming: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 90, p. 557-569, jul. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.099>
- ALMAADEED, M.A., LABIDI, S., KRUPA, I., KARKRI, M. Effect of Expanded Graphite on the Phase Change Materials of High Density Polyethylene/Wax Blends. **Thermochemica Acta**. v. 600, p. 35-44, jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.11.023>
- ALZUWAID, F., GE, Y.T., TASSOU, S.A., RAEISI, A., GOWREESUNKER, L. The Novel Use of Phase Change Materials in a Refrigerated Display Cabinet: An Experimental Investigation. **Applied Thermal Engineering**. v. 75, p. 770–778. jan. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.028>
- ALZUWAID, F.A., GE, Y.T., TASSOU, S.A., SUN, J. The Novel Use of Phase Change Materials in an Open Type Refrigerated Display Cabinet: A Theoretical Investigation. **Applied Energy**. v. 180, p. 76–85. out. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.088>
- ANISH, R., MARIAPPAN, V., SURESH, S., JOYBARI, M.M., ABDULATEEF, A.M. Experimental Investigation on The Energy Storage/Discharge Performance of Xylitol in a Compact Spiral Coil Heat Exchanger. **International Journal of Thermal Sciences**. v. 159, n. 106633, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106633>
- ANTUNES, A.H.P., BANDARRA, E.P., MENDONZA, O.S.H., SOUZA, L.M.P., BERTONI, M.A.R. Experimental Evaluation of Refrigerants R290 , R32 and R410a in a Refrigeration System Originally Designed for R22. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HEAT TRANSFER, FLUID MECHANICS AND THERMODYNAMICS, 10, 2014, Orlando, Florida. **HEFAT2014**. p. 564–570.
- ANTUNES, A.H.P., SILVA, A. DA, BANDARRA, E.P. Experimental Evaluation of Propane, Propylene and HFC438A as Drop-in Replacements for an R22 System. In: IIR INDUSTRIAL REFRIGERATION CONFERENCE & EXHIBITION, 37, 2015, San Diego. **International Technical Paper #5**. p. 1–28.
- AZZOUZ, K., LEDUCQ, D., GOBIN, D. Enhancing The Performance of Household Refrigerators With Latent Heat Storage: An Experimental Investigation. **International**

- Journal of Refrigeration.** v. 32, p. 1634–1644, nov. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.03.012>
- AZZOUZ, K., LEDUCQ, D., GOBIN, D. Performance Enhancement of a Household Refrigerator by Addition of Latent Heat Storage. **International Journal of Refrigeration.** v. 31, p. 892–901, ago. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.09.007>
- AZZOUZ, K., LEDUCQ, D., GUILPART, J., GOBIN, D. Improving The Energy Efficiency of a Vapor Compression System Using a Phase Change Material. In: SECOND CONFERENCE ON PHASE CHANGE MATERIAL & SLURRY: SCIENTIFIC CONFERENCE & BUSINESS FORUM, 2, 2005, Yverdon-les-Bains, Switzerland. pp.11. p. 15-17.
- BAKHSIPOUR, S., VALIPOUR, M.S., PAHAMLI, Y. Parametric Analysis of Domestic Refrigerators Using PCM Heat Exchanger. **International Journal of Refrigeration.** v. 83, p. 1–13, nov. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.07.014>
- BARBERO-BARRERA, M. DEL M., FLORES-MEDINA, N., PÉREZ-VILLAR, V. Assessment of Thermal Performance of Gypsum-Based Composites With Revalorized Graphite Filler. **Construction and Building Materials.** v. 142, p. 83–91, jul. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.060>
- BISTA, S., HOSSEINI, S.E., OWENS, E., PHILLIPS, G. Performance Improvement and Energy Consumption Reduction in Refrigeration Systems Using Phase Change Material (PCM). **Applied Thermal Engineering.** v. 142, p. 723–735, set. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.068>
- BJÖRK, E., PALM, B. Refrigerant Mass Charge Distribution in a Domestic Refrigerator, Part I: Transient Conditions. **Applied Thermal Engineering.** v. 26, p. 829–837, jun. 2006.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.10.003>
- BOENG, J., RAMETTA, R.S., MELO, C., HERMES, C.J.L. Thermal-Hydraulic Characterization and System-Level Optimization of Microchannel Condensers for Household Refrigeration Applications. **Thermal Science and Engineering Progress.** v. 20, n. 100479, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100479>
- BUZELIN, L.O.S., AMICO, S.C., VARGAS, J.V.C., PARISE, J.A.R. Experimental Development of an Intelligent Refrigeration System. **International Journal of Refrigeration.** v. 28, p. 165–175, mar. 2005.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.08.013>
- CABEZA, L.F., MEHLING, H., HIEBLER, S., ZIEGLER, F. Heat Transfer Enhancement in Water When Used as PCM in Thermal Energy Storage. **Applied Thermal Engineering.** v. 22, p. 1141–1151, jul. 2002. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00035-2](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00035-2)

- CALM, J.M. Options and Outlook for Chiller Refrigerants. **International Journal of Refrigeration**. v. 25, n. 6, p. 705–715, set. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00068-8](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00068-8)
- CASTRO, J.B., URCHUEGUÍA, J.F., CORBERÁN, J.M., GONZÁLVEZ, J. Optimized Design of a Heat Exchanger for an Air-to-Water Reversible Heat Pump Working with Propane (R290) as Refrigerant: Modelling Analysis and Experimental Observations. **Applied Thermal Engineering**. v. 25, p. 2450–2462, out. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.12.009>
- CERRI, G., PALMIERI, A., MONTICELLI, E., PEZZOLI, D. Identification of Domestic Refrigerator Models Including Cool Storage. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF REFRIGERATION, 21, 2003, Washington. **Domestic applications (refrigerators, freezers)**.
- CHEN, J., GAO, X., SONG, W. Effect of Various Carbon Nanofillers and Different Filler Aspect Ratios on the Thermal Conductivity of Epoxy Matrix Nanocomposites. **Results Physics**. v. 15, n. 102771, dez. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102771>
- CHEN, J., LIU, B. Performance Evaluation of Carbon Nanoparticle-Based Thermal Interface Materials. **Diamond and Related Materials**. v. 108, n. 107976, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.107976>
- CHEN, T., LIU, B. Improvement of Thermal Conductivities for Silicone Nanocomposite Via Incorporating Poly(Γ -Methacryloxypropyltrimethoxy Silane) Grafted Graphene Fillers. **Chemical Physics Letters**. v. 693, p. 121–126, fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2018.01.027>
- CHEN, X., LIU, C., YANG, J., CHEN, J. Experimental Study on R-22, R-427A, R-161 and R-290 in Air-Source Heat Pump for Space Heating at Low Ambient Temperatures. **International Journal of Refrigeration**. v. 96, p. 147–154, dez. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.021>
- CHENG, S., WANG, S., LIU, Z. Cycle Performance of Alternative Refrigerants for Domestic Air-Conditioning System Based on a Small Finned Tube Heat Exchanger. **Applied Thermal Engineering**. v. 64, p. 83–92, mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.12.022>
- CHENG, W. LONG, DING, M., YUAN, X. DONG, HAN, B.C. Analysis of Energy Saving Performance for Household Refrigerator with Thermal Storage of Condenser and Evaporator. **Energy Conversion and Management**. v. 132, p. 180–188, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.029>
- CHENG, W.L., MEI, B.J., LIU, Y.N., HUANG, Y.H., YUAN, X.D. A Novel Household Refrigerator with Shape-Stabilized PCM (Phase Change Material) Heat Storage

- Condensers: An Experimental Investigation. **Energy**. v. 36, p. 5797–5804, out. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.050>
- CHENG, W.L., YUAN, X.D. Numerical Analysis of a Novel Household Refrigerator with Shape-Stabilized PCM (Phase Change Material) Heat Storage Condensers. **Energy**. v. 59, p. 265–276, set. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.045>
- CHENGZHOU, G., JIAOQUN, Z., WEIBING, Z., WEN, C. Fabrication and Thermal Properties of a New Heat Storage Concrete Material. **Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed**. v. 25, p. 628–630, ago. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11595-010-0058-3>
- CHOUDHARI, C., SAPALI, S.N. Experimental Study of Hydrocarbon R290 in Water Cooler Refrigeration System. **Journal of Thermal Engineering**. v. 6, p. 43–49, jan. 2020. <https://doi.org/10.18186/thermal.671137>
- CHOUDHARI, C.S., SAPALI, S.N. Performance Investigation of Natural Refrigerant R290 as a Substitute to R22 in Refrigeration Systems. **Energy Procedia**. v.109, p. 346–352, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.084>
- CHOUGAN, M., MAROTTA, E., LAMASTRA, F.R., VIVIO, F., MONTESPERELLI, G., IANNIRUBERTO, U., HAMIDREZA GAFFAR, S., AL-KHEETAN, M.J., BIANCO, A. High Performance Cementitious Nanocomposites: The Effectiveness of Nano-Graphite (nG). **Construction and Building Materials**. v. 259, n. 119687, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119687>
- COLBOURNE, D., ESPERSEN, L. Quantitative Risk Assessment of R290 in Ice Cream Cabinets. **International Journal of Refrigeration**. v. 36, p. 1208–1219, jun. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2012.10.036>
- CORBERÁN, J.M., MARTÍNEZ, I.O., GONZÁLVEZ, J. Charge Optimisation Study of a Reversible Water-to-Water Propane Heat Pump. **International Journal of Refrigeration**. v. 31, p. 716–726, jun. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.12.011>
- CORBERÁN, J.M., SEGURADO, J., COLBOURNE, D., GONZÁLVEZ, J. Review of Standards for the Use of Hydrocarbon Refrigerants in A/C, Heat Pump and Refrigeration Equipment. **International Journal of Refrigeration**. v. 31, p. 748–756, jun. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.12.007>
- COULBOURNE, D., HUEHREN, R., SCHREMPF, B., HEINEMANN, S. VON, MEENEN, S. **Orientações para Uso Seguro de Fluidos Frigoríficos Hidrocarbonetos: Um Manual para Engenheiros, Técnicos, Instrutores e Formuladores de Políticas – para uma Refrigeração e Climatização mais Sustentável**. 1.ed. Brasília: GIZ, 2015. 344p.
- COULTER, W.H., BULLARD, C.W. Experimental Analysis of Cycling Losses in Domestic

- Refrigerator-Freezers. **ASHRAE Transactions**. v. 103, p. 587–596, jun. 1997.
- DEPAIFVE, S., HERMANS, S., RUCH, D., LAACHACHI, A. Combination of Micro-Computed X-ray Tomography and Electronic Microscopy to Understand the Influence of Graphene Nanoplatelets on the Thermal Conductivity of Epoxy Composites. **Thermochemica Acta**. v. 691, n. 178712. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178712>
- DEVOTTA, S., PADALKAR, A.S., SANE, N.K. Performance Assessment of HC-290 as a Drop-in Substitute to HCFC-22 in a Window Air Conditioner. **International Journal of Refrigeration**. v. 28, p. 594–604, jun. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.09.013>
- DU, K., CALAUTIT, J., WANG, Z., WU, Y., LIU, H. A Review of the Applications of Phase Change Materials in Cooling, Heating and Power Generation in Different Temperature Ranges. **Applied Energy**. v. 220, p. 242–273, jun. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.03.005>
- DU, Z., SHE, W., ZUO, W., HONG, J., ZHANG, Y., MIAO, C. Foamed Gypsum Composite with Heat-Resistant Admixture Under High Temperature: Mechanical, Thermal and Deformation Performances. **Cement and Concrete Composites**. v. 108, n. 103549, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103549>
- DUBBA, S.K., KUMAR, R. Flow of Refrigerants Through Capillary Tubes: A State-of-the-Art. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 81, p. 370–381, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.09.012>
- EISAPOUR, A.H., NAGHIZADEH, A., EISAPOUR, M., TALEBIZADEHSARDARI, P. Optimal Design of a Metal Hydride Hydrogen Storage Bed Using a Helical Coil Heat Exchanger Along with a Central Return Tube During the Absorption Process. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 46, p. 14478–14493, fev. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.170>
- ELAREM, R., MELLOULI, S., ABHILASH, E., JEMNI, A. Performance Analysis of a Household Refrigerator Integrating a PCM Heat Exchanger. **Applied Thermal Engineering**. v. 125, p. 1320–1333, out. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.113>
- ELBEL, S., HRNJAK, P. Natural Refrigerants for Light Commercial Applications: A Fair Comparison of the Pros & Cons of CO₂ and Propane. **Refrigeration Science and Technology**. v. 3, p. 618–625, jan. 2016. <https://doi.org/10.18462/iir.gl.2016.1099>
- ELGENDY, E., HASSANAIN, M., FATOUH, M. Assessment of R-438A as a Retrofit Refrigerant for R-22 in Direct Expansion Water Chiller. **International Journal of Refrigeration**. v. 50, p. 127–136, jul. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.07.017>
- FARID, M.M., KHUDHAIR, A.M., RAZACK, S.A.K., AL-HALLAJ, S. A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications. **Energy Conversion and**

- Management.** v. 45, p. 1597–1615, jun. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- FERNANDO, P., PALM, B., LUNDQVIST, P., GRANRYD, E. Propane Heat Pump with Low Refrigerant Charge: Design and Laboratory Tests. **International Journal of Refrigeration.** v. 27, p. 761–773, nov. 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.06.012>
- FLORES MEDINA, N., BARBERO-BARRERA, M.M. Mechanical and Physical Enhancement of Gypsum Composites Through a Synergic Work of Polypropylene Fiber and Recycled Isostatic Graphite Filler. **Construction and Building Materials.** v. 131, p. 165–177, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.073>
- FLORES MEDINA, N., BARBERO-BARRERA, M.M., BUSTAMANTE, R. Improvement of the Properties of Gypsum-Based Composites with Recycled Isostatic Graphite Powder from the Milling Production of Molds for Electrical Discharge Machining (EDM) Used as a New Filler. **Construction and Building Materials.** v. 107, p. 17–27, dez. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.194>
- FLORES MEDINA, N., BARBERO-BARRERA, M.M., JOVÉ-SANDOVAL, F. Improvement of the Mechanical and Physical Properties of Cement Pastes and Mortars Through the Addition Isostatic Graphite. **Construction and Building Materials.** v. 189, p. 898–905, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.055>
- FRAÇ, M., PICHÓR, W., SZOŁDRA, P., SZUDEK, W., 2021. Cement Composites with Expanded Graphite/Paraffin as Storage Heater. **Construction and Building Materials.** v. 275, n. 122126, mar. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122126>
- FU, Y.X., HE, Z.X., MO, D.C., LU, S.S. Thermal Conductivity Enhancement with Different Fillers for Epoxy Resin Adhesives. **Applied Thermal Engineering.** v. 66, p. 493–498, mai. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.02.044>
- FUENTES, Y.P., ELBEL, S., HRNJAK, P. Extremely Low Refrigerant Charge Beverage Display Cooler Technology Using Propane. In: INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE, 7, 2014, Perdue. **Paper 1495.** p. 193–201.
- GAO, B.Z., XU, J.Z., PENG, J.J., KANG, F.Y., DU, H.D., LI, J., CHIANG, S.W., XU, C.J., HU, N., NING, X.S. Experimental and Theoretical Studies of Effective Thermal Conductivity of Composites Made of Silicone Rubber and Al₂O₃ Particles. **Thermochimica Acta.** v. 614, p. 1–8, ago. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.06.005>
- GE, T., ZHANG, M., TANG, K., TANG, H. Diisocyanate-Modified Graphene Oxide/Hydroxyl-Terminated Silicone Rubber Composites for Improved Thermal Conductivity. **Materials Chemistry and Physics.** v. 252, n. 123250, set. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123250>

- GIN, B., FARID, M.M.. The Use of PCM Panels to Improve Storage Condition of Frozen Food. **Journal of Food Engineering**. v. 100, p. 372–376, set. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.04.016>
- GOMES, M.G., FLORES-COLEN, I., MANGA, L.M., SOARES, A., DE BRITO, J. The Influence of Moisture Content on the Thermal Conductivity of External Thermal Mortars. **Construction and Building Materials**. v. 135, p. 279–286, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.166>
- GRANRYD, E. Hydrocarbons as Refrigerants - an Overview. **International Journal of Refrigeration**. v. 24, p. 15–24, jan. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00065-7](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00065-7)
- GUO, C.X., MA, X.L., YANG, L. PCM/ Graphite Foam Composite for Thermal Energy Storage Device. In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 87, 2015, Beijing, China. **Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM2015)**. p. 16–18. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/87/1/012014>
- GUO, L., ZHANG, Z., LI, M., KANG, R., CHEN, Y., SONG, G., HAN, S.T., LIN, C. TE, JIANG, N., YU, J. Extremely High Thermal Conductivity of Carbon Fiber/Epoxy with Synergistic Effect of MXenes by Freeze-Drying. **Composites Communications**. v. 19, p. 134–141, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.03.009>
- GUO, Y., RUAN, K., SHI, X., YANG, X., GU, J. Factors Affecting Thermal Conductivities of the Polymers and Polymer Composites: A Review. **Composites Science and Technology**. v. 193, n. 108134, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108134>
- GUPTA, S., PENDYALA, S., 2020. Flammability Issue of Hydrocarbons in Air Conditioning Industry. **Materials Today: Proceedings**. v. 28, p. 2247-2250, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.555>
- GUSYACHKIN, A.M., SABITOV, L.S., KHAKIMOVA, A.M., HAYRULLIN, A.R., 2019. Effects of Moisture Content on Thermal Conductivity of Thermal Insulation Materials. In: IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 570, 2019, Kazan, Russia. **International Scientific-Technical Conference on Innovative Engineering Technologies, Equipment and Materials 2018 (ISTC-IETEM-2018)**. p. 5–7. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/570/1/012029>
- HAITAO, H., ZHANCHENG, L., FEILONG, Z., SONG, C., GUOLIANG, D., DAWEI, Z. Optimization of Tube Bundle Arrangement for Flooded Shell-and-Tube Evaporator. In: 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED ENERGY – ICAE2017, 9, 2017, Cardiff. **Energy Procedia** 142. p. 3799–3804.

- HARBY, K. Hydrocarbons and Their Mixtures as Alternatives to Environmental Unfriendly Halogenated Refrigerants: An Updated Overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 73, p. 1247–1264, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.039>
- HE, J., WANG, H., QU, Q., SU, Z., QIN, T., TIAN, X., 2020. Three-Dimensional Network Constructed by Vertically Oriented Multilayer Graphene and SiC Nanowires for Improving Thermal Conductivity and Operating Safety of Epoxy Composites with Ultralow Loading. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 139, n. 106062, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.106062>
- HE, M.G., SONG, X.Z., LIU, H., ZHANG, Y., 2014. Application of Natural Refrigerant Propane and Propane/Isobutane in Large Capacity Chest Freezer. **Applied Thermal Engineering**. v. 70, p. 732–736, set. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.05.097>
- HE, Y., ZHANG, X., ZHANG, Y., SONG, Q., LIAO, X., 2016. Utilization of Lauric Acid-Myristic Acid/Expanded Graphite Phase Change Materials to Improve Thermal Properties of Cement Mortar. **Energy Build**. v. 133, p. 547–558, dez. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.016>
- ACRC - AIR CONDITIONING AND REFRIGERATION CENTER. **Charge Minimization in Systems and Components Using Hydrocarbons as a Refrigerant**. University of Illinois, 2004. 192p. Technical Report.
- HRNJAK, P., LITCH, A.D. Microchannel Heat Exchangers for Charge Minimization in Air-cooled Ammonia Condensers and Chillers. **International Journal of Refrigeration**. v. 31, p. 658–668, jun. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.12.012>
- ILLÁN-GÓMEZ, F., GARCÍA-CASCALES, J.R., HIDALGO-MOMPEÁN, F., LÓPEZ-BELCHÍ, A. Experimental Assessment of the Replacement of a Conventional Fin-and-Tube Condenser by a Minichannel Heat Exchanger in an Air/Water Chiller for Residential Air Conditioning. **Energy Build**. v. 144, p. 104–116, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.041>
- JAKOBSEN, A. **Energy Optimisation of Refrigeration Systems. The Domestic Refrigerator - a Case Study**. 1995. 193 f. Thesis (ph.d.) - Technical Univ. of Denmark, Lyngby.
- JANSSEN, M.J.P., WIT, J.A. DE, KUIJPERS, L.J.M. Cycling Losses in Domestic Appliances : an Experimental and Theoretical Analysis. **International Journal of Refrigeration**, v. 15, n. 3, p. 152-158, 1992.
- JEON, D., KIM, S.H., CHOI, W., BYON, C. An Experimental Study on the Thermal Performance of Cellulose-Graphene-Based Thermal Interface Materials. **International**

- Journal of Heat and Mass Transfer.** v. 132, p. 944–951, abr. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2018.12.061>
- JEONG, S.G., CHANG, S.J., WI, S., LEE, J., KIM, S. Energy Performance Evaluation of Heat-Storage Gypsum Board with Hybrid SSPCM Composite. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry.** v. 51, p. 237–243, jul. 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.03.007>
- JING, H., HUA, W., QIQI, Q., ZHENG, S., TENGFEI, Q., YUNSHENG, D., XINGYOU, T. Construction of Interconnected SiC Particles Attached rGO Structure in Epoxy Composites to Achieve Significant Thermal Conductivity Enhancement. **Materials Today Communications.** v. 25, n. 101584, dez. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101584>
- JOYBARI, M.M., HAGHIGHAT, F., MOFFAT, J., SRA, P. Heat and Cold Storage Using Phase Change Materials in Domestic Refrigeration Systems: The State-of-the-Art Review. **Energy Build.** v. 106, p. 111–124, nov. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.016>
- JUNG, D., KIM, C.B., SONG, K., PARK, B. Testing of Propane/Isobutane Mixture in Domestic Refrigerators. **International Journal of Refrigeration.** v. 23, p. 517–527, nov. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(99\)00084-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(99)00084-5)
- JWO, C.S., TING, C.C., WANG, W.R. Efficiency Analysis of Home Refrigerators by Replacing Hydrocarbon Refrigerants. **Journal of the International Measurement Confederation.** v. 42, p. 697–701, jun. 2009.
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2008.11.006>
- KHAN, I.H., AFROZ, H.M.M., 2015. Effect of Phase Change Material on Compressor On-Off Cycling of a Household Refrigerator. **Science and Technology for the Built Environment.** v. 21, p. 462–468, mai. 2015.
<https://doi.org/10.1080/23744731.2015.1023161>
- KIM, S.H., RHEE, K.Y., PARK, S.J. Amine-Terminated Chain-Grafted Nanodiamond/Epoxy Nanocomposites as Interfacial Materials: Thermal Conductivity and Fracture Resistance. **Composites Part B: Engineering.** v. 192, n. 107983, mar. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107983>
- KORTH, T., LOISTL, F., STORCH, A., SCHEX, R., KRÖNAUER, A., SCHWEIGLER, C. Capacity Enhancement of Air Conditioning Systems by Direct Integration of a Latent Heat Storage Unit. **Applied Thermal Engineering.** v. 167, n. 114727, fev. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114727>
- LAMPUGNANI, G., ZGLICZYNSKI, M. R290 as a Substitute of R502 and R22 in Commercial Refrigeration and Air Conditioning. In: INTERNATIONAL COMPRESSOR

- ENGINEERING CONFERENCE, 1996, West Lafayette, Indiana. **Paper 1087**. p. 1–7.
- LAZZARIN, R.M., MANCIN, S., NORO, M., RIGHETTI, G., 2018. Hybrid PCM-Aluminium Foams' Thermal Storages: An Experimental Study. **International Journal of Low-Carbon Technologies**. v. 13, p. 286–291, jul. 2018. <https://doi.org/10.1093/IJLCT/CTY030>
- LEMMON, E.W., HUBER, M.L., MCLINDEN, M.O. NIST Standard Reference Database 23, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), version 9.0, **National Institute of Standards and Technology**. 2010.
- LIN, W., LING, Z., ZHANG, Z., FANG, X. Experimental and Numerical Investigation of Sebacic Acid/Expanded Graphite Composite Phase Change Material in a Double-Spiral Coiled Heat Exchanger. **Journal of Energy Storage**. v. 32, n. 101849, dez. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101849>
- LIN, W., WANG, Q., FANG, X., GAO, X., ZHANG, Z. Experimental and Numerical Investigation on the Novel Latent Heat Exchanger with Paraffin/Expanded Graphite Composite. **Applied Thermal Engineering**. v. 144, p. 836–844, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.103>
- LIU, Y., CHEN, Z., SHEN, Y., ZHOU, Y., WANG, D., LEI, Z., FENG, W., MIN, Z. Silicone-Based Alumina Composites Synthesized Through in Situ Polymerization for High Thermal Conductivity and Thermal Stability. **Materials Letters**. v.261, n.127002, fev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127002>
- LIU, Y., LU, J., CUI, Y. Improved Thermal Conductivity of Epoxy Resin by Graphene–Nickel Three-Dimensional Filler. **Carbon Resources Conversion**. v. 3, p. 29–35, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.crcon.2019.12.003>
- LIU, Z., HU, D., LV, H., ZHANG, Y., WU, F., SHEN, D., FU, P. Mixed Mill-Heating Fabrication and Thermal Energy Storage of Diatomite/Paraffin Phase Change Composite Incorporated Gypsum-Based Materials. **Applied Thermal Engineering**. v.118, p. 703–713, mai. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.02.057>
- LÓPEZ-BELCHÍ, A., ILLÁN-GÓMEZ, F., GARCÍA-CASCALES, J.R., VERA-GARCÍA, F. Condensing Two-Phase Pressure Drop and Heat Transfer Coefficient of Propane in a Horizontal Multiport Mini-Channel Tube: Experimental Measurements. **International Journal of Refrigeration**. v. 68, p. 59–75, ago. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.03.015>
- MA, J., SHANG, T., REN, L., YAO, Y., ZHANG, T., XIE, J., ZHANG, B., ZENG, X., SUN, R., XU, J. BIN, WONG, C.P. Through-Plane Assembly of Carbon Fibers into 3D Skeleton Achieving Enhanced Thermal Conductivity of a Thermal Interface Material. **Chemical Engineering Journal**. v. 380, n. 122550, jan. 2020.

- <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122550>
- MAĐERIĆ, D., PAVKOVIĆ, B., LENIĆ, K. An Experimental Research on Energy Efficiency of a Beverage Cooler with the Latent Heat Storage. **Applied Thermal Engineering**. v. 148, p. 270–277, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.026>
- MAHDI, J.M., NSOFOR, E.C. Solidification Enhancement in a Triplex-Tube Latent Heat Energy Storage System Using Nanoparticles-Metal Foam Combination. **Energy**. v. 126, p. 501–512, mai. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.03.060>
- MARQUES, A.C., DAVIES, G.F., MAIDMENT, G.G., EVANS, J.A., WOOD, I.D. Novel Design and Performance Enhancement of Domestic Refrigerators with Thermal Storage. **Applied Thermal Engineering**. v. 63, p. 511–519, dez. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.11.043>
- MARTÍNEZ-GALVÁN, I., GONZÁLVEZ-MACIÁ, J., CORBERÁN, J.M., ROYO-PASTOR, R. Oil Type Influence on the Optimal Charge and Performance of a Propane Chiller. **International Journal of Refrigeration**. v. 34, p. 1000–1007, jan. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.01.012>
- MU, Q., FENG, S. Thermal Conductivity of Graphite/Silicone Rubber Prepared by Solution Intercalation. **Thermochimica Acta**. v. 462, p. 70–75, out. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.06.006>
- NIYAJ, D.S., SAPALI, S.N. Performance Evaluation of a Domestic Refrigerator with a Thermal Storage Arrangement Using Propane as a Refrigerant. **Energy Procedia**. v. 109, p. 34–39, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.045>
- ORÓ, E., DE GRACIA, A., CASTELL, A., FARID, M.M., CABEZA, L.F. Review on Phase Change Materials (PCMs) for Cold Thermal Energy Storage Applications. **Applied Energy**. v. 99, p. 513–533, nov. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058>
- OYEDEPO, S., FAGBENLE, R., BABARINDE, T., ODUNFA, K., OYEGBILE, A., LERAMO, R., BABALOLA, P., KILANKO, O., ADEKEYE, T. Effect of Capillary Tube Length and Refrigerant Charge on the Performance of Domestic Refrigerator with R12 and R600a. **International Journal of Advanced Thermofluid Research**. v. 2, p. 2–14, ago. 2016.
- PADALKAR, A.S., MALI, K. V., DEVOTTA, S., 2014. Simulated and Experimental Performance of Split Packaged Air Conditioner Using Refrigerant HC-290 as a Substitute for HCFC-22. **Applied Thermal Engineering**. v. 62, p. 277–284, jan. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.09.017>
- PALM, B. Hydrocarbons as Refrigerants in Small Heat Pump and Refrigeration Systems - A Review. **International Journal of Refrigeration**. v. 31, p. 552–563, jun. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.11.016>
- PALM, B. Refrigeration Systems With Minimum Charge of Refrigerant. **Applied Thermal**

- Engineering.** v. 27, p. 1693–1701, jul. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.07.017>
- PARK, C.Y., HRNJAK, P. Experimental and Numerical Study on Microchannel and Round-Tube Condensers in a R410A Residential Air-Conditioning System. **International Journal of Refrigeration.** v. 31, p. 822–831, ago. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2007.10.007>
- PARK, K.J., JUNG, D. Thermodynamic Performance of HCFC22 Alternative Refrigerants for Residential Air-Conditioning Applications. **Energy Build.** v. 39, p. 675–680, jun. 2007.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2006.10.003>
- PAVKOVIC, B. Refrigerants - Part 1: Properties and Air-Conditioning Applications. **REHVA Journal.** p. 7–11, jan. 2013.
- PINTO, E.S., BANDARRA, E.P., MARCUCCI, D.F. Fluidos Frigoríficos Alternativos para Equipamentos de Refrigeração Comercial (R-290). In: PROGRAMA BRASILEIRO DE ELIMINAÇÃO DOS HCFCs, 2019, Brasil. **Workshop Propano (R-290).** p. 1-17.
- RAHMAN, R., HOSSAIN, M.A., DAS, S., HASAN, A. Performance Improvement of a Domestic Refrigerator Using Phase change Material (PCM). **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering.** v. 10, p. 8-16, jan. 2013.
<https://doi.org/10.9790/1684-1040816>
- REGIN, A.F., SOLANKI, S.C., SAINI, J.S. Heat Transfer Characteristics of Thermal Energy Storage System Using PCM Capsules: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews.** v. 12, p. 2438–2458, dez. 2008.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.009>
- REN, J., LI, Q., YAN, L., JIA, L., HUANG, X., ZHAO, L., RAN, Q., FU, M. Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites by Introducing Graphene@Boron Nitride Nanosheets Hybrid Nanoparticles. **Materials & Design.** v. 191, n. 108663, jun. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108663>
- ROLOTTI, G. Blend, Glide and Flooded Evaporators. **RSES Journal.** p. 14–17. jul, 2014.
- RUAN, J., LIU, J., XU, X., CHEN, J., LI, G. Experimental Study of an R290 Split-Type Air Conditioner Using a Falling Film Condenser. **Applied Thermal Engineering.** v. 140, p. 325–333, mai. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.022>
- SARBU, I. A Review on Substitution Strategy of Non-Ecological Refrigerants from Vapour Compression-Based Refrigeration, Air-Conditioning and Heat Pump Systems. **International Journal of Refrigeration.** v. 46, p. 123–141, out. 2014.
<https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.04.023>
- SHAO, L.L., YANG, L., ZHANG, C.L., GU, B. Numerical Modeling of Serpentine Microchannel Condensers. **International Journal of Refrigeration.** v. 32, p. 1162–

- 1172, set. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2009.02.007>
- SHI, J., LIU, Y., LIU, B., HAN, D. Temperature Effect on the Thermal Conductivity of Expanded Polystyrene Foamed Concrete: Experimental Investigation and Model Correction. **Advances in Materials Science and Engineering**. p. 1-9, jun. 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/8292379>
- SONG, J., CHEN, C., ZHANG, Y. High Thermal Conductivity and Stretchability of Layer-by-Layer Assembled Silicone Rubber/Graphene Nanosheets Multilayered Films. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 105, p. 1–8, fev. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.11.001>
- SONG, J., ZHANG, Y. Vertically Aligned Silicon Carbide Nanowires/Reduced Graphene Oxide Networks for Enhancing the Thermal Conductivity of Silicone Rubber Composites. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**. v. 133, n. 105873, jun. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105873>
- SONG, X., ZHENG, R., LI, R., LI, G., SUN, B., SHI, Y., WANG, G., ZHOU, S. Study on Thermal Conductivity of Cement with Thermal Conductive Materials in Geothermal Well. **Geothermics**. v. 81, p. 1–11, set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.04.001>
- SONNENREIN, G., BAUMHÖGGER, E., ELSNER, A., FIEBACK, K., MORBACH, A., PAUL, A., VRABEC, J. Copolymer-Bound Phase Change Materials for Household Refrigerating Appliances: Experimental Investigation of Power Consumption, Temperature Distribution and Demand Side Management Potential. **International Journal of Refrigeration**. v. 60, p. 166–173, dez. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.06.030>
- TANG, W., HE, G., CAI, D., ZHU, Y., ZHANG, A., TIAN, Q. The Experimental Investigation of Refrigerant Distribution and Leaking Characteristics of R290 in Split Type Household Air Conditioner. **Applied Thermal Engineering**. v. 115, p. 72–80, mar. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.12.083>
- TANG, W., HE, G., ZHOU, S., SUN, W., CAI, D., MEI, K. The Performance and Risk Assessment of R290 in a 13 kW Air Source Heat Pump. **Applied Thermal Engineering**. v. 144, p. 392–402, nov. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.08.070>
- TENG, T.P., MO, H.E., LIN, H., TSENG, Y.H., LIU, R.H., LONG, Y.F. Retrofit Assessment of Window Air Conditioner. **Applied Thermal Engineering**. v. 32, p. 100–107, jan. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.08.036>
- THIRY, J. **Method and Device for Cooling Beverages**. US20100000246A1. Depósito: 19 fev. 2008. Concessão: 07 jan. 2010.

- TIAN, L., WANG, Y., LI, Z., MEI, H., SHANG, Y. The Thermal Conductivity-Dependant Drag Reduction Mechanism of Water Droplets Controlled by Graphene/Silicone Rubber Composites. **Experimental Thermal and Fluid Science**. v. 85, p. 363–369, jul. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2017.03.021>
- TOSUN, M., DOĞAN, B., ÖZTÜRK, M.M., ERBAY, L.B. Integration of a Mini-Channel Condenser into a Household Refrigerator with Regard to Accurate Capillary Tube Length and Refrigerant Amount. **International Journal of Refrigeration**. v. 98, p. 428–435, fev. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.11.012>
- TULAPURKAR, C., SUBRAMANIAM, P.R., THAGAMANI, G., THIYAGARANJIN, R. Phase Change Materials For Domestic Refrigerators to Improve Food Wuality and Prolong Compressor Off Time. In: INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE, 13, 2010, West Lafayette, Indiana. **Paper 1044**. p. 1-8.
- VAHEDI, A., SADR LAHIDJANI, M.H., SHAKHESI, S. Multiscale Modeling of Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Epoxy Nanocomposites. **Physica B: Condensed Matter**. v. 550, p. 39–46, set. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2018.09.017>
- VISEK, M., ELBEL, S., HRNJAK, P. Conversion of Cold Beverage Dispenser ' s Refrigeration System to R744 Refrigerant. In: INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE, 16, 2016, West Lafayette, Indiana. **Paper 1794**. p. 1-10.
- VISEK, M., JOPPOLO, C.M., MOLINAROLI, L., OLIVANI, A. Advanced Sequential Dual Evaporator Domestic Refrigerator/Freezer: System Energy Optimization. **International Journal of Refrigeration**. v. 43, p. 71–79, jul. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.03.001>
- WANG, F., MAIDMENT, G., MISSENDEN, J., TOZER, R. The Novel Use of Phase Change Materials in Refrigeration Plant. Part 3: PCM for Control and Energy Savings. **Applied Thermal Engineering**. v. 27, p. 2911–2918, dez. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.06.010>
- WANG, R., XIE, C., LUO, S., XU, H., GOU, B., ZENG, L. Preparation and Properties of MWCNTs-BNNSs/Epoxy Composites with High Thermal Conductivity and Low Dielectric Loss. **Materials Today Communications**. v. 24, n. 100985, set. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100985>
- WANG, Y., CUI, Y.J., TANG, A.M., TANG, C.S., BENAHMED, N. Changes in Thermal Conductivity, Suction and Microstructure of a Compacted Lime-Treated Silty Soil During Curing. **Engineering Geology**. v. 202, p. 114–121, mar. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.01.008>

- WEI, B., ZHANG, L., YANG, S. Polymer Composites with Expanded Graphite Network with Superior Thermal Conductivity and Electromagnetic Interference Shielding Performance. **Chemical Engineering Journal**. v. 404, n. 126437, jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126437>
- WEI, J., ZHAO, L., ZHANG, Q., NIE, Z., HAO, L. Enhanced Thermoelectric Properties of Cement-Based Composites with Expanded Graphite for Climate Adaptation and Large-Scale Energy Harvesting. **Energy Build**. v. 159, p. 66–74, jan. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.032>
- WEI, Z., XIE, W., GE, B., ZHANG, Z., YANG, W., XIA, H., WANG, B., JIN, H., GAO, N., SHI, Z. Enhanced Thermal Conductivity of Epoxy Composites by Constructing Aluminum Nitride Honeycomb Reinforcements. **Composites Science and Technology**. v. 199, n. 108304, out. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2020.108304>
- XU, B., WANG, Y., CHEN, J., LI, F., LI, D., PAN, X. Investigation of Domestic Air Conditioner with a Novel Low Charge Microchannel Condenser Suitable for Hydrocarbon Refrigerant. **Journal of the International Measurement Confederation**. v. 90, p. 338–348, abr. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.034>
- YAN, G., LIU, Y., QIAN, S., YU, J. Theoretical Study on a Vapor Compression Refrigeration System with Cold Storage for Freezer Applications. **Applied Thermal Engineering**. v. 160, n. 114091, set. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114091>
- YEOM, Y.S., CHO, K.Y., SEO, H.Y., LEE, J.S., IM, D.H., NAM, C.Y., YOON, H.G. Unprecedentedly High Thermal Conductivity of Carbon/Epoxy Composites Derived from Parameter Optimization Studies. **Composites Science and Technology**. v. 186, n. 107915, jan. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107915>
- YETGIN, H., VEZIROGLU, S., AKTAS, O.C., YALÇINKAYA, T. Enhancing Thermal Conductivity of Epoxy with a Binary Filler System of h-BN Platelets and Al₂O₃ Nanoparticles. **International Journal of Adhesion and Adhesives**. v. 98, n. 102540, abr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2019.102540>
- YUAN, H., LU, C., XU, Z., NI, Y., LAN, X. Mechanical and Thermal Properties of Cement Composite Graphite for Solar Thermal Storage Materials. **Solar Energy**. v. 86, n. 11, p. 3227–3233, nov. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.011>
- YUAN, X.D., CHENG, W.L. Multi-Objective Optimization of Household Refrigerator with Novel Heat-Storage Condensers by Genetic Algorithm. **Energy Conversion and Management**. v. 84, p. 550–561, ago. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.04.086>
- YUSUFOGLU, Y., APAYDIN, T., YILMAZ, S., PAKSOY, H.O. Improving Performance of Household Refrigerators by Incorporating Phase Change Materials. **International**

- Journal of Refrigeration.** v. 57, p. 173–185, set. 2015.
<https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2015.04.020>
- ZARAJABAD, O.G., AHMADI, R. Employment of Finned PCM Container in a Household Refrigerator as a Cold Thermal Energy Storage System. **Thermal Science and Engineering Progress.** v. 7, p. 115–124, set. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.tsep.2018.06.002>
- ZHANG, H., LIN, Y., ZHANG, D., WANG, W., XING, Y., LIN, J., HONG, H., LI, C. Graphene Nanosheet/Silicone Composite with Enhanced Thermal Conductivity and its Application in Heat Dissipation of High-Power Light-Emitting Diodes. **Current Applied Physics.** v. 16, p. 1695–1702, out. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cap.2016.10.004>
- ZHANG, W., YANG, Z., LI, J., REN, C.X., LV, D., WANG, J., ZHANG, X., WU, W. Research on the Flammability Hazards of an Air Conditioner Using Refrigerant R-290. **International Journal of Refrigeration.** v. 36, p. 1483–1494, ago. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2013.03.015>
- ZHANG, W., YANG, Z., ZHANG, X., LV, D., JIANG, N. Experimental Research on the Explosion Characteristics in the Indoor and Outdoor Units of a Split Air Conditioner Using the R290 Refrigerant. **International Journal of Refrigeration.** v. 67, p. 408–417, jul. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2016.03.018>
- ZHANG, Z., FANG, X. Study on Paraffin/Expanded Graphite Composite Phase Change Thermal Energy Storage Material. **Energy Conversion and Management.** v. 47, p. 303–310, fev. 2006. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.03.004>
- ZHANG, Z., SHI, G., WANG, S., FANG, X., LIU, X. Thermal Energy Storage Cement Mortar Containing n-Octadecane/Expanded Graphite Composite Phase Change Material. **Renewable Energy.** v. 50, p. 670–675, fev. 2013.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.024>
- ZHAO, L., SHI, X., YIN, Y., JIANG, B., HUANG, Y. A Self-Healing Silicone/BN Composite with Efficient Healing Property and Improved Thermal Conductivities. **Composites Science and Technology.** v. 186, n. 107919, jan. 2020.
<https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107919>
- ZHOU, G., ZHANG, Y. Performance of a Split-Type Air Conditioner Matched with Coiled Adiabatic Capillary Tubes Using HCFC22 and HC290. **Applied Energy.** v. 87, p. 1522–1528, mai. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.005>
- ZHOU, W., GAN, Z. A Potential Approach for Reducing the R290 Charge in Air Conditioners and Heat Pumps. **International Journal of Refrigeration.** v. 101, p. 47–55, mai. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.iirefrig.2019.02.030>

ANEXO I

PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS MATERIAIS

Tabela A.1.1 – Propriedades termofísicas dos materiais utilizados na validação do condutímetro

Material	Condutividade térmica			Difusividade térmica			Calor específico [J/gK]		
	[W/mK]			[mm ² /s]					
	Esperado	Medido	Desvio	Esperado	Medido	Desvio	Esperado	Medido	Desvio
PMMA	0,1940	0,1947	0,0007	0,1120	0,1159	0,0039	1,359	1,413	0,054
EPS	0,0313	0,0299	0,0014	-	0,3948	-	-	3,026	-
AF/Armaflex BR	0,0350	0,0369	0,0016	-	0,2057	-	-	3,589	-

Tabela A.1.2 – Propriedades termofísicas dos compósitos de cal hidratado variando as frações mássicas de grafite (considerando apenas a secagem inicial)

Fração mássica (grafite/cal)	Perda de água na secagem [g]	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm ² /s]	Massa específica [g/cm ³]	Calor específico [J/gK]
0	20,166	0,5116	0,8761	1,283	0,4589
1/4	9,364	2,3686	1,0808	1,637	1,3532
1/8	8,710	1,7287	0,5773	1,646	1,8210
1/12	9,672	1,2578	0,5453	1,315	1,7868
1/16	10,106	1,4083	0,5938	1,523	1,5568
1/20	12,098	1,0101	0,7204	1,428	1,0303

Tabela A.1.3 – Propriedades termofísicas dos compósitos de cal hidratado, considerando a variação das propriedades com o passar dos dias, devido à perda de água

Fração mássica (grafite/cal)	Dias após a primeira medição	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
0	0	0,5116	0,8761	1,283	0,4589
	1	0,2418	0,5752	1,121	0,3755
	2	0,2300	0,5069	1,114	0,4197
	3	0,2219	0,6481	1,119	0,3063
1/4	0	2,3686	1,0808	1,637	1,3532
	1	1,1900	2,4813	1,471	0,3274
	2	0,7800	1,6750	1,338	0,3487
	3	0,5982	1,3363	1,264	0,3542
1/8	0	1,7287	0,5773	1,646	1,8210
	1	0,7727	1,0390	1,385	0,5449
	2	0,6486	0,9635	1,216	0,5536
	3	0,4537	0,8629	1,192	0,4410
1/12	0	1,2578	0,5453	1,315	1,7868
	4	0,3048	0,7427	1,017	0,4049
	5	0,3243	0,6136	1,020	0,5222
	6	0,3173	0,7173	1,023	0,4325
1/16	0	1,4083	0,5938	1,523	1,5568
	1	0,7261	0,7498	1,352	0,7179
	2	0,5853	0,8348	1,201	0,5840
	3	0,4093	0,7527	1,125	0,4836
1/20	0	1,0101	0,7204	1,428	1,0303
	1	0,6626	0,7593	1,180	0,7401
	2	0,4044	0,7574	1,074	0,5001
	5	0,3174	0,4246	1,045	0,7367

Tabela A.1.4 – Propriedades termofísicas dos compósitos de cal hidratado variando as frações mássicas de grafite (considerando os últimos resultados das medições iniciais)

Fração mássica (grafite/cal)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
0	0,2219	0,6481	1,119	0,3063
1/4	0,5982	1,3363	1,264	0,3542
1/8	0,4537	0,8629	1,192	0,4410
1/12	0,3173	0,7173	1,023	0,4325
1/16	0,4093	0,7527	1,125	0,4836
1/20	0,3174	0,4246	1,045	0,7367

Tabela A.1.5 – Propriedades termofísicas dos compósitos de cal hidratado variando as frações mássicas de grafite (considerando as últimas medições, amostras estáveis)

Fração mássica (grafite/cal)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
0	0,2202	0,5728	1,187	0,3241
1/4	0,5145	1,3607	1,254	0,3016
1/8	0,4010	0,8147	1,204	0,4089
1/12	0,3388	0,3569	1,045	0,9083
1/16	0,2994	0,7177	1,101	0,3811
1/20	0,2984	0,7453	1,083	0,3698

Tabela A.1.6 – Propriedades termofísicas obtidos para as amostras de cal com grafite estáveis medidas em dias diferentes

Fração mássica (grafite/cal)	Dia	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
	1	0,2907	0,7327	1,100	0,3607
1/16	2	0,2994	0,7177	1,101	0,3811
1/8	1	0,3959	0,7608	1,202	0,4334
	2	0,4010	0,8147	1,204	0,4089

Tabela A.1.7 – Propriedades termofísicas da mistura cal e água, considerando a variação das propriedades com o passar dos dias devido à perda de água

Amostras	Dias após a primeira medição	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0	0,5116	0,8761	1,283	0,4589
	1	0,2418	0,5752	1,121	0,3755
	2	0,2300	0,5069	1,114	0,4197
	3	0,2219	0,6481	1,119	0,3063
2 ^a	0	0,8461	0,4686	1,488	1,2160
	1	0,5620	0,7771	1,345	0,5442
	4	0,2133	0,6703	1,093	0,2943
	5	0,2150	0,6711	1,093	0,2960
3 ^a	0	0,8725	0,3233	1,474	1,8421
	1	0,4570	0,8068	1,251	0,4528
	2	0,2895	0,6291	1,113	0,4144
	3	0,1987	0,6983	1,073	0,2653

Tabela A.1.8 – Propriedades termofísicas da mistura cal e água, considerando a medição das amostras estáveis em dias distintos

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0,2202	0,5728	1,187	0,3241
2 ^a	0,2209	0,5477	1,155	0,3494
3 ^a	0,1800	0,6749	1,075	0,2481
Méd ± 2s	0,2070 ± 0,0468	0,5985 ± 0,1348	1,139 ± 0,115	0,3072 ± 0,1054

Tabela A.1.9 – Propriedades temofísicas da mistura cal e água, considerando a medição das amostras estáveis no mesmo dia (intervalo com nível de confiança de 95 %)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0,2085	0,5771	1,192	0,3037
2 ^a	0,1987	0,6543	1,164	0,2628
3 ^a	0,1800	0,6749	1,075	0,2481
Méd ± 2s	0,1957 ± 0,0236	0,6354 ± 0,0842	1,144 ± 0,100	0,2715 ± 0,0470

Tabela A.1.10 – Propriedades temofísicas dos compósitos de cal hidratado com as três menores frações mássicas de grafite e com tempo de forno de 25 horas – logo após retirada do forno

Fração mássica (grafite/cal)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1/12	1,3738	0,6931	1,278	1,5849
1/16	1,0753	0,5227	1,288	1,6868
1/20	1,0030	0,4668	1,304	1,6477

Tabela A.1.11 – Propriedades temofísicas dos compósitos de cal hidratado com as três menores frações mássicas de grafite e com tempo de forno de 25 horas – amostras estáveis

Fração mássica (grafite/cal)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1/12	0,3923	0,6981	0,970	0,6024
1/16	0,3289	0,4079	1,000	0,8094
1/20	0,2910	0,6044	0,970	0,5722

Tabela A.1.12 – Propriedades termofísicas das amostras de gesso variando a fração mássica de água

Fração (gesso/água)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1/1	0,2858	0,5602	0,975	0,5286
4/3	0,3699	0,5302	1,047	0,6681
3/2	0,3730	0,5361	1,073	0,6484
2/1	0,4286	0,7371	1,100	0,5339

Tabela A.1.13 – Propriedades termofísicas da amostra de gesso fabricada com fração mássica de 2/1 (gesso/água)

Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
0,4286	0,7371	1,100	0,5339
0,4336	0,7224	1,192	0,5042
0,4209	0,8256	1,191	0,4288

Tabela A.1.14 – Propriedades termofísicas dos compósitos de gesso com fração mássica de grafite 1/20 em diferentes níveis de secagem

Dias pós fabricação	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
2	0,6678	0,4618	0,909	1,5908
5	0,4302	0,5394	0,862	0,9337
10	0,4093	0,6186	0,858	0,7712
12	0,4249	0,5565	0,859	0,8891

Tabela A.1.15 – Propriedades termofísicas dos compósitos de gesso variando as frações mássicas de grafite

Fração mássica (grafite/gesso)	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
0	0,3699	0,5302	1,047	0,6681
1/4	0,7627	1,6077	1,302	0,3665
1/8	0,5199	1,1810	1,108	0,3991
1/12	0,4723	0,7362	1,081	0,5938
1/16	0,4378	0,6763	0,989	0,6571
1/20	0,4249	0,5565	0,859	0,8891

Tabela A.1.16 – Propriedades termofísicas dos compósitos de cal hidratado com fração mássica de 5 % de grafite (para nível de confiança de 95 %).

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0,2984	0,7453	1,083	0,3698
2 ^a	0,2910	0,6044	0,970	0,5722
3 ^a	0,2890	0,8600	1,080	0,3151
4 ^a	0,2759	0,7289	1,116	0,3410
5 ^a	0,2781	0,6318	1,049	0,4211
Méd ± 2s	0,2865 ± 0,0298	0,7141 ± 0,2827	1,060 ± 0,111	0,4038 ± 0,2573

Tabela A.1.17 – Propriedades temofísicas dos compósitos de gesso com fração mássica de 5 % de grafite (para nível de confiança de 95 %)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0,4252	0,5628	0,909	0,8314
2 ^a	0,4465	0,6492	0,934	0,7411
3 ^a	0,4459	0,5999	0,957	0,7773
4 ^a	0,4568	0,6213	0,992	0,7433
5 ^a	0,4549	0,5795	1,015	0,7736
Méd ± 2s	0,4459 ± 0,0237	0,6025 ± 0,0724	0,961 ± 0,086	0,7733 ± 0,0870

Tabela A.1.18 – Propriedades temofísicas do material à base de cal hidratado e gesso (para nível de confiança de 95 %)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1 ^a	0,2523	0,5680	0,972	0,4586
2 ^a	0,2654	0,4929	0,917	0,5877
3 ^a	0,2410	0,6938	0,958	0,3664
Méd ± 2s	0,2529 ± 0,0245	0,5849 ± 0,1945	0,949 ± 0,057	0,4709 ± 0,2049

Tabela A.1.19 – Médias obtidas para as propriedades termofísicas dos materiais à base de cal hidratado (planejamento estatístico)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
S1	0,1806	0,9362	1,076	0,1798
S2	0,1576	0,7609	0,966	0,2145
S3	0,4286	0,9251	1,113	0,4166
S4	0,2803	0,6358	0,962	0,4591
S5	0,2274	0,8215	0,882	0,2960
S6	0,2197	0,6947	0,946	0,3460
S7	0,2298	0,6515	0,947	0,3767

Tabela A.1.20 – Médias obtidas para as propriedades termofísicas dos materiais à base de cimento (planejamento estatístico)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
S1	0,5451	0,5085	1,295	0,9018
S2	0,4594	0,5029	1,270	0,7199
S3	0,6331	0,7777	1,224	0,6816
S4	0,5345	0,5760	1,211	0,7785
S5	0,5235	0,5074	1,223	0,8437
S6	0,5007	0,6008	1,274	0,6554
S7	0,5090	0,5568	1,276	0,7242

Tabela A.1.21 – Médias e desvios obtidos para as propriedades termofísicas dos compósitos de gesso com grafite (planejamento 2⁴⁻¹)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1	0,3900	0,7567	1,075	0,4841
2	0,3246	0,4425	0,892	0,8351
3	0,5067	1,147	1,165	0,3795
4	0,3299	0,6744	0,833	0,5901
5	0,3869	0,7238	1,131	0,4755
6	0,2972	0,6577	0,869	0,5206
7	0,5003	1,014	1,070	0,4613
8	0,3574	0,6164	0,804	0,7265

Tabela A.1.22 – Médias e desvios obtidos para as propriedades termofísicas dos compósitos de gesso com grafite (planejamento 3²)

Amostras	Condutividade térmica [W/mK]	Difusividade térmica [mm²/s]	Massa específica [g/cm³]	Calor específico [J/gK]
1	0,3900	0,7567	1,075	0,4841
2	0,4683	0,9594	1,097	0,4500
3	0,5003	1,014	1,070	0,4613
4	0,4305	0,6436	0,982	0,6955
5	0,3806	0,8190	0,920	0,5058
6	0,4564	0,9140	0,902	0,5540
7	0,2972	0,6577	0,869	0,5206
8	0,3508	0,6457	0,795	0,6873
9	0,3299	0,6744	0,833	0,5901

ANEXO II

DETALHES DA PRODUÇÃO E PLANEJAMENTO

Tabela A.2.1 – Detalhes da produção das primeiras amostras os compósitos de cal hidratado com adição de grafite

Fração mássica (grafite/cal)	Tempo de secagem	Utilização do forno (30 °C)	Massa inicial de cal [g]	Massa de grafite [g]	Massa de água [g]
0	70 horas	não	100,001	-	75,496
1/4	17 horas	sim	100,030	24,992	75,575
1/8	17 horas	sim	99,946	12,497	74,313
1/12	18,5 horas	sim	99,925	8,346	75,326
1/16	17 horas	sim	100,034	6,218	76,013
1/20	17 horas	sim	99,936	4,968	75,772

Tabela A.2.2 – Detalhes da produção das amostras de cal e água

Amostras	Tempo de secagem	Massa inicial de cal [g]	Massa de água [g]
1 ^a	70 horas	100,001	75,496
2 ^a	28 horas	99,998	75,160
3 ^a	28 horas	100,049	76,049

Tabela A.2.3 – Detalhes da produção dos compósitos de cal hidratado com adição de grafite

Fração mássica (grafite/cal)	Tempo de secagem	Utilização do forno (30 °C)	Massa inicial de cal [g]	Massa de grafite [g]	Massa de água [g]
1/12	25 horas	sim	99,546	8,326	74,806
1/16	25 horas	sim	100,037	6,291	75,293
1/20	25 horas	sim	100,036	5,002	77,822

Tabela A.2.4 – Detalhes da produção das primeiras amostras dos compósitos de gesso com adição de grafite

Fração mássica (grafite/gesso)	Massa inicial de gesso [g]	Massa de grafite [g]	Massa de água [g]
0	100,202	-	74,660
1/4	100,048	24,956	75,380
1/8	99,997	12,505	75,546
1/12	99,989	8,314	74,899
1/16	99,959	6,165	75,648
1/20	100,174	5,006	77,898

Tabela A.2.5 – Detalhes da produção dos compósitos de cal hidratado com adição de grafite (planejamento estatístico)

Amostras	Fração mássica (água:grafite:cal)	Massa inicial de cal [g]	Massa de grafite [g]	Massa de água [g]
S1	0,4000:0,0000:0,6000	119,963	-	79,765
S2	0,4500:0,0000:0,5500	109,967	-	89,686
S3	0,4000:0,1000:0,5000	80,019	20,051	100,037
S4	0,4500:0,0500:0,5000	90,341	9,965	99,929
S5	0,4250:0,0375:0,5375	85,062	7,575	107,549
S6	0,4250:0,0375:0,5375	85,198	7,536	107,410
S7	0,4250:0,0375:0,5375	84,706	7,495	107,498

Tabela A.2.6 – Detalhes da produção dos compósitos de cimento com adição de grafite (planejamento estatístico).

Amostras	Fração (água:grafite:cimento)	mássica de água [g]	Massa inicial de grafite [g]	Massa de cimento [g]
S1	0,4000:0,0000:0,6000	81,151	-	120,008
S2	0,4500:0,0000:0,5500	91,846	-	110,032
S3	0,4000:0,1000:0,5000	80,187	20,002	100,099
S4	0,4500:0,0500:0,5000	89,841	9,981	100,321
S5	0,4250:0,0375:0,5375	84,944	7,496	107,523
S6	0,4250:0,0375:0,5375	84,731	7,478	107,567
S7	0,4250:0,0375:0,5375	85,116	7,506	107,463

Tabela A.2.7 – Fração mássica real e normalizada de cada componente

Componentes	Fração mássica	Normalizada
Água	0,400	0,0
	0,425	0,5
	0,450	1,0
Grafite	0,0000	0,000
	0,0375	0,375
	0,0500	0,500
	0,1000	1,000
Matriz (Cal hidratado ou Cimento)	0,5000	0,000
	0,5375	0,375
	0,5500	0,500
	0,6000	1,000

Tabela A.2.8 – Planejamento fatorial fracionado 2^{4-1}

Variável	A (água)	B (grafite)	C (tempo)	D
Amostra	(temperatura)			
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1
8	1	1	1	1

Tabela A.2.9 – Valores das variáveis quantitativas

Variável	Sigla	-1	1
Fração mássica de água (-)	A	0,4	0,5
Fração mássica de grafite (-)	B	0,02	0,10
Tempo de secagem (dias)	C	4	8
Temperatura de secagem (°C)	D	30	50

Tabela A.2.10 – Detalhes da produção dos compósitos de gesso com adição de grafite (2^{4-1})

Amostras	Massa inicial de água [g]	Massa de grafite [g]	Massa de gesso [g]
1	79,994	3,993	115,966
2	99,757	3,991	95,948
3	79,930	20,010	99,999
4	99,505	19,979	79,981
5	80,386	3,990	116,016
6	99,937	4,003	96,048
7	79,854	19,930	99,940
8	99,636	20,018	80,005

Tabela A.2.11 – Planejamento fatorial 3^2

Amostra	Variável	A (água)	B (grafite)
1		-1	-1
2		-1	0
3		-1	1
4		0	-1
5		0	0
6		0	1
7		1	-1
8		1	0
9		1	1

Tabela A.2.12 – Detalhes da produção dos compósitos de gesso com adição de grafite (3^2)

Amostras	Massa inicial de água [g]	Massa de grafite [g]	Massa de gesso [g]
1	79,994	3,993	115,966
2	79,809	11,983	108,013
3	79,854	19,930	99,940
4	89,810	4,000	105,989
5	90,210	11,973	97,964
6	89,760	19,980	89,981
7	99,937	4,003	96,048
8	99,508	11,989	88,000
9	99,505	19,979	79,981

Tabela A.2.13 – Detalhes da produção das amostras de cimento com cálculo de perda e quantidade retida de água

Amostras	Molde	Massa inicial [g]	Massa final [g]	Molde [g]	Água inicial [g]	Água perdida [g]	Água retida pelo material [g]
S1	1	166,248	139,365	79,199	34,820	26,883	7,937 (22,8 %)
	2	160,454	135,007	77,791	33,065	25,447	7,618 (23,0 %)
S2	1	165,862	133,677	78,096	39,495	32,185	7,310 (18,5 %)
	2	165,790	133,198	78,150	39,438	32,592	6,846 (17,4 %)
S3	1	157,697	130,391	74,345	33,341	27,306	6,035 (18,1 %)
	2	157,558	131,287	76,997	32,224	26,271	5,953 (18,5 %)
S4	1	148,670	119,732	74,988	33,157	28,938	4,219 (12,7 %)
	2	149,413	123,609	79,882	31,289	25,804	5,485 (17,5 %)
S5	1	154,903	126,962	80,158	31,767	27,941	3,826 (12,0 %)
	2	155,814	128,396	81,802	31,655	27,418	4,037 (12,8 %)
S6	1	153,134	126,714	77,876	31,985	26,420	5,565 (17,4 %)
	2	152,779	126,740	79,999	30,932	26,039	4,893 (15,8 %)
S7	1	154,080	125,823	75,975	33,161	28,257	4,904 (14,8 %)
	2	151,601	125,633	78,865	30,913	25,968	4,945 (16,0 %)

Tabela A.2.14 – Massa de cada molde e quantidade de água perdida no processo de secagem dos compósitos de gesso (2^{4-1})

Amostras	Molde	Massa molde [g]	Massa inicial [g]	Massa final [g]	Água perdida [g]	Porcentagem de água perdida [%]
1	1	84,812	171,844	147,086	24,758	71,1
	2	80,769	158,392	136,301	22,091	71,1
2	1	79,737	167,989	126,410	41,579	94,2
	2	79,667	164,096	124,287	39,809	94,3
3	1	78,447	158,314	128,918	29,396	92,0
	2	81,059	163,648	133,302	30,346	91,9
4	1	80,188	161,401	128,780	32,621	80,3
	2	78,774	161,377	128,692	32,685	79,1
5	1	80,915	157,956	128,770	29,186	94,7
	2	80,322	155,902	126,954	28,948	95,8
6	1	78,271	162,380	126,182	36,198	86,1
	2	74,691	157,334	121,777	35,557	86,0
7	1	80,740	166,702	138,946	27,756	80,7
	2	78,455	155,128	130,352	24,776	80,8
8	1	85,944	176,401	132,375	44,026	97,3
	2	81,369	151,498	116,362	35,136	100,0

Tabela A.2.15 – Massa de cada molde e quantidade de água perdida no processo de secagem dos compósitos de gesso (3²)

Amostras	Molde	Massa molde [g]	Massa inicial [g]	Massa final [g]	Água perdida [g]	Porcentagem de água perdida [%]
1	1	84,812	171,844	147,086	24,758	71,1
	2	80,769	158,392	136,301	22,091	71,1
2	1	77,218	147,798	128,670	19,128	67,8
	2	80,929	167,540	143,786	23,754	68,6
3	1	80,740	166,702	138,946	27,756	80,7
	2	78,455	155,128	130,352	24,776	80,8
4	1	87,842	173,785	149,200	24,585	63,6
	2	79,733	157,489	133,951	23,538	67,3
5	1	76,329	155,753	130,279	25,474	71,3
	2	78,357	156,015	130,741	25,274	72,3
6	1	83,504	160,035	135,515	24,510	71,2
	2	78,615	161,787	134,866	26,921	71,9
7	1	78,271	162,380	126,182	36,198	86,1
	2	74,691	157,334	121,777	35,557	86,0
8	1	75,804	129,001	110,193	18,808	70,7
	2	81,326	147,951	123,667	24,284	72,9
9	1	80,188	161,401	128,780	32,621	80,3
	2	78,774	161,377	128,692	32,685	79,1

ANEXO III

EFEITOS ESTIMADOS

Tabela A.3.1 – Efeitos estimado com valores de R^2 , ajuste, valor p, coeficientes e seus erros médios (2^{4-1})

Propriedade	R²	Ajuste	Fator	p	Coeficiente	Erro médio coeficientes
Condutividade térmica [W/mK]	0,9037	0,8652	água	0,0021	-0,0593	0,0102
			grafite	0,0152	0,0369	
Difusividade térmica [mm ² /s]	0,8190	0,7466	água	0,0114	-0,1564	0,0401
			grafite	0,0418	0,1089	
Massa específica [g/cm ³]	0,9260	0,9136	água	0,0001	-0,1304	0,0151
Calor específico [J/gK]	0,5899	0,5216	água	0,0260	0,1090	0,0182
Perda de água [%]	0,9680	0,9440	água	0,0364	2,4500	0,7914
			tempo secagem	0,0201	2,9625	
			T secagem	0,0006	7,8125	

Tabela A.3.2 – Efeitos estimado com valores de R^2 , ajuste, valor p, coeficientes e seus erros médios (3^2)

Propriedade	R^2	Ajuste	Fator	p	Coeficiente	Erro médio coeficientes
Condutividade térmica [W/mK]	0,8762	0,6699	água (linear)	0,0286	-0,0635	0,0160
			água (quadrático)	0,3185	0,0165	0,0139
			grafite (linear)	0,1769	0,0281	0,0160
			grafite(quadrático)	0,9780	-0,0004	0,0139
			interação	0,3952	-0,0194	0,1960
Difusividade térmica [mm ² /s]	0,9471	0,8590	água (linear)	0,0111	-0,1254	0,0223
			água (quadrático)	0,8584	0,0038	0,0193
			grafite (linear)	0,0268	0,0908	0,0223
			grafite(quadrático)	0,4779	0,0156	0,0193
			interação	0,1148	-0,0602	0,0273
Massa específica [g/cm ³]	0,9667	0,9112	água (linear)	0,0028	-0,1243	0,0136
			água (quadrático)	0,4275	-0,0108	0,0118
			grafite (linear)	0,2336	-0,0203	0,0136
			grafite(quadrático)	0,5100	-0,0088	0,0118
			interação	0,6785	-0,0076	0,0167

ANEXO IV

DETALHES EXPERIMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Tabela A.4.1 – Vazão mássica média do líquido, temperatura do meio externo e tempo decorrido dos experimentos de transferência de calor no MI

MI	Condição	\dot{m}_m [g/s]	T_{externa} [°C]	$t_{\text{experimento}}$ [s]
Cal puro		9,10	$23,4 \pm 1,0$	4949
	Resfriamento	8,71	$21,7 \pm 0,9$	4529
		9,05	$21,5 \pm 0,5$	4537
	Aquecimento	9,64	$21,5 \pm 0,5$	3820
		9,55	$21,4 \pm 0,5$	3876
		7,21	$22,0 \pm 1,1$	4010
Cal + grafite 1		8,58	$23,4 \pm 0,5$	2595
	Resfriamento	8,99	$23,0 \pm 0,5$	2562
		8,28	$23,3 \pm 0,4$	2649
	Aquecimento	8,98	$21,9 \pm 0,5$	2328
		9,22	$22,9 \pm 0,5$	2349
		7,61	$23,1 \pm 0,4$	2438
Cal + grafite 2 (1ª semana)		12,17	$23,3 \pm 0,6$	2891
	Resfriamento	12,06	$22,9 \pm 0,5$	2833
		9,03	$22,3 \pm 0,5$	3036
	Aquecimento	13,31	$22,9 \pm 0,5$	2462
		11,54	$22,8 \pm 0,4$	2513
		9,61	$23,0 \pm 0,9$	2731

Tabela A.4.1 – Vazão mássica média do líquido, temperatura do meio externo e tempo decorrido dos experimentos de transferência de calor no MI (continuação)

MI	Condição	\dot{m}_m [g/s]	T_{externa} [°C]	$t_{\text{experimento}}$ [s]
Cal + grafite 2 (2ª semana)		8,37	22,4 ± 0,5	3225
	Resfriamento	10,63	22,6 ± 0,5	2895
		7,92	22,5 ± 0,5	3184
	Aquecimento	11,73	23,0 ± 0,5	2622
		9,90	22,9 ± 0,5	2766
Cal + grafite 3		10,12	23,1 ± 0,5	3053
	Resfriamento	11,05	21,6 ± 0,8	2841
		10,36	21,5 ± 0,6	2934
		9,58	23,3 ± 0,5	2672
	Aquecimento	9,08	21,6 ± 0,7	2693
		9,82	21,8 ± 0,5	2645