

**PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**SISTEMAS DE ENCAPSULAMENTO DE  
MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE**

Por,

**Thiago Vieira de Souza  
Vitor Furtado Paes**

**Brasília, 8 de dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**SISTEMAS DE ENCAPSULAMENTO DE MATERIAIS  
DE MUDANÇA DE FASE**

Por,  
**Thiago Vieira de Souza**  
**Vitor Furtado Paes**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção  
do grau de Engenheiro Mecânico

**Banca Examinadora**

Taygoara Felamingo de Oliveira (Orientador) \_\_\_\_\_

Mario Benjamim Baptista de Siqueira \_\_\_\_\_

Armando de Azevedo Caldeira Pires \_\_\_\_\_

Brasília 8 de dezembro de 2017

# Resumo

O presente projeto trata de armazenamento térmico de energia mediante mecanismo de troca de calor latente, utilizando a cera de palma como material de mudança de fase (PCM). Desenvolveu-se um sistema de encapsulamento para o PCM por meio de duas metodologias distintas: aplicação de revestimento sobre a cera no estado sólido e fabricação da membrana para preenchimento com o material. Adotando-se a primeira metodologia proposta, foi realizada uma série de testes e experimentos para investigação das principais propriedades mecânicas e térmicas das cápsulas desenvolvidas. Foram avaliadas a razão mássica núcleo-revestimento, resistência térmica, resistência mecânica, taxa de carregamento e o calor total armazenado em cada protótipo. As cápsulas fabricadas apresentaram elevada resistência à carregamento compressivo em estado sólido e alta capacidade de deformação. Devido à baixa condutividade térmica do PCM utilizado e do material de revestimento, a utilização das cápsulas é mais apropriada em sistemas cuja finalidade é inércia térmica.

**Palavras-chaves:** PCM. encapsulamento. armazenamento térmico.

# Abstract

The present work relates to thermal energy storage using a latent heat exchange mechanism, deploying palm wax as a phase change material (PCM). Encapsulation systems for the PCM were developed by means of two distinct methodologies: coating application over the wax in solid phase and fabrication of the shell to be filled with the material. Based on the first methodology presented, series of tests and experiments were conducted in order to investigate the main mechanical and thermal properties of the developed capsules. An assessment was performed on the core-to-shell mass ratio, thermal resistance, mechanical resistance, charging rate and the total amount of heat stored in each prototype. The produced capsules presented high strain capacity of its structure, as well as high resistense to compressive loads. Due to the low thermal conductivity of the PCM and the coating material, the proper use of the capsules would be in a system wich the main goal is to achieve thermal inertia.

**Key-words:** PCM. encapsulation. thermal energy storage.

# Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Matriz energética mundial. Fonte:IEA(2015) . . . . .   | 1  |
| Figura 2 – Principais fontes de suprimento renováveis. Fonte:IEA(2015) . . . . .  | 2  |
| Figura 3 – Panorama energético do Brasil. Fonte:MME(2017) . . . . .   | 2  |
| Figura 4 – Classificação dos PCMs. Fonte:(SHARMA et al., 2009) . . . . .  | 7  |
| Figura 5 – Representação do glóbulo vermelho. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017) . . . . .   | 12 |
| Figura 6 – Parametrização da superfície de uma hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017) . . . . .   | 12 |
| Figura 7 – Resposta transiente da temperatura dos compósitos em relação à cera de soja. Fonte:(CUI et al., 2011) . . . . .                                | 15 |
| Figura 8 – Resposta transiente da temperatura dos compósitos em relação à parafina. Fonte:(CUI et al., 2011) . . . . .                                    | 16 |
| Figura 9 – Dimensões da cápsula utilizada na simulação CFD. Fonte:(SATTARI et al., 2017) . . . . .  | 16 |
| Figura 10 – Variação da fração líquida de material ao longo do tempo. Fonte:(SATTARI et al., 2017) . . . . .  | 17 |
| Figura 11 – Comportamento transiente do PCM durante seu derretimento. Fonte:(SATTARI et al., 2017) . . . . .  | 18 |
| Figura 12 – Influência da temperatura do fluido de transferência de calor no tempo de carregamento. Fonte:(BéDéCARRATS et al., 2009) . . . . .            | 19 |
| Figura 13 – Influência da vazão mássica no tempo de carregamento do sistema. Fonte:(BéDéCARRATS et al., 2009) . . . . .                                   | 19 |
| Figura 14 – Esquema do sistema de acumulação térmica. Fonte:(YANG; ZHANG; XU, 2014) . . . . .   | 20 |
| Figura 15 – Comparativo de eficiência energética entre as duas configurações testadas. Fonte:(YANG; ZHANG; XU, 2014) . . . . .                            | 21 |
| Figura 16 – Esquema do sistema de acumulação térmica. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016) . . . . .   | 22 |
| Figura 17 – Relação entre a quantidade de calor armazenada e a temperatura do fluido de transferência de calor. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016) . . . . . | 22 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 18 – Relação entre a vazão mássica e a quantidade de energia acumulada. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016) . . . . . | 23 |
| Figura 19 – Diagrama esquemático do processo de encapsulamento por polimerização. Fonte:(ALAM et al., 2015) . . . . .    | 24 |
| Figura 20 – Etapas do processo de encapsulamento. Fonte:(ALAM et al., 2015) . . . . .                                    | 24 |
| Figura 21 – Representação da cápsula utilizada nos experimentos. Fonte:(ALAM et al., 2015) . . . . .                     | 25 |
| Figura 22 – Cápsulas em diferentes estágios do ciclo térmico. Fonte:(ALAM et al., 2015) . . . . .                        | 25 |
| Figura 23 – Esquema do tanque termoclina. Fonte:(FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014) . . . . .                                  | 27 |
| Figura 24 – Tanque de acumulação térmica proposto para múltiplos PCMs. Fonte:(MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015) . . . . .      | 29 |
| Figura 25 – Esquema do sistema de armazenamento. Fonte:(WU et al., 2015) . . . . .                                       | 30 |
| Figura 26 – Diagrama esquemático do aparato experimental. Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004) . . . . .                         | 33 |
| Figura 27 – Curva <i>T-history</i> do material de mudança de fase. Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004) . . . . .                | 34 |
| Figura 28 – Curva <i>T-history</i> para o material de referência (água). Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004) . . . . .          | 34 |
| Figura 29 – Modelo CAD 3D do molde de injeção. . . . .   | 36 |
| Figura 30 – Fresadora CNC utilizada para confecção dos moldes. . . . .   | 37 |
| Figura 31 – Moldes fabricados pela fresadora CNC. . . . .  | 38 |
| Figura 32 – Cera de palma em formato de hemácia produzida pela injeção do material no molde. . . . .                     | 39 |
| Figura 33 – Material de revestimento, PLASTI FILM. . . . .   | 39 |
| Figura 34 – Cápsula em processo de secagem. . . . .  | 40 |
| Figura 35 – Cápsula finalizada pelo processo de injeção de cera no molde. . . . .  | 40 |
| Figura 36 – Impressora 3D utilizada no processo de fabricação das membranas. . . . .                                     | 41 |
| Figura 37 – Modelo CAD 3D das membranas a serem impressas. . . . .   | 42 |
| Figura 38 – Resultado do processo de impressão 3D. . . . .   | 42 |
| Figura 39 – Injeção de cera de palma nas cápsulas impressas. . . . .   | 43 |
| Figura 40 – Montagem final da cápsula produzida por impressão 3D. . . . .  | 43 |
| Figura 41 – Defeito de macroporosidade na solidificação da cera nos moldes. . . . .                                      | 48 |
| Figura 42 – Mudança da coloração do material devido ao aquecimento excessivo. . . . .                                    | 49 |
| Figura 43 – Produtos finais obtidos a partir das duas metodologias propostas. . . . .                                    | 52 |
| Figura 44 – Aumento de produção das cápsulas. . . . .  | 54 |
| Figura 45 – MTS <i>Landmark</i> utilizada para os ensaios de compressão. . . . .   | 56 |
| Figura 46 – Parametrização da superfície de uma hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017) . . . . .                             | 59 |
| Figura 47 – Principais cotas geométricas das cápsulas. . . . .   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 48 – Esquema de fixação das cápsulas com palitos de madeira. . . . .   | 61 |
| Figura 49 – Esquema de montagem do experimento. . . . .   | 62 |
| Figura 50 – Ilustração do banho térmico modelo Julabo F25. . . . .  | 65 |
| Figura 51 – Curva de calibração do termopar utilizado para medição nos experi-<br>mentos. . . . .                               | 66 |
| Figura 52 – Cápsula cortada para medição de espessura. . . . .  | 69 |
| Figura 53 – Cápsula com membrana rompida após ensaio compressivo. . . . .   | 71 |
| Figura 54 – Gráfico comparativo entre os ensaios compressivos realizados com cera<br>em estado sólido. . . . .                  | 72 |
| Figura 55 – Cápsula deformada devido à carga compressiva. . . . .   | 73 |
| Figura 56 – Curvas de compressão de esforços aplicados repetidas vezes sobre uma<br>mesma cápsula. . . . .                      | 73 |
| Figura 57 – Curvas de compressão das cápsulas com seu interior em estado líquido. . . . .                                       | 74 |
| Figura 58 – Curva de aquecimento da água ao longo do experimento de taxa de<br>carregamento. . . . .                            | 78 |
| Figura 59 – Curva de aquecimento da água ao longo do experimento de quantidade<br>de calor armazenado. . . . .                  | 79 |
| Figura 60 – Modelo CAD 3D do molde para confecção da membrana da cápsula. . . . .   | 82 |
| Figura 61 – Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 1) . . . . .   | 90 |
| Figura 62 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da<br>cera. (Cápsula 1) . . . . .                  | 90 |
| Figura 63 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da mem-<br>brana de revestimento. (Cápsula 1) . . . . . | 91 |
| Figura 64 – Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 2) . . . . .   | 91 |
| Figura 65 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da<br>cera. (Cápsula 2) . . . . .                  | 92 |
| Figura 66 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da mem-<br>brana de revestimento. (Cápsula 2) . . . . . | 92 |
| Figura 67 – Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 3) . . . . .   | 93 |
| Figura 68 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da<br>cera. (Cápsula 3) . . . . .                  | 93 |
| Figura 69 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da mem-<br>brana de revestimento. (Cápsula 3) . . . . . | 94 |
| Figura 70 – Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 4) . . . . .   | 94 |
| Figura 71 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da<br>cera. (Cápsula 4) . . . . .                  | 95 |
| Figura 72 – Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da mem-<br>brana de revestimento. (Cápsula 4) . . . . . | 95 |
| Figura 73 – Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 1) . . . . .  | 96 |
| Figura 74 – Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 2) . . . . .  | 96 |
| Figura 75 – Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 3) . . . . .  | 97 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 76 – Gráfico comparativo dos ensaios compressivos com cera no estado sólido com análise de seção da fratura da cera. . . . .     | 98 |
| Figura 77 – Gráfico comparativo dos ensaios compressivos com cera no estado sólido com análise de seção da ruptura da membrana. . . . . | 98 |

# Lista de Tabelas

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparativo térmico entre cápsulas com geometria esférica e de hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017) . . . . .                | 13 |
| Tabela 2 – Dados Experimentais. . . . .   | 35 |
| Tabela 3 – Propriedades obtidas para a cera de palma. . . . .   | 35 |
| Tabela 4 – Parâmetros utilizados para o projeto do molde. . . . .   | 36 |
| Tabela 5 – Especificações técnicas da fresadora CNC. Fonte:(RAFAEL; FELIPE, 2015) . . . . .   | 37 |
| Tabela 6 – Propriedades do material ABS. Fonte: MATWEB . . . . .  | 42 |
| Tabela 7 – Medições de massa para a primeira metodologia. . . . .   | 45 |
| Tabela 8 – Medições do diâmetro das cápsulas para o cálculo de espessura. . . . .   | 46 |
| Tabela 9 – Resultados para a primeira metodologia de encapsulamento. . . . .  | 47 |
| Tabela 10 – Medições de massa para a segunda metodologia. . . . .   | 50 |
| Tabela 11 – Medidas de espessura da membrana fabricada em impressão 3D. . . . .   | 51 |
| Tabela 12 – Resultados para a segunda metodologia de encapsulamento. . . . .  | 52 |
| Tabela 13 – Dados obtidos no banho térmico para calibração do termopar tipo K. . . . .  | 65 |
| Tabela 14 – Valores medidos para a espessura da membrana de revestimento. . . . .   | 70 |
| Tabela 15 – Resultados de força e deslocamento máximo obtidos nos ensaios compressivos para as cápsulas contendo cera sólida. . . . . | 72 |
| Tabela 16 – Resultados de força e deslocamento máximo para as cápsulas contendo cera líquida. . . . .                                 | 75 |
| Tabela 17 – Tabela contendo as médias das principais cotas geométricas do protótipo. . . . .  | 76 |
| Tabela 18 – Medições de temperatura de saída da água no calorímetro. . . . .  | 77 |
| Tabela 19 – Medições de temperatura dentro do calorímetro durante o experimento. . . . .  | 79 |
| Tabela 20 – Comparativo entre as duas metodologias apresentadas. . . . .  | 81 |
| Tabela 21 – Descrição das variáveis utilizadas no cálculo das propriedades. . . . .   | 89 |
| Tabela 22 – Medições das principais cotas geométricas da cápsula para posterior avaliação da preservação de seu formato. . . . .      | 99 |

# Lista de abreviaturas e siglas

|       |   |
|-------|---|
| ABS   | <i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>            |
| ASTM  | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| CAD   | <i>Computer Aided Design</i>                      |
| CAES  | <i>Compressed Air Energy Storage</i>              |
| CFD   | <i>Computational Fluid Dynamics</i>               |
| CNC   | <i>Computer Numeric Control</i>                   |
| CNF   | <i>Carbon Nanofibers</i>                          |
| CNT   | <i>Carbon Nanotubes</i>                           |
| CSP   | <i>Concentrated Solar Power</i>                   |
| DTA   | <i>Differential Thermal Analysis</i>              |
| DSC   | <i>Differential Scanning Calorimetry</i>          |
| FEP   | <i>Fluorinated Ethylene Propylene</i>             |
| HTF   | <i>Heat Transfer Fluid</i>                        |
| IEA   | <i>International Energy Agency</i>                |
| LHTES | <i>Latent Heat Thermal Energy Storage</i>         |
| MME   | Ministério de Minas e Energia                     |
| MTS   | <i>Material Test System</i>                       |
| PCM   | <i>Phase Change Material</i>                      |
| RBC   | <i>Red Blood Cell</i>                             |
| TES   | <i>Thermal Energy Storage</i>                     |
| TGA   | <i>Thermogravimetry Analysis</i>                  |
| TPU   | <i>Thermoplastic Polyurethane</i>                 |

# Lista de símbolos

|           |  |                 |
|-----------|--|-----------------|
| $Q$       | Calor armazenado                                     | [ $J$ ]         |
| $\dot{Q}$ | Taxa de carregamento/descarregamento                 | [ $W$ ]         |
| $F$       | Força de compressão                                  | [ $kN$ ]        |
| $d$       | Deslocamento   | [ $mm$ ]        |
| $m$       | Massa  | [ $kg$ ]        |
| $\dot{m}$ | Vazão mássica  | [ $L/min$ ]     |
| $T$       | Temperatura  | [ $^{\circ}C$ ] |
| $\bar{T}$ | Temperatura média                                    | [ $^{\circ}C$ ] |
| $C$       | Calor específico                                     | [ $J/kgK$ ]     |
| $H$       | Calor latente  | [ $kJ/kg$ ]     |
| $\rho$    | Massa específica                                     | [ $kg/m^3$ ]    |
| $k$       | Condutividade térmica                                | [ $W/mK$ ]      |
| $R$       | Resistência térmica                                  | [ $m^2K/W$ ]    |
| $h$       | Coefficiente de transferência de calor por convecção | [ $W/m^2K$ ]    |
| $A$       | Área   | [ $m^2$ ]       |
| $e$       | Espessura  | [ $mm$ ]        |
| $t$       | Escala de tempo                                      | [ $s$ ]         |
| $a$       | Fração de massa derretida                            |                 |
| $\nabla$  | Operador nabla                                       |                 |
| $d()$     | Diferencial de uma propriedade                       |                 |

## Parâmetros Adimensionais

$Nu$  Número de Nusselt

$Re$  Número de Reynolds

$Pr$  Número de Prandtl

### **Sobrescritos**

' Distinção entre o material PCM e água

### **Subscritos**

$p$  PCM

$w$  Água

$m$  Derretimento

$o$  Saída

$s$  Solidificação

$i$  Condição inicial

$f$  Condição final

$r$  Revestimento

$c$  Cera

$t$  Total

$nr$  Núcleo-revestimento

$pl$  PCM no estado líquido

$ps$  PCM no estado sólido

1 Referente ao estado líquido

2 Referente à mudança de fase

3 Referente ao estado sólido

# Sumário

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>MOTIVAÇÃO</b>                                | <b>1</b>  |
| 1.1.1      | RELEVÂNCIA                                      | 4         |
| <b>1.2</b> | <b>OBJETIVOS</b>                                | <b>6</b>  |
| 1.2.1      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                           | 6         |
| <b>1.3</b> | <b>ESTADO DA ARTE</b>                           | <b>6</b>  |
| 1.3.1      | PCMs  | 6         |
| 1.3.2      | ENCAPSULAMENTO                                  | 9         |
| 1.3.3      | GEOMETRIA DE ENCAPSULAMENTO                     | 11        |
| 1.3.4      | SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO E APLICAÇÕES          | 14        |
| <b>2</b>   | <b>METODOLOGIA DE ENCAPSULAMENTO</b>            | <b>32</b> |
| <b>2.1</b> | <b>CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL</b>               | <b>32</b> |
| <b>2.2</b> | <b>ENCAPSULAMENTO POR MOLDE</b>                 | <b>35</b> |
| 2.2.1      | PROJETO DO MOLDE                                | 35        |
| 2.2.2      | FABRICAÇÃO DO MOLDE                             | 36        |
| 2.2.3      | FABRICAÇÃO DA CÁPSULA                           | 38        |
| <b>2.3</b> | <b>ENCAPSULAMENTO POR IMPRESSÃO 3D</b>          | <b>41</b> |
| 2.3.1      | PROJETO DA MEMBRANA DA CÁPSULA                  | 41        |
| 2.3.2      | MONTAGEM DA CÁPSULA                             | 42        |
| <b>2.4</b> | <b>ANÁLISES PRELIMINARES</b>                    | <b>43</b> |
| 2.4.1      | ENCAPSULAMENTO POR MOLDE                        | 45        |
| 2.4.1.1    | RAZÃO MÁSSICA NÚCLEO-REVESTIMENTO               | 45        |
| 2.4.1.2    | ESPESSURA DO REVESTIMENTO E RESISTÊNCIA TÉRMICA | 46        |
| 2.4.1.3    | DIFICULDADES E DESAFIOS                         | 47        |
| 2.4.2      | ENCAPSULAMENTO POR IMPRESSÃO 3D                 | 50        |
| 2.4.2.1    | RAZÃO MÁSSICA NÚCLEO-REVESTIMENTO               | 50        |
| 2.4.2.2    | ESPESSURA DO REVESTIMENTO E RESISTÊNCIA TÉRMICA | 51        |
| 2.4.2.3    | DIFICULDADES E DESAFIOS                         | 52        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>3</b> | <b>AUMENTO DE PRODUÇÃO</b>                       | <b>53</b>  |
| <b>4</b> | <b>EXPERIMENTOS</b>                              | <b>55</b>  |
| 4.1      | ESPESSURA DE REVESTIMENTO                        | 55         |
| 4.2      | ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA                   | 55         |
| 4.3      | LIMITE MÁXIMO DE TEMPERATURA                     | 58         |
| 4.4      | ENSAIO DE CICLOS DE CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO | 59         |
| 4.5      | CALORÍMETRO                                      | 61         |
| 4.5.1    | TAXA DE CARREGAMENTO                             | 61         |
| 4.5.1.1  | MATERIAL UTILIZADO                               | 62         |
| 4.5.1.2  | METODOLOGIA EXPERIMENTAL                         | 63         |
| 4.5.1.3  | PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS                      | 64         |
| 4.5.2    | CALOR ARMAZENADO                                 | 67         |
| 4.5.2.1  | MATERIAL UTILIZADO                               | 67         |
| 4.5.2.2  | METODOLOGIA EXPERIMENTAL                         | 67         |
| 4.5.2.3  | PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS                      | 68         |
| <b>5</b> | <b>RESULTADOS</b>                                | <b>69</b>  |
| 5.1      | ESPESSURA DE REVESTIMENTO                        | 69         |
| 5.2      | RESISTÊNCIA MECÂNICA                             | 70         |
| 5.2.1    | CÁPSULAS SÓLIDAS                                 | 70         |
| 5.2.2    | CÁPSULAS LÍQUIDAS                                | 74         |
| 5.3      | LIMITE MÁXIMO DE TEMPERATURA                     | 75         |
| 5.4      | CICLO DE CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO            | 75         |
| 5.5      | CALORÍMETRO                                      | 76         |
| 5.5.1    | TAXA DE CARREGAMENTO                             | 76         |
| 5.5.2    | CALOR ARMAZENADO                                 | 79         |
| <b>6</b> | <b>CONCLUSÃO</b>                                 | <b>81</b>  |
| 6.1      | SUGESTÕES E PROPOSTAS FUTURAS                    | 82         |
|          | <b>REFERÊNCIAS</b>                               | <b>84</b>  |
|          | <b>APÊNDICES</b>                                 | <b>87</b>  |
|          | <b>ANEXOS</b>                                    | <b>101</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

O armazenamento de energia é um tema que vem recebendo cada vez mais atenção da comunidade acadêmica nos últimos anos. O assunto tornou-se especialmente importante após a Crise do Petróleo em 1973-1974, quando as grandes potências se viram reféns do uso de combustíveis fósseis e passaram a investir em pesquisas de novas tecnologias de armazenamento e novos tipos de produção de energia, principalmente renováveis. A busca por novas tecnologias que não dependem de combustíveis fósseis são extremamente relevantes para o desenvolvimento sustentável do planeta e para a longevidade do ser humano. As figuras (1) e (2) a seguir ilustram, respectivamente, o suprimento energético mundial e as principais fontes renováveis, demonstrando a atual dependência dos combustíveis fósseis na matriz energética global.

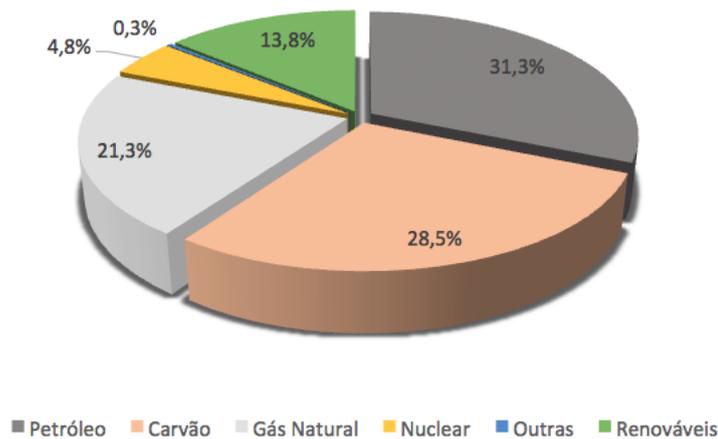


Figura 1: Matriz energética mundial. Fonte:IEA(2015)

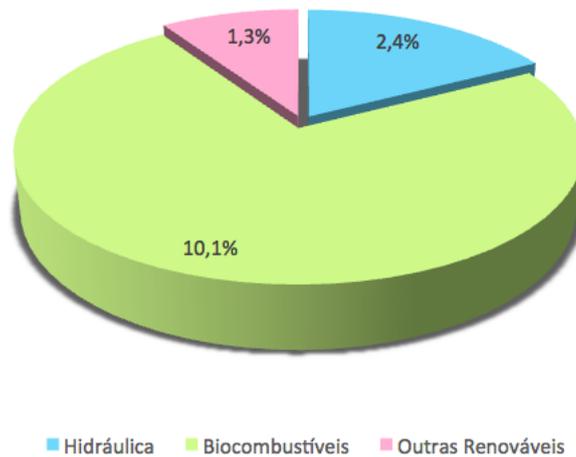


Figura 2: Principais fontes de suprimento renováveis. Fonte:IEA(2015)

No Brasil, de acordo com dados do Ministério de Minas e Energia, a situação é bem similar e o suprimento energético ainda é comandado por fontes não renováveis como pode ser visto na Fig.(3). Todavia, na oferta interna de energia elétrica, as fontes renováveis respondem por quase 83% da matriz, o que é satisfatório para um país do tamanho do Brasil. É importante frisar que a maior parte deste percentual vem de usinas hidroelétricas de grande impacto ambiental durante sua instalação e implementação, ainda que não haja emissão de poluentes no decorrer de seu funcionamento. O aprimoramento dos estudos acerca das demais fontes de energia renovável e dos métodos de armazenamento das mesmas contribui, portanto, para a diminuição da dependência de fontes hidráulicas.

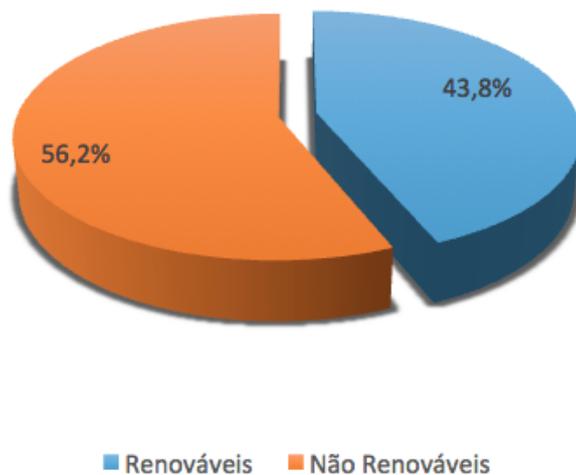


Figura 3: Panorama energético do Brasil. Fonte:MME(2017)

A preocupação central do armazenamento de energia é a necessidade de estocar energia em excesso que seria desperdiçada, além de preencher o desequilíbrio entre a geração e consumo da energia disponível (AGYENIM et al., 2010). Além de suprir esta

diferença de oferta e demanda, o armazenamento aprimora a performance e segurança dos sistemas de energia, desempenhando papel importante em sua conservação. Existem diferentes formas de realizar o armazenamento de energia, os métodos mais estudados e consolidados são o armazenamento mecânico, elétrico e térmico.

Segundo (SHARMA et al., 2009), sistemas de armazenamento mecânico incluem os volantes, sistemas gravitacionais, armazenamento de gás comprimido (*Compressed Air Energy Storage*, CAES), entre outros. O armazenamento é feito quando energia suficientemente barata está disponível, geralmente a noite ou fins de semana, e a energia é liberada quando há um déficit de suprimento, em horários de pico. No armazenamento elétrico, as baterias cumprem o papel sendo carregadas por uma fonte direta de corrente elétrica e na fase de descarga transformam a energia química em elétrica.

O armazenamento de energia térmica pode ser feito de duas formas: mecanismos de troca de calor sensível ou latente. Na primeira forma, a energia é armazenada simplesmente pela variação de temperatura de um material sólido ou líquido, utilizando sua capacidade térmica e a aumento de temperatura durante o processo de carga e descarga. A quantidade de calor armazenada é descrita pela Eq.(1.1) a seguir:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_{ap}(T_f - T_i) \quad (1.1)$$

onde  $Q$  é a quantidade de energia armazenada [ $J$ ],  $m$  é a massa do material [ $kg$ ],  $T_i$  e  $T_f$  são as temperaturas inicial e final respectivamente [ $^{\circ}C$ ] e  $C_{ap}$  é o calor específico do material em relação as temperaturas  $T_i$  e  $T_f$  [ $J/kgK$ ].

Em um sistema de armazenamento térmico na forma de calor latente, que é o tema de estudo do presente trabalho, a energia é armazenada na etapa de carregamento quando um material passa por uma mudança de fase. Na etapa de descarga, reverte-se o processo e o material libera a energia, retornando à fase anterior. É importante notar que os processos de carga e descarga acontecem a condições aproximadamente isotérmicas, diferente de um sistema de calor sensível, onde o material absorve energia de acordo com o aumento de sua energia interna. Essa característica representa uma grande vantagem em relação ao armazenamento de calor sensível. Outra vantagem do sistema de calor latente para o sensível é a maior quantidade de energia que pode ser estocada por um determinado volume de material, sendo que este processo acontece em uma faixa de temperatura mais estreita (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014).

A quantidade de energia armazenada em um sistema de calor latente utilizando-se os materiais de mudança de fase é descrita pela Eq.(1.2) a seguir:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mC_{sp} dT + ma_m \Delta H + \int_{T_m}^{T_f} mC_{lp} dT \quad (1.2)$$

onde  $T_m$  é a temperatura de fusão do material [ $^{\circ}C$ ],  $a_m$  é a fração do material que está derretida e  $\Delta H$  é calor latente de fusão do material [ $J/kg$ ].

A partir do aprimoramento do estudo dos diferentes modos de estocagem de energia e suas aplicações, pode-se reverter o cenário global atual de dependência de fontes de energia não renováveis, além de promover a diminuição da demanda de produção de energia, incorporando os mais variados sistemas de armazenamento nas matrizes energéticas. Na seção 1.1.1 a seguir, são explicitadas as relevâncias sociais, acadêmicas, científicas e tecnológicas do armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, além de retratar as diferentes aplicações do tema realizadas atualmente. Tendo em vista a ausência de metodologia, padrão ou sistema internacional para tratar de assuntos relacionados aos materiais de mudança de fase, o estado da arte apresentado busca organizar as informações encontradas acerca dos materiais de mudança de fase (PCMs), seu princípio de funcionamento, classificação, propriedades e aplicações. Em seguida, ainda na revisão bibliográfica, apresentam-se sumarizadas as metodologias de encapsulamento deste tipo de material encontradas na literatura, bem como os estudos de geometria de cápsulas e experimentos realizados utilizando PCMs encapsulados em sistemas de armazenamento de calor latente.

### 1.1.1 RELEVÂNCIA

A crescente preocupação relacionada a problemas ambientais, escassez iminente do suprimento energético e o aumento do custo econômico da energia impulsionou a busca por novas tecnologias para combater este cenário. Desta maneira, estudos acerca de sistemas de acumulação térmica utilizando ceras orgânicas têm recebido cada vez mais atenção. Sabe-se que a busca por novas fontes de energia renovável é de extrema importância para reduzir efeitos prejudiciais ao meio ambiente, mas além disso é fundamental revisar a magnitude do consumo energético atual e desenvolver soluções práticas que possam amenizar o mesmo. Isso significa que melhorar a eficiência de utilização da energia, conservar energia desperdiçada durante processos e aprimorar o uso de formas de energia intermitentes da natureza (tais como energia solar) são soluções tão benéficas socialmente quanto a busca por novas alternativas de energia. As reservas limitadas de combustíveis fósseis e a preocupação com a emissão de gases de efeito estufa fazem da utilização eficiente de energia um problema chave a ser considerado (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014).

De acordo com (CUI et al., 2011), as ceras naturais são as mais sustentáveis e ambientalmente corretas, em se tratando de armazenamento térmico. Trata-se de um sistema de troca de calor que garante aumento da segurança do suprimento energético, utilizando recursos de ampla variedade e disponibilidade em território brasileiro. Portanto, o incentivo à esta área de estudo representa grande potencial para fortalecimento tanto da ciência quanto da indústria nacional. Além disso, pesquisas realizadas sobre o assunto contribuem para que seja discutida a questão da sustentabilidade, em especial entre os cursos de engenharia. Pesquisas mundiais revelam que o nível de conhecimento e entendimento acerca de

desenvolvimento sustentável não é satisfatório entre os estudantes de engenharia, muito trabalho ainda há de ser realizado na educação do estudante de engenharia no que tange a sustentabilidade (STANIŠKIS; KATILĪTĒ, 2016).

O potencial de ganho em eficiência energética dos materiais de mudança de fase motiva o desenvolvimento da área de estudo desta forma limpa de armazenamento, muito devido a sua ampla variedade de temperaturas de operação. As grandes reduções no consumo energético proporcionadas pelos PCMs são refletidas no impacto ambiental associado à geração da energia economizada desta maneira. Isso possibilita o desenvolvimento de soluções mais energeticamente eficientes tanto para o uso doméstico quanto para a indústria. A utilização de materiais de mudança de fase encapsulados, de um ponto de vista prático, apresenta inúmeras vantagens, devido a sua grande variedade de aplicações.

O armazenamento de energia solar através desta tecnologia já é bastante difundido, possibilitando estocar o calor absorvido durante o dia para ser usado à noite, em geral para o aquecimento de água destinada ao uso doméstico e para o conforto térmico de ambientes. Apesar de não ser usual a busca por soluções em aquecimento de ambientes no Brasil, devido às condições climáticas de altas temperaturas, observa-se elevado consumo energético ao redor do globo para este fim. Em um sistema desenvolvido para gerenciar energia solar e elétrica simultaneamente utilizando PCMs, simulações realizadas ao longo de quatro invernos indicaram redução de 32% no gasto energético para aquecer ambientes (FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014). O conforto térmico em edificações representa grande fração do consumo de energia final; visando o decréscimo deste consumo encontram-se, na construção civil, aplicações práticas de PCMs incorporados à telhados, paredes, tetos e pavimentos, onde observa-se melhora no desempenho térmico de cada um. Ainda mais, observa-se o emprego de PCMs na indústria têxtil, para a produção de tecidos termorreguladores; no desenvolvimento de biomateriais, para aplicações biomédicas; nos sistemas de refrigeração de componentes eletrônicos e *datacenters*; na indústria alimentícia, para a conservação de alimentos; na indústria automotiva e até para aplicações espaciais.

O desenvolvimento de sistemas de armazenamento térmico por calor latente requer conhecimento sobre diversos ramos do saber científico. Dentre eles destacam-se a transferência de calor, mecânica dos fluidos e processos de fabricação, para a finalidade do presente trabalho. Deseja-se desenvolver macrocápsula de material de mudança de fase capaz de armazenar calor, com metodologia de encapsulamento bem definida. Ressalta-se a relevância acadêmica do presente trabalho, uma vez que se comunica com diversos outros estudos realizados dentro da universidade. Os processos de fabricação utilizados no projeto foram realizados por centro de usinagem CNC desenvolvido por alunos da Engenharia Mecânica e impressora 3D da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB). Os ensaios de compressão foram realizados no Laboratório de Processos de Fabricação (SG-09) e a caracterização do material de mudança de fase utilizado no encapsulamento foi feita por estudante de mestrado do Laboratório de Energia e Ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS

O presente projeto foi desenvolvido baseando-se na revisão da literatura acerca da utilização de materiais de mudança de fase em sistemas de armazenamento térmico através de calor latente, os principais tipos de PCMs e suas propriedades, sistemas de encapsulamento e estudos de geometrias para cápsulas. Avaliando-se o estado da arte acerca desta temática, foram propostas metodologias de fabricação de cápsulas de Bio-PCMs e, com o produto final destas metodologias, realizou-se uma sequência de testes para investigar o comportamento mecânico e térmico dos protótipos produzidos.

Inserido neste contexto, o projeto tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de encapsulamento de materiais de mudança de fase visando aplicações de média e baixa temperatura, para realização de estudo experimental de um sistema de armazenamento de calor latente por meio de macrocápsulas de Bio-PCMs. A seguir, os objetivos específicos para realização do trabalho são discriminados.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Seleção e caracterização do material de mudança de fase a ser utilizado;
- Investigação e dimensionamento da geometria de encapsulamento;
- Definição de metodologias para a fabricação de macrocápsulas de PCMs;
- Definição do material de revestimento adequado à aplicação do projeto;
- Realização de ensaios para determinar as características mecânicas e térmicas dos protótipos;
- Realização de análise experimental para investigação da taxa de carregamento e quantidade de calor armazenada nas cápsulas produzidas.

## 1.3 ESTADO DA ARTE

### 1.3.1 PCMs

Os materiais utilizados nos sistemas de armazenamento através de calor latente são chamados de materiais de mudança de fase (PCM) e, como dito anteriormente, sua principal característica é absorver e liberar energia ao transformar seu estado físico. A transferência de energia pode ser feita quando o material passa pela transformação sólido-líquido ou vice versa. Há também transformações sólido-gasoso e líquido-gasoso que apresentam um maior calor latente de mudança de fase, porém a grande mudança de volume durante esse processo inviabiliza o processo de encapsulamento (AGYENIM et al., 2010).

Os PCMs se comportam de maneira similar aos demais materiais, sua temperatura aumenta a medida que o material absorve calor. No entanto, os materiais de mudança de fase absorvem e liberam calor a uma temperatura constante, podendo absorver de 5 a 14 vezes mais calor por unidade de volume que um material convencional (SHARMA et al., 2009).

A classificação dos PCMs pode ser feita de acordo com o tipo do material ou ainda com relação ao seu ponto de fusão. Segundo PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, baseado nas temperaturas de fusão os materiais podem ser classificados da seguinte forma:

- PCMs de baixa temperatura: Ponto de fusão abaixo de 15 °C.
- PCMs de temperatura média: Ponto de fusão entre 15 °C e 90 °C.
- PCMs de alta temperatura: Ponto de fusão acima de 90 °C.

Já SHARMA et al. apresenta uma classificação pelo tipo do material: orgânicos, inorgânicos e eutéticos, como pode ser observado no diagrama da Fig.(4) abaixo:

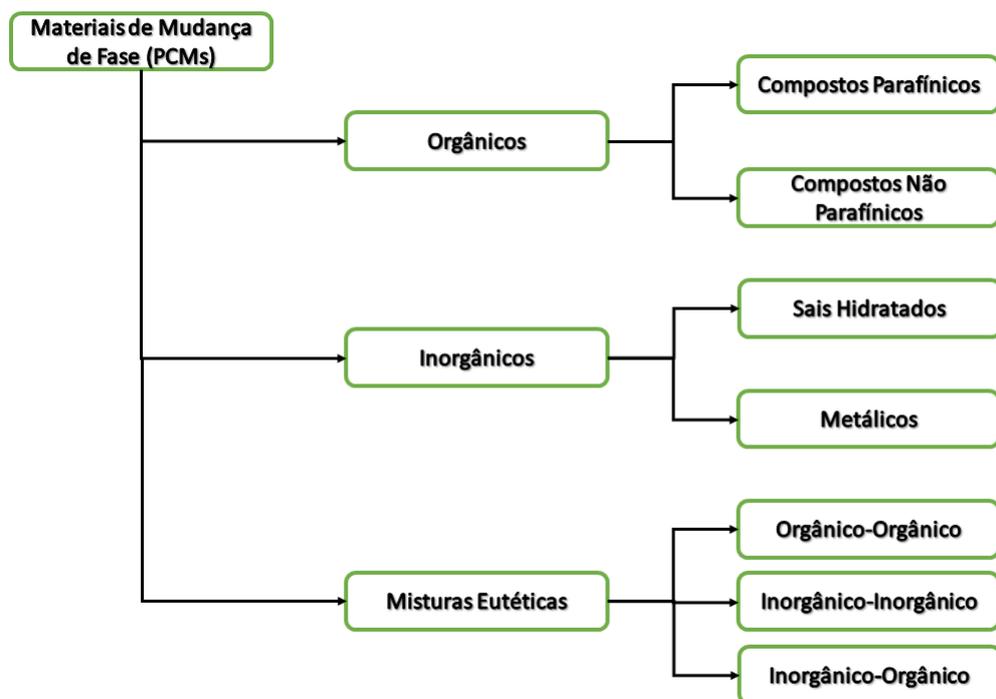


Figura 4: Classificação dos PCMs. Fonte:(SHARMA et al., 2009)

Parafinas, óleos e álcoois são exemplos típicos de PCMs orgânicos. Existe grande variedade deste tipo de material, o que os deixa significativamente mais baratos que os demais. Estes materiais possuem alto calor latente de fusão e pouca segregação de fase, o que permite a realização de diversos ciclos sem que o calor latente de fusão decresça. Uma desvantagem dos materiais orgânicos seria sua condutividade térmica relativamente

baixa, uma característica predominante em todos os tipos de materiais de mudança de fase. Diversos pesquisadores estudam possibilidades de aumentar a condutividade térmica de PCMs orgânicos (LAFDI, 2005),(WANG; Z.XIN, 2009),(SHAILKH; K.; K, 2008),(KHO-DADADI; HOSSEINIZADEH, 2007). Uma das soluções mais empregadas é a mistura do PCM com partículas de materiais metálicos ou compostos contendo nanofibras e nanotubos de carbono (CUI et al., 2011).

O grupo de materiais inorgânicos é composto basicamente pelos sais hidratados e materiais metálicos. São bastante estudados e utilizados em diversas aplicações devido à sua maior condutividade térmica. Outras características favoráveis ao uso de materiais inorgânicos seria seu elevado calor latente de fusão e sua pequena mudança de volume na transformação de fase. Por outro lado, uma grande desvantagem dos materiais inorgânicos em geral é o derretimento incongruente. Isso desencadeia um processo irreversível de derretimento-solidificação, que diminui a capacidade de absorção/liberação de energia a cada ciclo(SHARMA et al., 2009).

Os materiais eutéticos são basicamente misturas de materiais orgânicos e inorgânicos com o propósito de aprimorar as características térmicas e químicas do material. O estudo destes materiais é relativamente novo e não muito trivial, o que os torna não muito atrativos para o uso em diferentes aplicações.

O desenvolvimento da área térmica de acumulação de energia só teve grande visibilidade após a crise de energética dos anos 70, porém os estudos sobre materiais de mudança de fase e armazenamento de energia térmica começou com Telkes e Raymond (TELKES; RAYMOND, 1949) em meados dos anos 50. A priori, o estudo dos materiais de mudança de fase eram extensivamente ligados a aplicações com aquecimento solar (TELKS, 1980),(MILLER, 1983),(JURINAK; ABDEL, 1979),(MORRISON; ABDEL, 1978),(HALE; VISKANTA, 1980), porém foi adquirindo maior gama de aplicações e investimento pós-crise energética.

Desde então, os pesquisadores da área têm investigado tipos de *design* de sistemas de acumulação, otimização dos sistemas, comportamento transiente, performance térmica, encapsulamento, e desenvolvimento e caracterização de novos materiais.(AGYENIM et al., 2010). Inserido neste contexto, a idealização de um sistema de armazenamento térmico eficaz envolve o estudo sobre as características dos PCMs, do processo de transferência de calor no sistema e um encapsulamento adequado para a aplicação.

Segundo AGYENIM et al., PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, SHARMA et al. e ZALBA et al., o critério de seleção de um PCM adequado para sua aplicação segue as seguintes recomendações:

- (i) Possuir ponto de fusão adequado a temperatura de operação do sistema;
- (ii) Possuir um elevado calor latente de fusão por unidade de massa, para que uma pequena quantidade de material possa absorver grande quantidade de energia;

- (iii) Baixo calor específico, para se obter uma mudança de temperatura rápida do sistema;
- (iv) Alta condutividade térmica, para o gradiente de temperatura nas fases de carga e descarga ser o menor possível;
- (v) Pequenas mudanças de volume durante as mudanças de fase, o que acarreta em uma geometria de encapsulamento mais simples;
- (vi) Possuir nenhum ou pouco nível de subresfriamento, além de um derretimento congruente;
- (vii) Possuir estabilidade química, para que não ocorra corrosão e nem interação com os materiais do encapsulamento;
- (viii) Disponibilidade do material a um baixo custo.

Como o estudo desses materiais é relativamente novo, ainda existem discrepâncias e incertezas na caracterização dos mesmos. Diversos estudos que utilizam o mesmo material apresentam dados diferentes para suas características, o que demonstra uma falta de padronização dos experimentos e aquisição de dados. Com a falta de metodologia, cada pesquisa se utiliza de uma maneira para se obter as características termo-físicas e outras propriedades do material, utilizando métodos já conhecidos. De acordo com [ZALBA et al.](#), os métodos mais convencionais para determinação das propriedades dos PCMs são a calorimetria, análise térmica diferencial (DTA) e calorimetria de varrimento diferencial (DSC). Estes métodos também possuem algumas limitações que favorecem as discrepâncias de resultados entre os diversos estudos ([ZHANG Y; JIANG Y, 1999](#)):

- (i) Pequenas quantidades de material são analisados (1 *mg* - 10 *mg*), entretanto o comportamento dos PCMs depende da sua quantidade;
- (ii) A instrumentação dos experimentos geralmente é cara e complexa;
- (iii) A mudança de fase não pode ser visualizada.

### 1.3.2 ENCAPSULAMENTO

Na maioria das aplicações com uso de materiais de mudança de fase, o encapsulamento se faz necessário. Além da necessidade de prevenir o vazamento do PCM e o contato do mesmo com o meio externo, o encapsulamento garante um armazenamento seguro, comporta a variação volumétrica durante a mudança de fase e é um método eficiente para aumentar a área específica de transferência de calor, o que compensa a baixa condutividade térmica da maioria dos materiais de mudança de fase.

De acordo com ([ALAM et al., 2015](#)), existem três preocupações principais em se tratando de encapsulamento de PCMs:

- (i) Larga expansão volumétrica do PCM durante o derretimento;
- (ii) Aumento de pressão devido a expansão do ar a temperaturas elevadas e durante o processo de carregamento dos sistemas de armazenamento de energia térmica;
- (iii) Reatividade do PCM fundido com o material de encapsulamento.

O encapsulamento de PCMs se tornou uma grande vertente de estudos nos últimos 20 anos, com o aumento das aplicações deste tipo de material. Vantagens e desvantagens de diferentes geometrias e materiais de cápsulas e sua compatibilidade foram estudados por (JACOB; BRUNO, 2015) e (CHENG; ZHAI, 2017).

De acordo com MUÑOZ-SÁNCHEZ *et al.*, o processo de encapsulamento de materiais de mudança de fase no geral pode ser feito de duas maneiras:

- Injeção do material PCM em uma membrana previamente fabricada;
- Aplicação de revestimento sobre o PCM em estado sólido.

No primeiro processo, o material selecionado é inserido dentro de uma membrana de cápsula que posteriormente deverá ser hermeticamente fechada para evitar vazamento/contato do material com o meio externo. Deve haver compatibilidade entre o material da casca e o PCM, além de um espaço vazio para permitir a expansão volumétrica do material ao mudar de fase.

Na segunda alternativa, utiliza-se um molde para o PCM no formato desejado. Uma vez desmolado, o PCM é revestido por um material que formará um envelope ao redor do mesmo. Existem diversos processos de revestimento conhecidos e aplicados, como polimerização *in situ*, emulsão, suspensão, entre outros.

Os sistemas de encapsulamento podem ser classificados de acordo com o tamanho das cápsulas, da seguinte forma: (a) macroencapsulamento ( $\geq 1\text{mm}$ ); (b) microencapsulamento ( $\sim 1\text{-}1000\mu\text{m}$ ); (c) nanoencapsulamento ( $\leq 1\mu\text{m}$ ) (CHENG; ZHAI, 2017).

O micro e nanoencapsulamento são utilizados em aplicações comerciais basicamente em indústrias farmacêuticas, de cosméticos, adesivos e indústria médicas (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014). As técnicas mais utilizadas para realização de micro e nanoencapsulamento são: coacervação, suspensão, emulsão, condensação e polimerização (SHARMA *et al.*, 2015). Por envolver meios de fabricação mais complexos e caros, tanto o micro quanto o nanoencapsulamento necessitam de muito investimento para serem utilizados, o que reduz sua aplicação para grandes tanques de armazenamentos de energia. Uma grande vantagem das micro e nanocápsulas é ter o tempo de carga e descarga reduzido, porém a razão mássica núcleo-revestimento da maioria destas cápsulas é menor que 50%, o que reduz drasticamente a densidade de energia armazenada no sistema (CHENG; ZHAI, 2017).

Em contrapartida, a fabricação das macrocápsulas é mais simples e barata, o que aumenta muito a sua gama de aplicações. Outra grande vantagem das macrocápsulas é a quantidade de energia que se pode armazenar em comparação com os outros tipos, o que torna viável sua aplicação em larga escala.

Até o presente momento, pouco estudo foi realizado em relação a diferentes geometrias de encapsulamento, portanto a escolha da geometria e do material é geralmente feita de forma empírica, sem metodologia de fabricação. De todas as geometrias utilizadas em estudos, as mais usuais são a esférica e cilíndrica (CHENG; ZHAI, 2017). Posteriormente neste capítulo será apresentado o estudo sobre diferentes geometrias de macroencapsulamento e seu comportamento térmico, conduzido por CHENG; ZHAI.

### 1.3.3 GEOMETRIA DE ENCAPSULAMENTO

Um dos principais problemas a ser abordado, em se tratando de cápsulas de Bio-PCM's, é a taxa de armazenamento e descarregamento do calor acumulado, tendo em vista a baixa condutividade térmica da maioria dos materiais utilizados para este tipo de aplicação. Além das técnicas que envolvem a adição de estruturas ao material PCM, outra forma de aprimorar a condutividade térmica do composto é definir uma geometria para a cápsula com o intuito de aumentar a superfície de troca de calor por unidade de volume. Cápsulas de formato esférico e cilíndrico, por exemplo, têm sua taxa de armazenamento e descarregamento drasticamente reduzida devido à baixa razão entre superfície e volume. No estudo realizado por CHENG; ZHAI, foram analisadas geometrias que garantem o aprimoramento das propriedades térmicas das cápsulas baseado em princípios biônicos.

Propõe-se o formato de hemácias (RBC), células presentes no sangue de mamíferos responsáveis pelo transporte de oxigênio através das vias sanguíneas. Ao longo de muitos anos de evolução, este tipo de célula otimizou sua geometria de maneira a garantir maior eficiência no transporte de oxigênio, geometria esta que pode representar boa solução para o encapsulamento de PCMs. O formato dos glóbulos vermelhos é de um disco bicôncavo, benéfico para a taxa de carregamento de oxigênio devido à sua elevada razão entre superfície e volume, além de otimizar as propriedades do escoamento do sangue. A estrutura da célula é análoga a estrutura das cápsulas de PCMs, onde a membrana celular serve como material de revestimento para o núcleo repleto de hemoglobina, que representa 90% do volume total da célula. Ainda mais, a porcentagem de RBCs no sangue é de 40-45%, que se assemelha à porosidade de um reator de leito fixo repleto de cápsulas contendo PCMs (CHENG; ZHAI, 2017). A estrutura de um glóbulo vermelho real é ilustrada na Fig.(5) subsequente.



Figura 5: Representação do glóbulo vermelho. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017)

As comparações experimentais e simulações de CHENG; ZHAI permitem a compreensão dos méritos da geometria de glóbulos vermelhos, em se tratando de performance térmica. Devido à alta performance de transferência de calor, grandes quantidades de cápsulas em formato de glóbulos vermelhos podem ser produzidas para formar um LHTES de alta eficiência para aplicações práticas (CHENG; ZHAI, 2017).

O modelo geométrico simplificado para a célula é indicado na Fig.(6), que representa a seção transversal da cápsula.

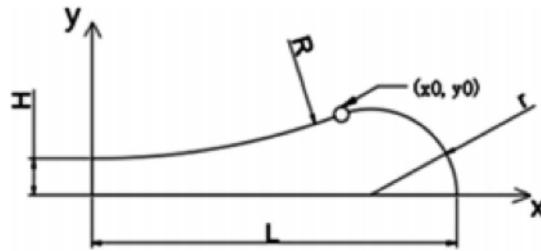


Figura 6: Parametrização da superfície de uma hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017)

Para a fabricação das cápsulas, os valores dos parâmetros acima utilizados foram  $27.37 \text{ mm}$ ,  $8.98 \text{ mm}$ ,  $3.59 \text{ mm}$  e  $28 \text{ mm}$  para  $R$ ,  $r$ ,  $H$  e  $L$ , respectivamente. A razão  $L:H:r$  aproxima-se de  $7:1:2$ , que está de acordo com os parâmetros geométricos de um glóbulo vermelho real presente no corpo humano.

Foram comparadas 5 geometrias distintas, todas com o volume equivalente ao de uma esfera de diâmetro interno igual a  $40 \text{ mm}$  para que a performance térmica pudesse ser comparada sob mesmas condições. Utilizou-se impressora 3D para a fabricação das cápsulas, onde o náilon 12 com espessura de  $1.5 \text{ mm}$  foi empregado no revestimento da mistura eutética de ácido cáprico e láurico, o ácido (CA-LA-PA). O volume do material de mudança de fase representa 90% do volume total da cápsula, que possui cerca de  $25.5 \text{ g}$ .

O experimento realizado por CHENG; ZHAI resume-se ao monitoramento da variação de temperatura em cada cápsula durante o processo de carregamento a frio. O sistema consiste em um banho feito com  $30 \text{ L}$  de água a temperatura homogênea utilizando termopares, coletor de dados e computador para realizar medições. O PCM em

cada cápsula é primeiramente aquecido homoganeamente a uma temperatura de  $22^{\circ}C$  antes de ser completamente submerso no banho de água a temperatura de  $7^{\circ}C$ , onde as variações de temperatura foram registradas a cada 5 s.

Ainda no estudo de CHENG; ZHAI, um estudo numérico também foi realizado com o intuito de obter informação mais detalhada sobre a performance térmica em cada cápsula, utilizando o *software* ANSYS Fluent. Algumas considerações foram feitas para a simulação numérica: as propriedades termofísicas do PCM e do material de revestimento não variam com a temperatura, devido a esta variação ser pequena; desprezam-se os efeitos de convecção natural, uma vez que a temperatura do banho e das cápsulas são muito próximas; a temperatura inicial é uniforme no início do banho. Empregou-se o método da entalpia para equação da conservação da energia de acordo com a Eq.(1.3) a seguir:

$$\rho_p \frac{\partial H}{\partial t} = k_p \nabla^2 T_p \quad (1.3)$$

onde  $\rho_p$ ,  $k_p$ ,  $T_p$  e  $H$  representam a densidade, condutividade térmica, temperatura e entalpia do PCM, respectivamente.

Os resultados obtidos durante o estudo são apresentados na Tab.(1) a seguir, onde são explicitados os parâmetros comparativo entre a cápsula em formato de glóbulo vermelho e a cápsula esférica.

Tabela 1: Comparativo térmico entre cápsulas com geometria esférica e de hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017)

|   | Cápsula Esférica | Cápsula Hemácia | Diferença percentual |
|---|------------------|-----------------|----------------------|
| <b>Tempo de mudança de fase [s]</b>                   | 7300             | 3100            | 33%                  |
| <b>Tempo de carregamento [s]</b>                      | 8500             | 4000            | 47%                  |
| <b>Taxa média de carga [W]</b>                        | 0,467            | 0,992           | 21,2%                |
| <b>Razão Superfície/Volume [<math>mm^{-1}</math>]</b> | 0,15             | 0,201           | 134%                 |

Os resultados obtidos com o trabalho de CHENG; ZHAI apresentam pequena discrepância entre os valores calculados numericamente e aqueles obtidos experimentalmente, evidenciando desta maneira as vantagens da geometria de hemácias empregada em cápsulas de materiais de mudança de fase. Observa-se que cerca de 57,5% do tempo de mudança de mudança de fase foi poupado apenas com a mudança na geometria da cápsula, além da taxa de carregamento média sido 2,12 vezes maior para o formato de glóbulo vermelho. Ainda mais, os resultados obtidos para o tempo de total do carregamento de cada cápsula

foram de 4000 s e 8500 s para a cápsula no formato da célula e para cápsula esférica, respectivamente.

### 1.3.4 SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO E APLICAÇÕES

Durante a revisão bibliográfica realizada para o presente trabalho, foram analisadas as técnicas de encapsulamento e geometria, bem como os sistemas de armazenamento térmico propostos por estudiosos utilizando materiais de mudança de fase. Tendo em vista a ausência de padrões e normas que tratam de acumulação térmica utilizando PCMs, as metodologias aplicadas na fabricação e experimentação de cápsulas foram investigadas com o intuito de compreender o funcionamento de sistemas quais resultados é possível alcançar com este tipo de tecnologia.

As aplicações de sistemas de armazenamento de energia térmica para frio, quente e armazenamento sazonal podem ser divididas em dois grandes grupos: proteção térmica, ou inércia térmica, e armazenamento. Uma diferença entre estes dois campos de aplicação relaciona-se a condutividade térmica das substâncias; em casos de proteção/inércia térmica é conveniente que o material utilizado tenha baixa condutividade térmica, enquanto em sistemas de armazenamento esta baixa condutividade pode causar problemas, pois mesmo que exista energia suficiente armazenada a capacidade de dispor desta energia pode ser insuficiente para a velocidade requerida (ZALBA et al., 2003). Inserido neste contexto, são descritas a seguir diversas aplicações estudadas de PCMs encapsulados, relatando as principais características dos modelos, experimentos e simulações analisados.

Segundo (ODUNSI; O'DONOVAN; REAY, 2016) massas ou largas cápsulas de PCMs não são muito eficientes em reatores devido a transferência de calor não uniforme. Para o PCM encontrar relevância em um reator de leito fixo ele deve: i) ser pequeno o suficiente para derreter rapidamente (nano a micro); ii) ser encapsulado por material inerte para evitar aglomerações, vazamentos e contaminações. Portanto, é de fundamental interesse, para o presente trabalho, avaliar as técnicas de aumento de eficiência em aplicações de macrocápsulas de PCMs em reatores térmicos.

Considerando a limitação da baixa condutividade térmica da maioria dos materiais de mudança de fase, existem técnicas que envolvem a adição de estruturas metálicas ou a dispersão de nanopartículas no volume de PCM com o intuito de aprimorar esta propriedade do material. Todos os PCMs convencionais, ambos orgânicos e inorgânicos, possuem condutividade térmica variando entre 0.1 a 0.6  $W/mK$ , o que é inaceitavelmente baixo por tornar lenta sua taxa de carregamento e descarregamento (PIELICHOWSKA; PIELICHOWSKI, 2014). No experimento realizado por (CUI et al., 2011), por exemplo, foram investigadas técnicas de aprimoramento da condutividade térmica de PCMs.

CUI et al. investigou o aumento da condutividade térmica dos PCMs adicionando compostos de carbono no material. Neste estudo, nanofibras (CNF) e nanotubos (CNT) de

carbono foram adicionados ao material de mudança de fase (cera de soja e parafina) com temperatura de fusão de  $54^{\circ}C$ , afim de aumentar sua condutividade. Os compósitos foram preparados misturando CNF e CNT nas ceras em estado líquido a  $60^{\circ}C$  em porcentagens diferentes (1%, 2%, 5% e 10%) para efeitos de comparação.

O comportamento dos compósitos no derretimento foi analisado utilizando o método de calorimetria de varrimento diferencial (DSC), onde os dados foram coletados a uma taxa de  $5^{\circ}C/min$  numa faixa de temperatura de  $0^{\circ}C-75^{\circ}C$ . As condutividades térmicas do PCM e dos compósitos foram medidas numa temperatura de  $25^{\circ}C$  por um aparato especial de medição de condutividade.

Observou-se aumento na condutividade térmica dos materiais analisados pela adição dos compostos de carbono, sendo que as nanofibras provaram-se mais eficientes que os nanotubos. As figuras (7) e (8) apresentadas a seguir indicam a variação de temperatura da cera de soja e da parafina ao longo do tempo, para cada concentração de CNF na mistura.

Nota-se, analisando os dois gráficos, que a condutividade térmica do compósito em temperatura ambiente aumenta a medida em que se adiciona CNF e CNT ao material. Comparando-se os resultados obtidos, percebe-se que as nanofibras de carbono oferecem uma maior condutividade térmica ao material que os nanotubos. A cera de soja, que inicialmente possuía condutividade térmica de  $0,324 W/mK$ , alcançou o valor de  $0,469$  com 10% de CNF na mistura. A parafina, por sua vez, apresentou aumento de  $0,320 W/mK$  para  $0,450 W/mK$ , com os mesmos 10% de nanofibras de carbono na mistura.

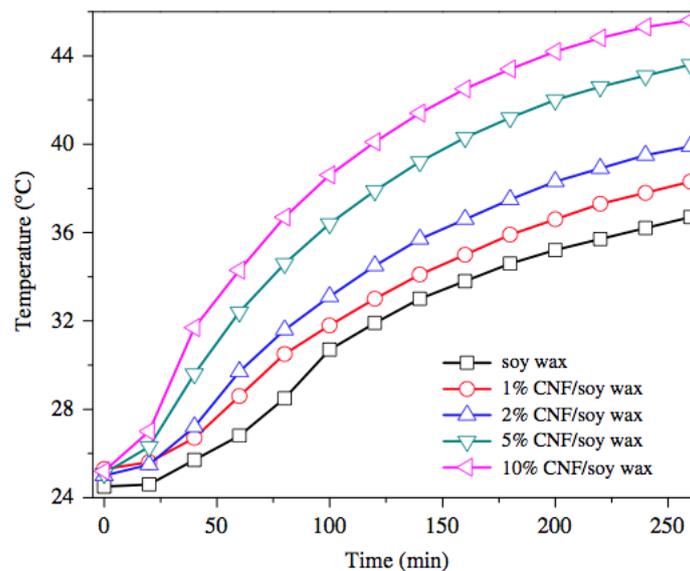


Figura 7: Resposta transiente da temperatura dos compósitos em relação à cera de soja. Fonte:(CUI et al., 2011)

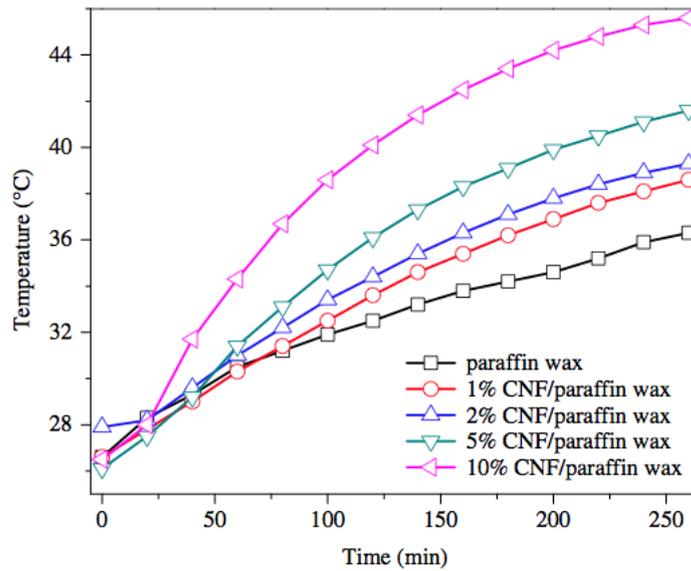


Figura 8: Resposta transiente da temperatura dos compósitos em relação à parafina. Fonte:(CUI et al., 2011)

(SATTARI et al., 2017) conduziu uma simulação de fluido computacional (CFD) para estudar o processo de derretimento de um PCM em uma cápsula de geometria esférica. Os efeitos de diferentes parâmetros como temperatura da superfície da cápsula, temperatura inicial e tamanho da cápsula também foram investigados. Inicialmente, foi utilizada uma cápsula de 101,66 mm de diâmetro e 1,55 mm de espessura, como pode ser visto na Fig.(9).

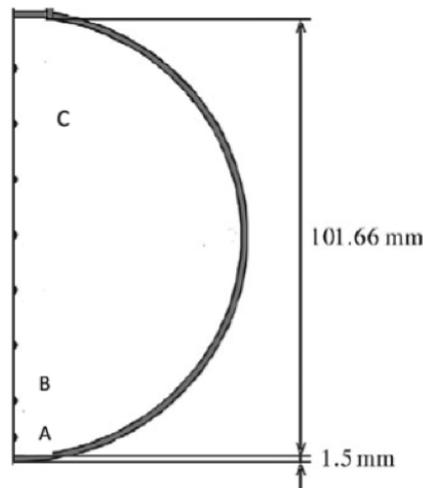


Figura 9: Dimensões da cápsula utilizada na simulação CFD. Fonte:(SATTARI et al., 2017)

O material de mudança de fase utilizado no experimento foi o n-octadecano e para o revestimento da cápsula estipulou-se a fibra de vidro. A temperatura inicial do fluido de troca de calor foi de 1°C inferior ao ponto de fusão do material e a temperatura da superfície da cápsula foi de 40°C. O escoamento foi considerado laminar, incompressível

e bidimensional. Para simular o derretimento, foi considerado que as duas fases, líquida e sólida, eram isotrópicas e homogêneas e existia equilíbrio térmico na interface.

Como resultados, SATTARI et al. estudou diferentes valores da constante  $C$ , que é a constante que caracteriza o derretimento do material PCM. Quanto mais alto seu valor, mais rápida é a transição de mudança de fase do material. Na figura (10) a seguir é possível perceber os efeitos da constante  $C$  e também verificar que o valor de  $10^7$  é o mais assertivo com os dados experimentais.

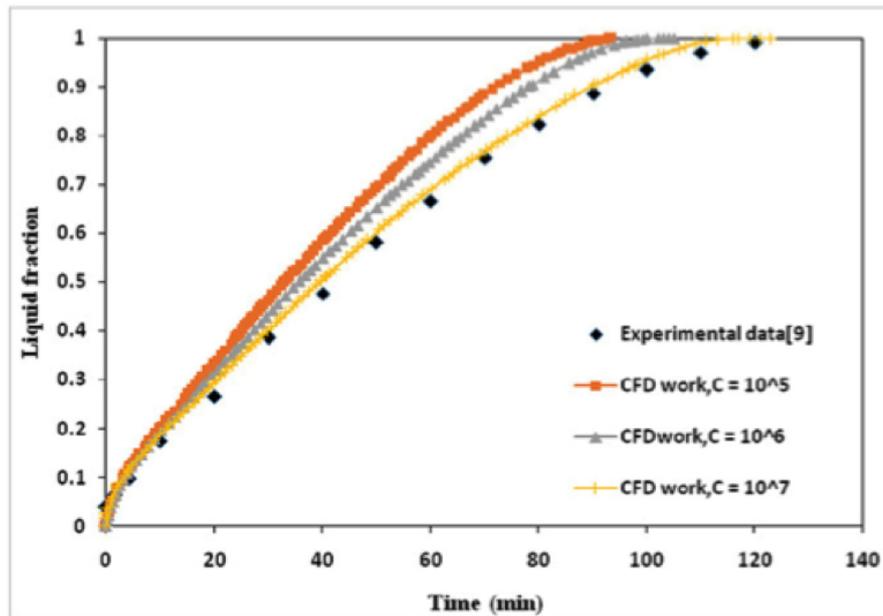


Figura 10: Variação da fração líquida de material ao longo do tempo. Fonte:(SATTARI et al., 2017)

Outro resultado importante obtido foi a análise da mudança de fase do material dentro da cápsula em relação ao tempo para uma temperatura de interface de  $40^{\circ}C$  e uma temperatura inicial de  $27.2^{\circ}C$ . Na figura (11) a seguir, as cores azul e vermelho representam a parte sólida e líquida respectivamente e como elas variam em relação ao tempo.

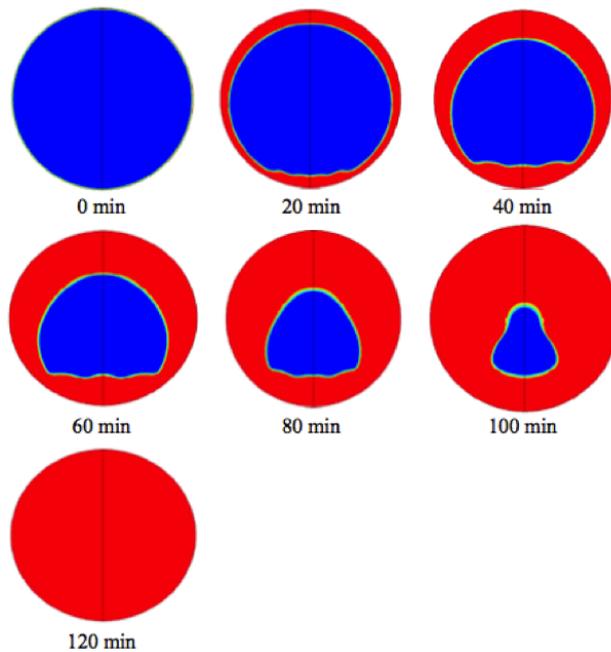


Figura 11: Comportamento transiente do PCM durante seu derretimento.  
 Fonte:(SATTARI et al., 2017)

Uma análise interessante pode ser feita com o resultado acima: A medida que a parte líquida vai se expandindo com relação ao tempo, a frente de fusão é forçada para a parte superior da cápsula, ocupando a região acima da parte sólida de PCM. Ao se movimentar para a parte superior da esfera, o líquido quente é substituído pelo líquido mais gelado, gerando assim uma convecção natural na parte superior da cápsula como pode ser visto na Fig. (11).

(BéDÉCARRATS et al., 2009) apresentou uma investigação experimental da performance de uma cápsula esférica de poliolefina durante a fase de carga e descarga em um tanque de armazenamento a frio. O material de mudança de fase escolhido foi uma mistura de água com um agente nucleante para evitar os efeitos de subresfriamento e o fluido de transferência de calor utilizado foi o monoetilenoglicol. As cápsulas esféricas estudadas tinham um diâmetro de  $77\text{ mm}$  e  $2\text{ mm}$  de espessura. Foram utilizadas 2500 cápsulas no tanque de armazenamento, o que preenchia aproximadamente 63% de seu volume total.

Neste experimento foram investigados os efeitos de diversos parâmetros incluindo a temperatura do fluido de transferência de calor, vazão mássica e a cinemática de resfriamento e aquecimento.

A influência da temperatura do fluido de transferência de calor com vazão mássica constante no tempo de carregamento pode ser vista na Fig. (12) a seguir. Percebe-se pelo gráfico que um maior gradiente de temperatura do sistema de armazenamento acarreta em uma diminuição no tempo de carregamento.

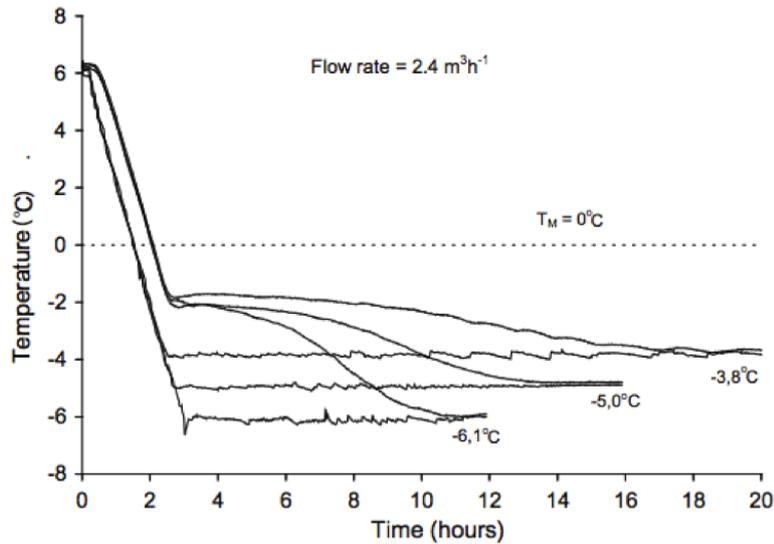


Figura 12: Influência da temperatura do fluido de transferência de calor no tempo de carregamento. Fonte:(BéDÉCARRATS et al., 2009)

Outro gráfico importante obtido pela experimentação é o que relaciona a vazão mássica com o tempo de descarga, Fig. (13). Percebe-se que o aumento da vazão do fluido de transferência de calor acarreta em uma diminuição no tempo de descarga do sistema, pois há um aumento no coeficiente de transferência de calor.

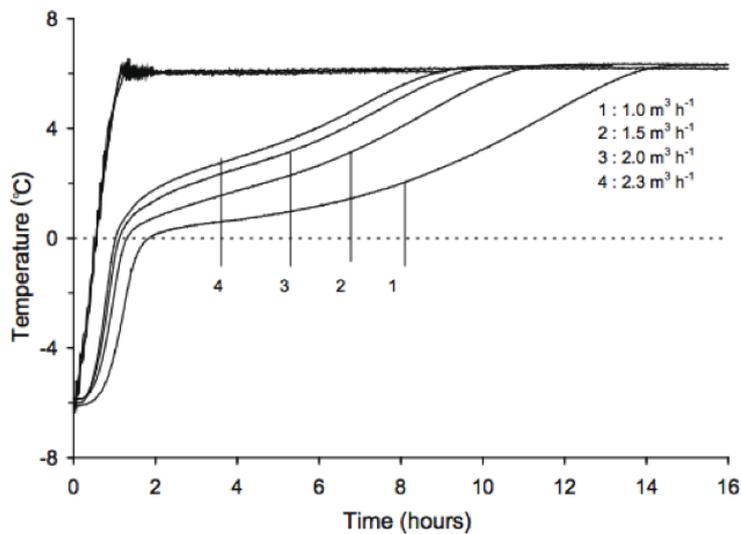


Figura 13: Influência da vazão mássica no tempo de carregamento do sistema. Fonte:(BéDÉCARRATS et al., 2009)

(YANG; ZHANG; XU, 2014) investigou um sistema de cogeração utilizando um coletor solar integrado com um tanque de armazenamento contendo três diferentes PCMs com temperaturas de fusão diferentes. O fluido de transferência de calor utilizado no experimento foi a água, que era aquecida pelo sistema de coletor solar e posteriormente transportada para o tanque preenchido com os diferentes PCMs. Como resultado, a per-

formance energética de um sistema contendo apenas um PCM com temperatura de fusão de  $60^{\circ}C$  e três PCMs foi investigada para fins de comparação. Os PCMs utilizados têm ponto de fusão de  $60^{\circ}C$ ,  $50^{\circ}C$  e  $42^{\circ}C$ .

As cápsulas utilizadas no experimento são de geometria esférica com um diâmetro de  $55\text{ mm}$  e  $2\text{ mm}$  de espessura, todas feitas de policarbonato. As cápsulas foram dispostas no tanque de acordo com o ponto de fusão do PCM, sendo que os materiais com maior ponto de fusão ficam posicionados mais acima no tanque. Na Figura (14) um esquema do tanque de armazenamento.

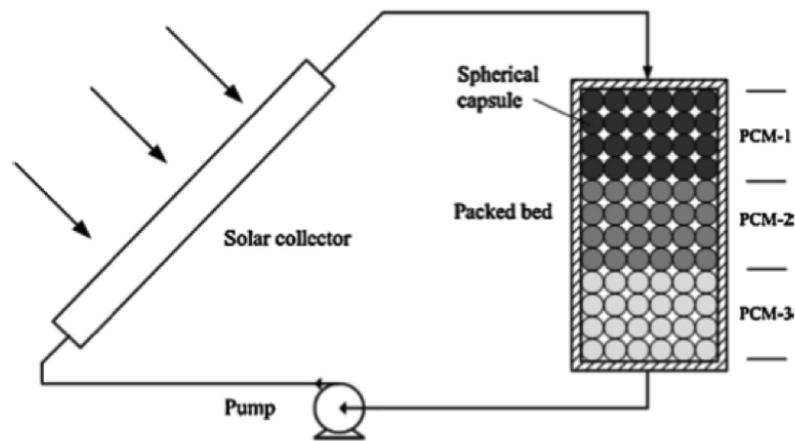


Figura 14: Esquema do sistema de acumulação térmica. Fonte:([YANG; ZHANG; XU, 2014](#))

Como resultado, [YANG; ZHANG; XU](#) comparou as performances energéticas dos dois sistemas diferentes. A Figura (15) a seguir mostra a relação entre a eficiência energética nas duas configurações.

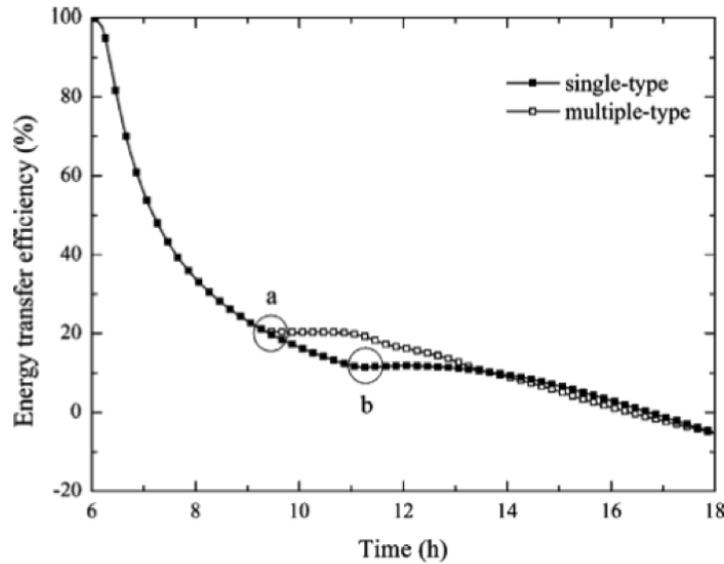


Figura 15: Comparativo de eficiência energética entre as duas configurações testadas. Fonte:(YANG; ZHANG; XU, 2014)

A eficiência energética do sistema é calculada pela razão entre a quantidade de calor transferido ao sistema e a quantidade de calor máxima que pode ser transferida ao sistema. Os pontos *a* e *b* do gráfico representam o tempo em que ocorre o derretimento dos PCMs. Percebe-se pelo gráfico que o sistema com múltiplos PCMs tem um carregamento iniciado quase duas horas mais cedo que a configuração simples. Todavia, a quantidade de energia acumulada nos dois sistemas ao final do processo de mudança de fase é a mesma. Conclui-se então que um sistema com múltiplos PCMs é eficiente para diminuir o tempo de carregamento, porém não afeta na quantidade de energia armazenada.

CHENG; ZHAI; WANG conduziu um experimento para avaliar um sistema de armazenamento a frio de refrigeração solar. O material de mudança de fase utilizado nesse sistema foi uma mistura eutéctica contendo ácido cáprico e láurico juntamente com um ácido oleico como agente nucleante, que tem uma temperatura de solidificação de aproximadamente  $13^{\circ}C$  e atende as configurações de temperatura do sistema. As cápsulas utilizadas neste sistema tem geometria esférica, com  $38\text{ mm}$  de diâmetro e  $0.3\text{ mm}$  de espessura de parede. No modelo do reator térmico, os efeitos da temperatura do fluido de transferência de calor e sua vazão mássica na eficiência térmica do sistema como tempo de carregamento e quantidade de frio acumulado foram investigados.

Para observar a variação de temperatura no fluido de transferência de calor e nos PCMs, termopares foram posicionados em diferentes alturas no reator térmico de comprimento  $L$ , como pode ser visto na Fig.(16) a seguir.

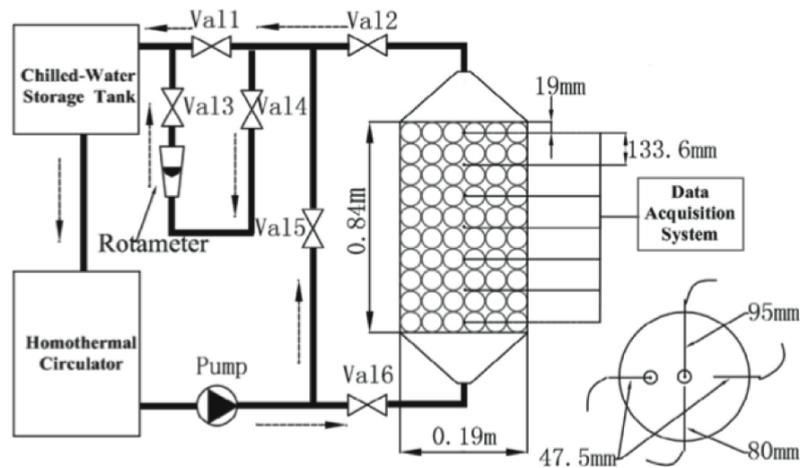


Figura 16: Esquema do sistema de acumulação térmica. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016)

Para analisar os efeitos da temperatura do fluido de transferência de calor, uma faixa térmica entre  $7^{\circ}\text{C} - 12^{\circ}\text{C}$  foi investigada, mantendo-se uma vazão volumétrica de  $100 \text{ L/h}$ .

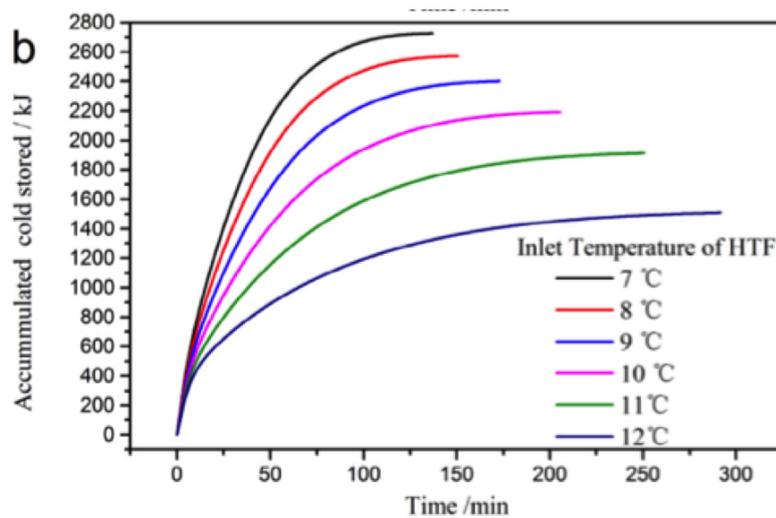


Figura 17: Relação entre a quantidade de calor armazenada e a temperatura do fluido de transferência de calor. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016)

Nota-se pela Fig.(17) acima que para um acumulador térmico a frio, o aumento na temperatura do fluido de transferência de calor é inversamente proporcional à quantidade de frio acumulado. O mesmo não acontece em um sistema de acumulação de calor, onde quanto maior a temperatura do fluido de transferência, maior é a quantidade de calor armazenada.

Outro resultado interessante é o que demonstra a relação entre o tempo de carregamento do sistema e a variação na vazão mássica do fluido de transferência de calor, Fig.(18). Fica claro nos dois gráficos apresentados que a quantidade de calor/frio arma-

zenada depende da temperatura do fluido de transferência de calor, enquanto o tempo de carregamento do sistema depende da vazão mássica do fluido.

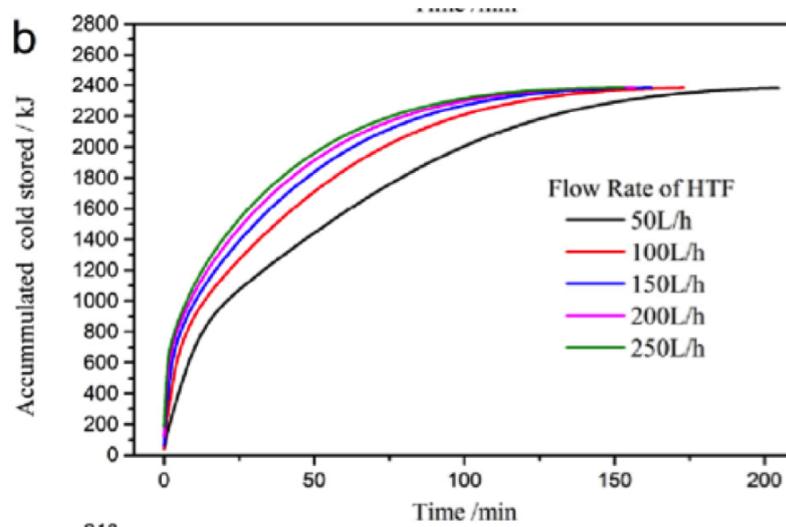


Figura 18: Relação entre a vazão mássica e a quantidade de energia acumulada. Fonte:(CHENG; ZHAI; WANG, 2016)

(ALAM et al., 2015) desenvolveram um método inovador de macro encapsulamento de material de mudança de fase com ponto de fusão na faixa de  $120^{\circ}C$ - $350^{\circ}C$ . O método consiste em revestir o PCM previamente moldado com uma camada de polímero não corrosivo seguido de deposição de uma camada metálica (níquel) pelo método de deposição de metal sem vácuo. Os materiais de mudança de fase estudados no experimento foram o sódio, potássio, e nitrato de lítio. Três tipos de polímeros de revestimento foram selecionados para o estudo de compatibilidade com o PCM: não fluorado (PIF), parcialmente fluorado (PVDF) e totalmente fluorado (FEP e PTFE).

O sistema de encapsulamento visa aplicações de altas temperaturas, onde a camada de polímeros não reativos que revestem o material possui flexibilidade que garante que acomodação da variação de volume durante o processo de mudança de fase, enquanto que a fina camada metálica sobre o conjunto garante a integridade física das cápsulas em aplicações de meio poroso. A figuras (19) e (20) a seguir esquematiza o processo de encapsulamento dos PCMs utilizados.

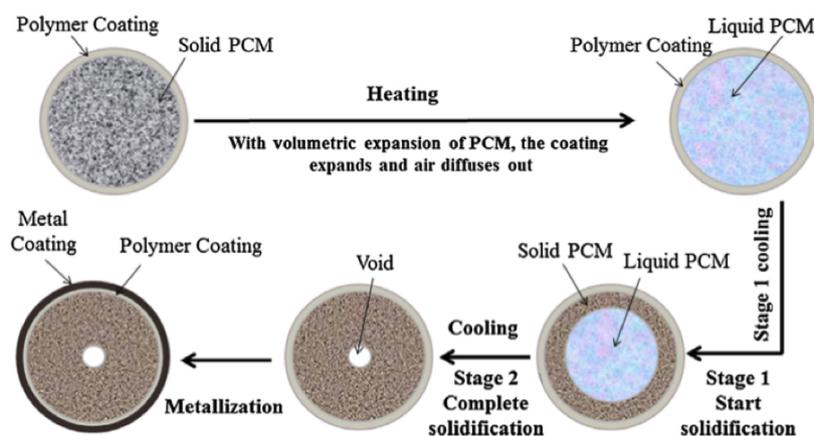


Figura 19: Diagrama esquemático do processo de encapsulamento por polimerização. Fonte:(ALAM et al., 2015)

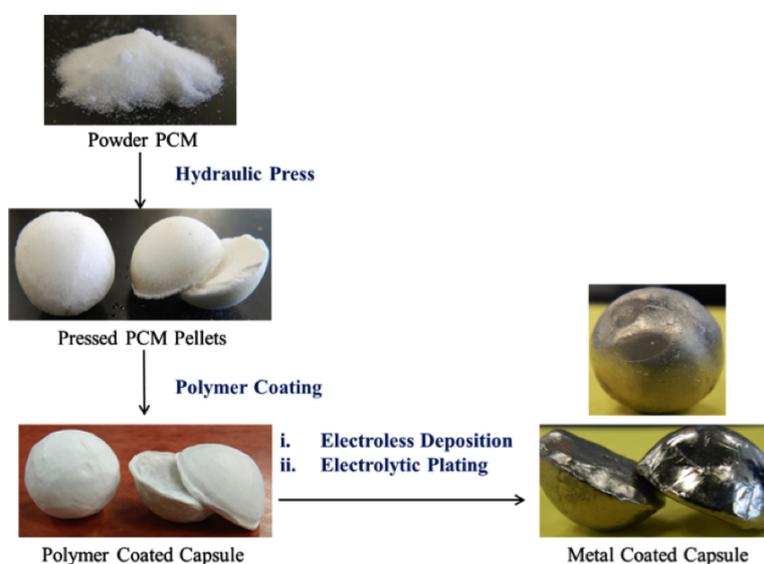


Figura 20: Etapas do processo de encapsulamento. Fonte:(ALAM et al., 2015)

Para determinar as propriedades termo físicas dos PCMs foi utilizado o método de calorimetria diferencial de varredura (DSC), e os polímeros foram analisados quanto a sua compatibilidade e utilização em diversos ciclos térmicos pelo método TGA, que avalia a mudança de massa do material de acordo com a temperatura e tempo. Os resultados obtidos para os polímeros de revestimento indicam que os compostos totalmente fluorados (FEP e PTFE) são os mais compatíveis para o revestimento pois não apresentam sinais de reação com o material de mudança de fase. Em contrapartida, os compostos não fluorados e parcialmente fluorados apresentaram grande interação com o PCM, o que levou à corrosão desses polímeros, tornando o encapsulamento ineficiente.

A caracterização do material realizada por ALAM et al. foi a uma taxa de aumento de  $10^{\circ}C/min$ . Durante a análise TGA, o peso e a temperatura foram medidos diversas vezes para observar a repetição dos valores medidos, onde o método *root-sum-square* foi

empregado para avaliar a incerteza nas medições com confiabilidade de 95%. Utilizando termopares, observou-se a distribuição de temperatura dentro de uma única cápsula durante os processos de carregamento e descarregamento de calor, Fig.(21). O termopar tipo K foi posicionado no centro da cápsula na qual realizou-se ciclo de  $280^{\circ}C$  até  $326^{\circ}C$  dentro de um forno, observando-se que o tempo de derretimento foi de cerca de 22 minutos. O tempo de solidificação foi maior do que o de derretimento, como esperado, com duração de 29 minutos.

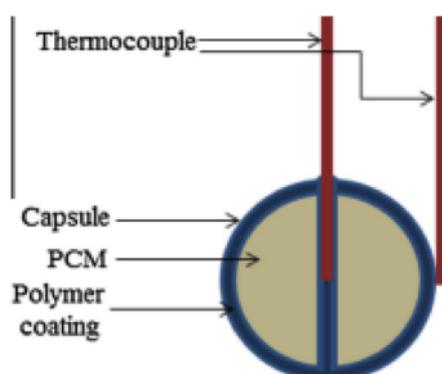


Figura 21: Representação da cápsula utilizada nos experimentos. Fonte:(ALAM et al., 2015)

A performance térmica das cápsulas de nitrato de sódio foi avaliada durante ciclos em que se mantinha por 80 minutos a temperatura das cápsulas a  $326^{\circ}C$ , que em seguida eram resfriadas a temperatura  $280^{\circ}C$  e permaneciam por 1 hora na mesma. As cápsulas suportaram 2200 ciclos e continuaram a desempenhar sua função. Em vários estágios do ciclo térmico cápsulas foram dissecadas para analisar suas propriedades termofísicas. Em análise DSC do ciclo térmico observou-se que as cápsulas não apresentaram mudanças significativas em suas propriedades termofísicas.

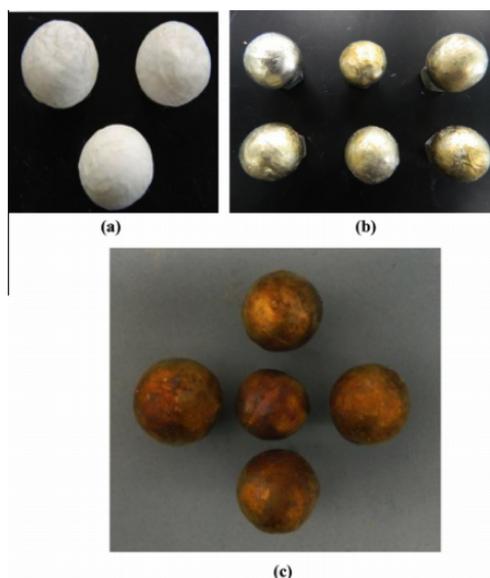


Figura 22: Cápsulas em diferentes estágios do ciclo térmico. Fonte:(ALAM et al., 2015)

Ainda no trabalho de [ALAM et al.](#), as cápsulas revestidas com politetrafluoretileno foram testadas em ambiente de reator de leito retido por mais de 50 ciclos, onde o tempo médio de cada ciclo foi de aproximadamente  $6h$  de operação contínua. O tanque de armazenamento acomodava 770 cápsulas de nitrato de sódio dispostas aleatoriamente, onde cada cápsula possuía diâmetro médio de  $2.743 \pm 0.038cm$  e massa média de  $17.4 \pm 1.6g$ . As cápsulas dentro do reator foram analisadas por cerca de 300 horas de operação e todas sobreviveram aos ciclos sem qualquer vazamento. Nove camadas de cápsulas de PCM preenchiam o tanque, onde o peso sobre as cápsulas da camada mais de baixo era equivalente a  $12kg$ . Demonstrou-se, desta maneira, a estabilidade mecânica das cápsulas durante os processos de fusão e solidificação. O sistema foi desenvolvido para PCMs a base de nitrato com alto ponto de fusão, entre  $120^{\circ}C - 350^{\circ}C$ , e a técnica para o revestimento em metal garantiu a resistência mecânica das cápsulas para o empilhamento das mesmas dentro do reator térmico. A figura (22) mostra as cápsulas em diferentes estágios do ciclo térmico.

A pesquisa de [FLUECKIGER; GARIMELLA](#), por sua vez, trata de aplicações de PCMs para o aumento do calor latente armazenado em tanques de princípio termoclina em usinas de energia solar concentrada, CSPs (do inglês, *Concentrated Solar Power*). O funcionamento deste tipo de tanque de armazenamento é baseado nos efeitos de variação de temperatura em ambientes de água doce ou marítima, utilizando sais fundidos para a troca de calor sensível e material rochoso para o preenchimento do tanque. O principal empecilho para continuação do crescimento e maturação de tecnologias em CSPs é disponibilidade intermitente da luz do sol ao longo de múltiplas escalas de tempo. O armazenamento térmico, portanto, é essencial para desacoplar a produção de energia dos coletores solares, permitindo que a usina satisfaça a demanda de energia elétrica independentemente das condições de iluminação solar predominantes ([FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014](#)).

As CSPs existentes utilizam de sistemas baseados em calor sensível, nos quais são empregados dois tanques de armazenamento, onde o excedente de fluido quente e fluido frio são mantidos separadamente ([FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014](#)). A alternativa analisada conta com apenas um tanque de armazenamento onde são mantidos os sais quentes e frios, separados apenas por estratificação térmica, uma vez que os sais quentes apresentam menor densidade que os sais frios. Uma modificação promissora seria substituir as convencionais rochas de preenchimento deste tipo de tanque por PCMs encapsulados, contribuindo com mecanismo de armazenamento de calor latente para aumentar a densidade de energia total do sistema.

[FLUECKIGER; GARIMELLA](#) apresenta uma nova abordagem de volumes finitos para simular o transporte de massa e energia em um tanque de calor latente, com baixo dispêndio computacional. A figura (23) subsequente esquematiza o funcionamento de tanques termoclina, utilizando PCMs encapsulados como material de preenchimento.

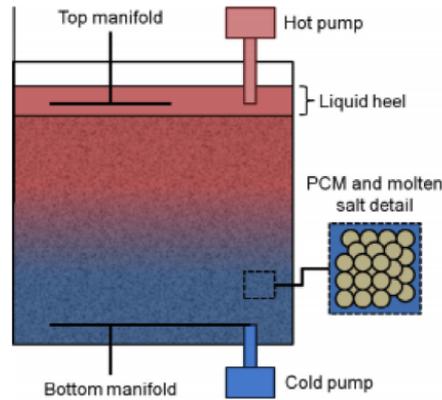


Figura 23: Esquema do tanque termoclina. Fonte: (FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014)

Tanques preenchidos com apenas um tipo de PCM não produzem aumento substancial no armazenamento anual nem geração de energia, em comparação com as rochas de preenchimento em tanques convencionais de mesmo volume (FLUECKIGER; GARIMELLA, 2014). Propõe-se, portanto, estrutura de preenchimento constituída por um meio poroso utilizando cápsulas de PCMs em cascatas de pontos de fusão distintos, como alternativa às rochas quartzita.

No modelo numérico de baixo dispêndio computacional proposto, o interior do tanque conta com duas regiões de meio poroso contendo os sais derretidos e os PCMs encapsulados. Foram estipuladas misturas eutéticas de sais comerciais denominadas Sais Solares (60%  $\text{NaNO}_3$  e 40%  $\text{KNO}_3$ ), que operam entre  $300^\circ\text{C}$  e  $600^\circ\text{C}$  e possuem calor específico médio de  $1520\text{J/kgK}$ . Para facilitar a comparação com tanques convencionais, utilizou-se PCM hipotético com propriedades equivalentes ao de rochas quartzitas: densidade de  $2500\text{kg/m}^3$ ; calor específico  $830\text{J/kgK}$  e condutividade térmica de  $5\text{W/mK}$ .

Dentro do tanque, utiliza-se estrutura de preenchimento gradual com PCMs de ponto de fusão distintos, onde a organização das cápsulas é feita de maneira que o ponto de fusão aumente com a altura axial. Materiais com baixo ponto de fusão são posicionados no fundo do tanque, enquanto os de alto ponto de fusão ficam mais próximos do topo. O modelo simula a operação de um ano inteiro em usina CSP. Para o PCM hipotético com calor latente de fusão de  $124.5\text{kJ/kg}$ , pré-definido pelo usuário, observou-se que a estrutura de cascatas com três camadas produz aumento de 9.7% no output de energia anual e uma diminuição de 16% do diâmetro do tanque de armazenamento.

Ainda sobre a preocupação em impulsionar o abastecimento energético de CSPs, buscando materiais com performance térmica apropriada, foi realizado estudo por (MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015) apresentando PCMs como candidato promissor para executar a função. Foi sugerido novamente sistema de armazenamento para usinas utilizando tanque termoclina, com cápsulas de PCMs junto ao material de preenchimento.

A maioria dos CSPs construídos recentemente possuem sistema de armazenamento de calor sensível utilizando sais fundidos como meio de armazenamento. A principal des-

vantagem é que a mistura de sais congela a temperaturas muito altas, em torno de  $220^{\circ}\text{C}$  dependendo de sua composição (MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015). Isso implica em altos custos de manutenção para impedir a solidificação dos sais. Ainda mais, o custo do insumo armazenamento por si só já é elevado, tendo em vista que grandes volumes de material são necessários para atingir a quantidade suficiente de energia armazenada. Por outro lado, o calor latente de fusão de qualquer substância é muito maior que seu calor específico, fazendo com que PCMs tenham maior capacidade de armazenamento volumétrico do que materiais de armazenamento sensível e, conseqüentemente, menor tamanho.

Analogamente ao trabalho de FLUECKIGER; GARIMELLA, a ideia de MUÑOZ-SÁNCHEZ et al. foi utilizar diversos PCMs com pontos de fusão distintos para substituir parte do material de preenchimento dentro de um tanque termoclina. Novamente os PCMs com ponto de fusão mais alto se encontram no topo da pilha de cápsulas, enquanto aqueles com menor ponto de fusão se encontram na camada mais de baixo. Assim, o calor no tanque é armazenado pelo sal derretido, o material de preenchimento e também pelo material PCM encapsulado. Empregando-se diversos PCMs é possível atingir sistemas mais eficientes e estáveis, onde a configuração utilizada pode viabilizar transferência de calor de maneira quase isotérmica. O resultado é um sistema mais eficiente do ponto de vista termodinâmico (MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015).

Utilizou-se uma mistura de nitratos contendo 60% de  $\text{NaNO}_3$  e 40% de  $\text{KNO}_3$  (sal solar). A seleção dos PCMs foi baseada na temperatura de entrada e saída dos sais fundidos. Selecionaram-se, desta maneira, PCMs distintos onde aqueles da parte superior do tanque possuem ponto de fusão entre  $5^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$  a menos que a temperatura máxima do fluido quente. Analogamente, os PCMs do fundo do tanque possuem ponto de fusão entre  $5^{\circ}\text{C}$  e  $25^{\circ}\text{C}$  a mais que a temperatura de entrada do fluido quente.

De acordo com MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., um TES engloba três conceitos principais: o meio de armazenamento, o mecanismo de transferência de calor e o sistema de contenção. O meio de armazenamento refere-se ao material que carrega a energia térmica, cuja natureza e características dependem fortemente do mecanismo de armazenamento de calor, que envolve a mudança na energia interna do material (MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015). A figura (24) a seguir ilustra o sistema de armazenamento proposto e as faixas de temperatura de fusão para cada PCM utilizado.

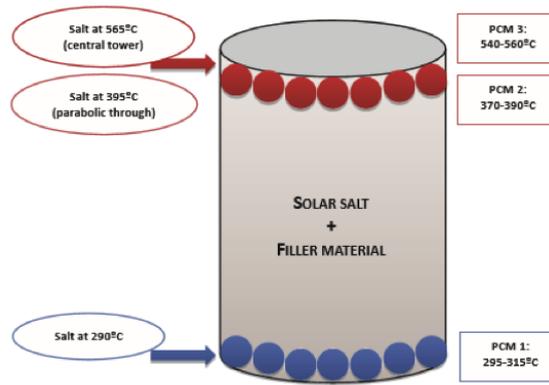


Figura 24: Tanque de acumulação térmica proposto para múltiplos PCMs. Fonte: (MUÑOZ-SÁNCHEZ et al., 2015)

A partir do modelo teórico desenvolvido utilizando cápsulas de PCMs em tanques termoclina para usinas CSPs, observa-se aumento significativo no armazenamento térmico. Os processos de encapsulamento foram tecnicamente avaliados para cada opção proposta por MUÑOZ-SÁNCHEZ et al. (nitratos ou metais) e desenvolveu-se estimativa acurada dos custos de encapsulamento dos PCMs e estruturas metálicas a nível industrial. Esta é uma questão crítica para definir o melhor material e avaliar o interesse econômico do sistema proposto. Tendo estas questões em vista, concluiu-se que as melhores técnicas de encapsulamento são a fabricação da casca da cápsula, para o caso dos metais, e a criação de revestimento externo para cobrir os sais PCMs.

Tratando-se de sistemas de refrigeração predial, o uso de armazenamento térmico de energia juntamente com bombas de calor é uma forma de reduzir significativamente os custos de operação e otimizar o design do equipamento. No trabalho de (WU et al., 2016) é descrito um sistema de refrigeração de larga escala, obtendo resultados experimentais para o comportamento transiente. No modelo dinâmico proposto, o escoamento de fluido através dos trocadores de calor e do tanque de armazenamento é representado por uma sequência de reatores de agitação contínua (*Continuous Stirred Tank Reactors*).

O tanque de armazenamento é composto por cápsulas de gelo/água, selecionados para aplicações em ar condicionado de edificações. A água é amplamente utilizada como PCM para armazenamento térmico devido a seu alto calor latente, além de apresentar boa estabilidade, baixo custo, fácil aquisição, nenhuma preocupação com poluição ambiental e compatibilidade com equipamentos de ar condicionado. O sistema se divide em três subsistemas: bomba de calor a ar/água de  $40kW$  utilizando o refrigerante R410A; sistema de armazenamento com PCMs; três resistências elétricas conectadas em paralelo ( $40kW$ ,  $20kW$  e  $20kW$ ) e três bombas. As equações de balanço de energia e massa são formuladas para cada elemento da rede para descrever a evolução do sistema. Esta abordagem permite representar o sistema por um conjunto de equações diferenciais que são resolvidas numericamente.

Vale ressaltar o método utilizado por (WU et al., 2015) para o modelo de balanço populacional no processo de carregamento de cápsulas de PCM em um tanque de armazenamento de energia a frio. Sugeriu-se a abordagem pela equação de balanço populacional, resultando em um conjunto de equações diferenciais parciais discretizadas pelo método de diferenças finitas, onde o subresfriamento é considerado como condição de contorno.

Para a estrutura global do modelo, assumiu-se que o escoamento do fluido refrigerante é equivalente a uma cascata de  $N$  reatores de agitação contínua. Em seguida, foi descrito submodelo elementar proposto para o  $k$ -ésimo tanque ( $k = 1..N$ ), onde o modelo completo seria a interconexão dos  $N$  submodelos elementares. A população de cápsulas é associada ao  $k$ -ésimo reator de agitação contínua. Sabendo-se que o processo de solidificação não tem início nem término no mesmo instante para todas as cápsulas, o número total de cápsulas é dividido em um somatório de cápsulas com conteúdo no estado sólido, cápsulas com conteúdo no estado líquido e cápsulas contendo mistura de sólido e líquido.

O modelo é aplicado para simulação do ciclo de carregamento de um sistema de armazenamento utilizando gelo. O tanque cilíndrico é preenchido com cápsulas esféricas contendo PCMs, com fluido refrigerante escoando pelo leito fixo formado pelas cápsulas. O esquema representado na Fig.(25) ilustra a configuração do sistema.

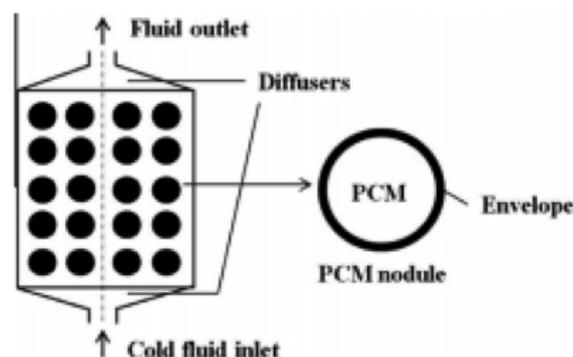


Figura 25: Esquema do sistema de armazenamento. Fonte:(WU et al., 2015)

O fenômeno de subresfriamento foi considerado pelo autor, utilizando modelo de taxa de nucleação que permite representar o caráter estocástico do processo de solidificação durante o resfriamento. As transições entre os estados das cápsulas são tidas como condições de contorno para as equações de população. O modelo é validado pela comparação com resultados experimentais, onde são observados resultados satisfatórios. Até onde se sabe, a metodologia de WU et al. é pioneira em utilizar a abordagem de equações de balanço populacional para a modelagem de armazenamento térmico com PCMs.

Partindo-se da revisão da literatura descrita neste capítulo e dos conhecimentos adquiridos desta maneira, foi desenvolvida metodologia para o macroencapsulamento de

materiais de mudança de fase, buscando realizar estudo experimental de sistemas de armazenamento térmico utilizando calor latente. A metodologia desenvolvida no presente trabalho é apresentada no capítulo subsequente.

## 2 METODOLOGIA DE ENCAPSULAMENTO

No decorrer deste capítulo, apresentam-se duas metodologias distintas desenvolvidas para o encapsulamento de materiais de mudança de fase, objetivando aplicações de média e baixa temperatura. [MUÑOZ-SÁNCHEZ et al.](#), como visto na seção 1.3, consideram em seu trabalho que as melhores técnicas de encapsulamento são a fabricação da membrana que contém o PCM ou a aplicação do revestimento sobre o material no estado sólido, a depender da seleção deste último. A primeira metodologia apresentada consiste na utilização de moldes de injeção com geometria pré-definida, de maneira que o PCM injetado solidifique com o formato desejado para as cápsulas e, em seguida, seja aplicado o revestimento sobre o material. A segunda metodologia proposta resume-se a confecção da membrana de contenção para o PCM. A técnica baseia-se na produção do revestimento da cápsula para posterior injeção do material no estado líquido, ou seja, na fabricação de uma cápsula oca, com a espessura desejada para o revestimento. Ambos os métodos utilizados concordam com os trabalhos de [MUÑOZ-SÁNCHEZ et al.](#), [ALAM et al.](#) e [CHENG; ZHAI](#), que apresentam procedimentos análogos àqueles desenvolvidos no presente estudo.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

O projeto de um sistema de armazenamento de energia térmica de calor latente tem como uma de suas premissas a determinação do material de mudança de fase a ser utilizado, como já visto nos capítulos anteriores. O material selecionado para os sistemas de encapsulamento desenvolvidos foi a cera de palma, Bio-PCM de origem brasileira cuja caracterização foi feita por aluna de mestrado do Laboratório de Energia e Ambiente da Universidade de Brasília.

O método utilizado para a caracterização da cera de palma foi o *T-history*, proposto inicialmente por [ZHANG Y; JIANG Y](#) e aprimorado por [HONG; KIM; KIM](#), que corrigiu algumas das considerações inicialmente feitas. O procedimento é simples, capaz de determinar o ponto de fusão, calor latente, calor específico e condutividade térmica de diversos materiais. Diferentemente de outros métodos convencionais, como DSC, DTA e

TGA, o *T-history* permite a caracterização de vários PCMs simultaneamente e possibilita a visualização da mudança de fase dos materiais. Os métodos convencionais utilizam porções muito pequenas de material em sua análise, o que pode resultar em uma caracterização equivocada, tendo em vista que as propriedades variam de acordo com a quantidade de material utilizada.

O método original continha suposições equivocadas em suas análises, como a utilização de nível de subresfriamento no período final de mudança de fase, sendo que esta propriedade depende de parâmetros como o tempo de resfriamento, vibração, pureza da amostra e independe do ponto de mudança de fase. Além disso, a metodologia ignora o calor sensível durante a mudança de estado do material, o que acarreta em erros significativos na determinação do calor latente de fusão. HONG; KIM; KIM promoveram modificações no método original para obter resultados mais acurados, metodologia esta utilizada para a caracterização da cera de palma no presente trabalho.

A experimentação do método *T-history* é ilustrada pela Fig.(26). Dois tubos de teste são preenchidos, respectivamente, com o PCM a ser caracterizado e um material de referência (geralmente água, que possui propriedades conhecidas), cujas temperaturas são equivalentes e estão inicialmente acima do ponto de solidificação do PCM. Os tubos são mantidos na posição vertical e imersos em um banho de água com temperatura constante e, em seguida, são repentinamente expostos ao ar ambiente. Após este processo, as temperaturas nos tubos são medidas por meio de termopares e são traçadas curvas *T-history* para a variação de temperatura do PCM e do material de referência ao longo do tempo, como pode ser visto nas Figs. (27) e (28), respectivamente. As propriedades térmicas são calculadas pela análise das curvas de resfriamento obtidas.

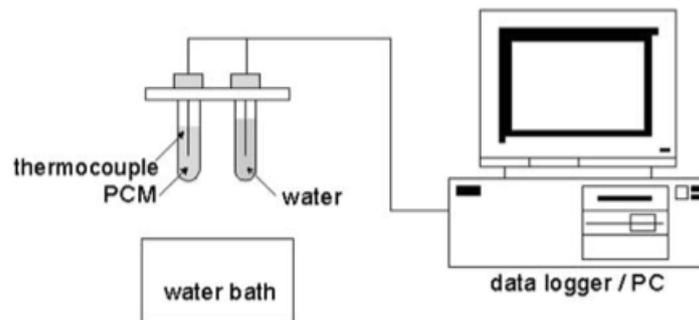


Figura 26: Diagrama esquemático do aparato experimental. Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004)

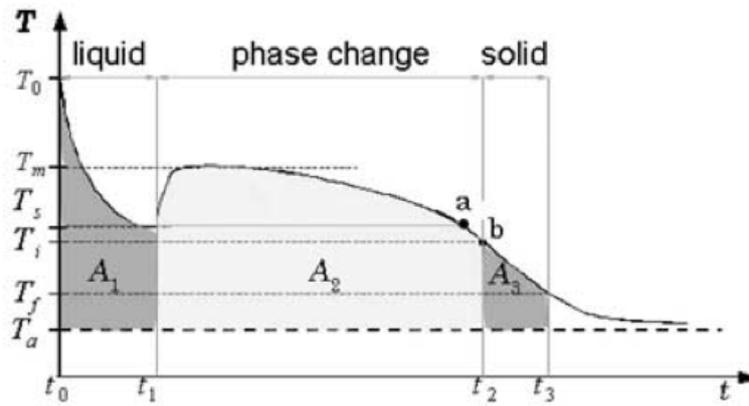


Figura 27: Curva  $T$ -history do material de mudança de fase. Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004)

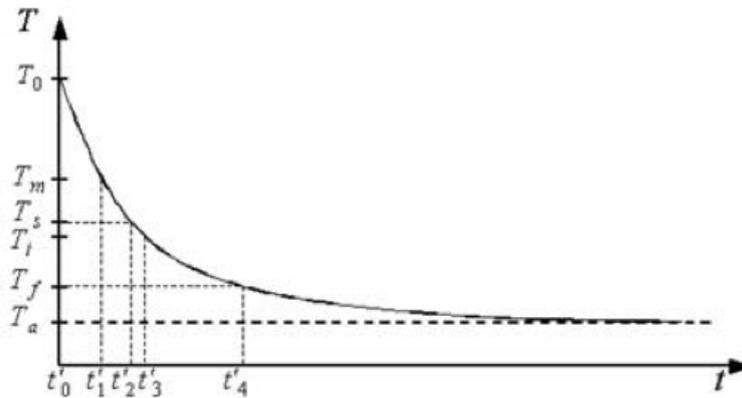


Figura 28: Curva  $T$ -history para o material de referência (água). Fonte:(HONG; KIM; KIM, 2004)

Como relatado anteriormente, o método original proposto por ZHANG Y; JIANG Y apresenta falhas na consideração de subresfriamento no final da mudança de estado e negligencia o calor sensível na mudança de fase. Na figura (27), o ponto  $a$  representa a temperatura na qual o material, durante a mudança de fase, atinge o ponto de subresfriamento de sua fase líquida, suposição essa feita no primeiro método. No método modificado, é utilizado o ponto de inflexão  $b$  como fronteira entre os períodos de mudança de fase e estado sólido do material. Essa diferença de temperaturas entre os pontos  $a$  e  $b$  geram diferenças significativas nos resultados, justificando a escolha do método de HONG; KIM; KIM para a caracterização da cera de palma.

As equações de energia corrigidas utilizadas para determinação das propriedades do material, assim como a tabela com a descrição de suas variáveis, estão expostas em APÊNDICE I. As tabelas (2) e (3) a seguir mostram os dados experimentais utilizados e os valores determinados de  $C_{p,s}$ ,  $C_{p,l}$ ,  $H_m$  e  $T_s$ , respectivamente.

Tabela 2: Dados Experimentais.

| Dados Experimentais | Valor      |
|---------------------|------------|
| $m_p$               | 0,01097 kg |
| $m_w$               | 0,012 kg   |
| $m_t$               | 0,00927 kg |
| $C_{p,w}$           | 4200 J/kgK |
| $C_{p,t}$           | 672 J/kgK  |

Tabela 3: Propriedades obtidas para a cera de palma.

| Propriedades | Valor         |
|--------------|---------------|
| $C_{p,s}$    | 2,067 kJ/kgK  |
| $C_{p,l}$    | 2,201 kJ/kgK  |
| $H_m$        | 132,483 kJ/kg |
| $T_s$        | 42 °C         |

## 2.2 ENCAPSULAMENTO POR MOLDE

A primeira proposta para o desenvolvimento de macrocápsulas contendo cera de palma consiste na aplicação de revestimento sobre o material em seu estado sólido, a fim de inibir o contato da cera com o meio externo durante o processo de mudança de fase. As cápsulas devem acomodar a expansão volumétrica do material durante o processo, conservando a integridade de sua estrutura e geometria ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento. A técnica que permite a obtenção da cera em estado sólido com a geometria desejada é a utilização de moldes para a injeção do material no estado líquido. Uma vez que a cera retorna ao estado sólido, é possível realizar a aplicação do material de revestimento sobre a mesma.

### 2.2.1 PROJETO DO MOLDE

Tendo em vista que a geometria proposta no trabalho de [CHENG; ZHAI](#), onde foi investigada a performance térmica de geometrias distintas, apresenta diversas vantagens em relação as demais, os mesmos parâmetros foram adotados para a estrutura das cápsulas que pretende-se desenvolver. A estrutura de hemácias (glóbulos vermelhos), que apresentou o menor tempo de carregamento e maior taxa média de carga dentre as geometrias analisadas, foi determinada para a fabricação dos moldes.

Partindo-se da parametrização da superfície da célula sanguínea, esquematizada pela Fig.(6) do primeiro capítulo, desenvolveu-se modelo CAD dos moldes utilizando o programa *SolidWorks 2017*. O software oferece uma interface simples para a construção de modelos virtuais tridimensionais, além de ser compatível com o sistema utilizado no

centro de usinagem CNC empregado para a fabricação dos moldes. A razão  $L:H:r$  definida para o presente trabalho aproxima-se de  $7 : 1 : 2$ , que em escala representa um glóbulo vermelho real do corpo humano. Na tabela (4) abaixo encontram-se os valores de  $R$ ,  $r$ ,  $H$  e  $L$  para a confecção das cápsulas.

Tabela 4: Parâmetros utilizados para o projeto do molde.

| $R$   | $r$  | $H$  | $L$  |
|-------|------|------|------|
| [mm]  | [mm] | [mm] | [mm] |
| 27,37 | 8,98 | 3,59 | 28   |

O molde é composto de duas partes que, quando encaixadas, compõem a geometria de hemácia em seu interior, conforme ilustra a Fig.(29). Uma das partes do molde conta com um ressalto próximo ao espaço destinado ao preenchimento, enquanto a outra apresenta rebaixo com mesmas dimensões. Esta técnica contribui para manter o posicionamento, promovendo melhor encaixe entre as duas partes e impedindo vazamentos. Ainda mais, os moldes devem ter furos de respiro em sua estrutura, para que na medida em que a cera for sendo injetada o ar ali contido encontre saída.



Figura 29: Modelo CAD 3D do molde de injeção.

## 2.2.2 FABRICAÇÃO DO MOLDE

A fabricação do molde foi realizada utilizando uma fresadora CNC *router* de três eixos e precisão de  $0,05\text{ mm}$ , projetada e construída por ex-alunos de graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, conforme mostra a Fig.(30). As principais especificações da fresadora CNC estão descritas na Tab.(5) a seguir.



Figura 30: Fresadora CNC utilizada para confecção dos moldes.

Tabela 5: Especificações técnicas da fresadora CNC. Fonte:([RAFAEL; FELIPE, 2015](#))

| <b>Dados Técnicos</b>              | <b>Unidade</b> | <b>Fresadora</b> |
|------------------------------------|----------------|------------------|
| Dimensões da mesa                  | <i>mm</i>      | 1050 x 960       |
| Curso longitudinal (X)             | <i>mm</i>      | 700              |
| Curso transversal (Y)              | <i>mm</i>      | 500              |
| Curso vertical (Z)                 | <i>mm</i>      | 250              |
| Guia linear                        | -              | Kalatec TR15     |
| Avanço longitudinal                | <i>mm/min</i>  | 1350             |
| Avanço transversal                 | <i>mm/min</i>  | 1350             |
| Avanço vertical                    | <i>mm/min</i>  | 300              |
| Motor de avanço do eixo horizontal | <i>W</i>       | 400              |
| Motor de avanço do eixo vertical   | <i>W</i>       | 400              |
| Potência do Spindle                | <i>W</i>       | 3000             |
| Lubrificação                       | -              | Manual           |
| Peso líquido aproximado            | <i>kg</i>      | 400              |

O molde foi confeccionado em poliuretano de alta densidade com fragmentos de alumínio, polímero que apresenta facilidade de usinagem e é capaz de resistir a altas temperaturas, muito além do ponto de fusão da cera de palma utilizada. Cinco furos foram feitos em um dos lados do molde, sendo o furo central de alimentação e os outros quatro ao redor servindo de respiro para retirada do ar de seu interior. O molde fabricado para injeção do Bio-PCM é mostrado na Fig.(31) abaixo.



Figura 31: Moldes fabricados pela fresadora CNC.

### 2.2.3 FABRICAÇÃO DA CÁPSULA

Uma vez concluído o processo de fabricação do molde, a cera pode ser injetada de acordo com os seguintes procedimentos:

1. Derreter a cera de palma em recipiente imerso em água fervendo;
2. Pincelar mistura de água com detergente nas paredes internas do molde, com intuito de facilitar o desmolde da cápsula;
3. Injetar o material no estado líquido, utilizando seringa de plástico comercial;
4. Aguardar o término do processo de solidificação, mantendo-se o molde a temperatura ambiente. Variações bruscas de temperatura podem causar rachaduras na cápsula devido a contração térmica;
5. Desmoldar a cera no estado sólido.

A cápsula produzida desta maneira, como ilustra a Fig.(32), estará pronta para receber o revestimento, após o processo de desmoldagem. Um dos desafios do presente trabalho foi a seleção de material de revestimento compatível com o PCM. A membrana que envolve a cera deve apresentar boa flexibilidade para acomodar expansões volumétricas durante o processo de mudança de fase, além de resistência mecânica que suporte o peso do conjunto de cápsulas empilhadas dentro de determinado recipiente sob ação de escoamento. O revestimento deve confinar o material em seu interior evitando que o PCM entre em contato com o ambiente externo às cápsulas, mantendo sua integridade e conservando sua geometria ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento. Necessita-se avaliação acerca do aspecto corrosivo entre o material da membrana e a cera orgânica em estado líquido.



Figura 32: Cera de palma em formato de hemácia produzida pela injeção do material no molde.

Percebe-se, pela análise do estado da arte apresentada anteriormente, que em grande parte dos estudos e experimentos realizados com este tipo de tecnologia o material de revestimento é determinado majoritariamente de maneira empírica, com preferência ao uso de materiais poliméricos. O processo de revestimento selecionado para o presente projeto baseia-se na técnica de emborrachamento líquido a frio, utilizando o impermeabilizante comercial PLASTI FILM, da empresa QUIMATIC, exibido na Fig.(33). O material de revestimento possui propriedades impermeabilizantes e de acolchoamento, oferece proteção contra ferrugem, é resistente à acidez e água salgada, além de ser lavável e possuir vida útil de vários anos. A ficha técnica do produto é apresentada no ANEXO I.



Figura 33: Material de revestimento, PLASTI FILM.

O processo de revestimento da cápsula pode ser feito de duas maneiras: pinceladas ou imersão. Foi estabelecido procedimento de imersão, com finalidade de garantir a homogeneidade da camada de material sobre toda extensão da cápsula. A superfície a ser revestida deve ser preparada antes de receber o banho de borracha líquida, devendo estar devidamente limpa e seca, livre de oleosidade ou ferrugem. O revestimento foi realizado seguindo as instruções do próprio fabricante:

- (i) Imergir a cápsula em recipiente contendo o material, retirando-a lentamente (2 *cm* a cada 5 segundos) para evitar o gotejamento excessivo e a formação de bolhas de ar;
- (ii) Pendurar a cápsula para secagem, evitando o sol direto e correntes de ar, como ilustra a Fig.(34);



Figura 34: Cápsula em processo de secagem.

Recomenda-se, para aumentar a espessura, aguardar pelo menos 30 minutos antes de realizar nova imersão no material. A secagem completa ocorre após 4 horas, por camada aplicada. O primeiro protótipo desenvolvido conta com cinco camadas, onde deseja-se determinar a espessura total do revestimento. A análise de resistência térmica à condução proporcionada pela membrana confeccionada é descrita no Capítulo 3, a cápsula revestida pelo emborrachamento líquido é apresentada na Fig.(35) a seguir.



Figura 35: Cápsula finalizada pelo processo de injeção de cera no molde.

## 2.3 ENCAPSULAMENTO POR IMPRESSÃO 3D

### 2.3.1 PROJETO DA MEMBRANA DA CÁPSULA

A segunda metodologia empregada para a fabricação dos protótipos consiste na confecção da membrana de contenção do PCM, em primeira instância, para em seguida ser injetada a cera orgânica em fase líquida. Foi utilizada fabricação por impressão 3D com *infill* 100%, em filamento de material ABS, altura de camada de 0,2 mm e temperatura de extrusão de 220°C, utilizando a impressora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, Fig.(36).

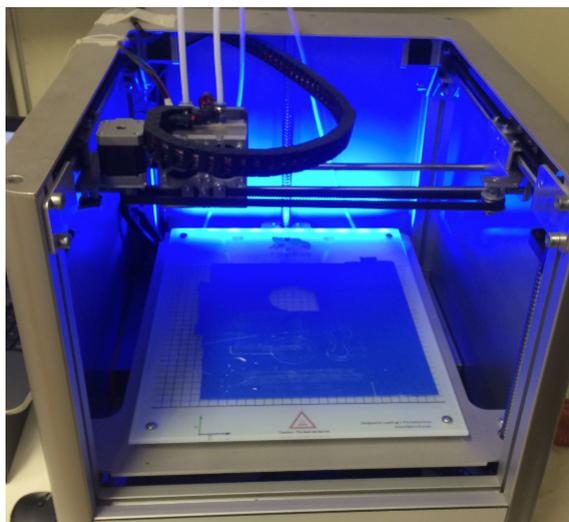


Figura 36: Impressora 3D utilizada no processo de fabricação das membranas.

Desenvolveu-se modelo CAD 3D da membrana da cápsula dispondo do software *SolidWorks*, no qual selecionou-se o valor de 2 mm para sua espessura, estimativa feita a partir de valores típicos observados na literatura. Deseja-se que a estrutura possua boa resistência mecânica, mantendo sua integridade física durante os ciclos de carregamento e descarregamento em recipiente repleto de cápsulas. Contudo, o revestimento da cápsula não deve ser demasiado espesso a ponto de atuar como isolante térmico, prejudicando desta maneira a troca de calor entre a cera orgânica e o meio externo. A figura (37) apresenta o modelo computacional desenvolvido para a membrana, construído a partir da revolução da curva de parametrização do formato de hemácias proposta por [CHENG; ZHAI](#).

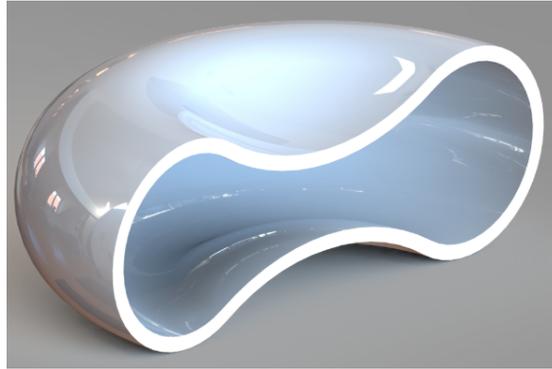


Figura 37: Modelo CAD 3D das membranas a serem impressas.

A impressão da peça foi feita por meio da deposição do material ABS, cujas propriedades foram retiradas do MATWEB, *site* que contém informações e propriedades de materiais diversos, e são apresentadas na Tab.(6) subsequente. Fabricou-se metade da cápsula por vez, com o intuito de preencher as duas partes com a cera orgânica no estado líquido e posteriormente acoplá-las, uma vez finalizado o processo de solidificação do material. A figura (38) apresenta o produto da impressão 3D da membrana da cápsula.

Tabela 6: Propriedades do material ABS. Fonte: MATWEB

| Densidade<br>[ $kg/m^3$ ] | Calor Específico<br>[ $J/kg^{\circ}C$ ] | Condutividade Térmica<br>[ $W/mK$ ] | Temperatura de fusão<br>[ $^{\circ}C$ ] |
|---------------------------|---|-------------------------------------|---|
| 1070                      | 2050                                    | 0,176                               | 217                                     |



Figura 38: Resultado do processo de impressão 3D.

### 2.3.2 MONTAGEM DA CÁPSULA

Concluído o processo de impressão, foi possível realizar a injeção do PCM em fase líquida com auxílio de seringa de plástico, mantendo-se a peça apoiada até o material de preenchimento solidificar-se por completo, como é ilustrado na Fig.(39). De posse das duas metades de cápsulas preenchidas, deve-se preocupar com o método de acoplamento e vedação das mesmas. Para tanto, foi utilizado adesivo cianoacrilato comercial, popularmente conhecido como super cola, que atua como elemento de solda sobre o conjunto.

Sabendo-se que o ABS é solúvel em acetona, aplicou-se este composto orgânico sobre o vão formado pelo contato das duas partes, com o intuito de impedir o vazamento do material de preenchimento durante as operações. O produto final da fabricação através da metodologia apresentada é ilustrado na Fig.(40) a seguir.



Figura 39: Injeção de cera de palma nas cápsulas impressas.



Figura 40: Montagem final da cápsula produzida por impressão 3D.

## 2.4 ANÁLISES PRELIMINARES

Uma vez concluída a fabricação dos protótipos, testes e medições devem ser realizados com o intuito de verificar a integridade da estrutura das cápsulas e avaliar propriedades importantes das mesmas, tais como a razão mássica entre núcleo e membrana, resistência térmica e a espessura de revestimento.

Durante a execução da primeira metodologia apresentada (utilizando molde de injeção) foram tomadas medidas de massa das cápsulas, com e sem revestimento, auxiliados por balança digital com precisão de 0,1 g. Subtraindo-se os valores encontrados é possível

determinar a dimensão da massa da membrana que contém o material, como indica a Eq.(2.1) a seguir.

$$m_r = m_t - m_c \quad (2.1)$$

Onde  $m_r$  representa a massa da membrana de contenção,  $m_t$  a massa da cápsula com revestimento e  $m_c$  a massa da cápsula sem revestimento, todos os valores dados em gramas.

O valor de  $m_r$  é obtido de maneira direta, para o caso de impressão 3D. Calcula-se indiretamente, portanto, o valor de  $m_c$  subtraindo-se o valor da massa da cápsula após o preenchimento pela massa da membrana, de acordo com a Eq.(2.2):

$$m_c = m_t - m_r \quad (2.2)$$

Conhecendo os valores de  $m_r$  e  $m_c$ , para os dois casos, é possível determinar a razão mássica  $r_{nr}$  entre o núcleo e o revestimento, que relaciona as quantidades de material de mudança de fase utilizado com a massa total do protótipo. Essa proporção associa-se à capacidade de armazenar energia do protótipo e é calculada de acordo a Eq.(2.3) a seguir.

$$r_{nr} = \frac{m_c}{m_t} \quad (2.3)$$

Utilizando o paquímetro digital com erro de  $\pm 0,01mm$ , foram realizadas dez medições da espessura do revestimento de cada protótipo desenvolvido, verificando a precisão dos processos de fabricação. Conhecendo a dimensão da espessura, foi possível efetuar cálculo do valor teórico da resistência térmica de cada tipo de revestimento. A resistência térmica  $R$  [ $m^2K/W$ ] de um material corresponde a dificuldade de transferência de calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material  $e$  [ $m$ ] e sua condutividade térmica  $k$  [ $W/mK$ ], como indica a Eq.(2.4) a seguir.

$$R = \frac{e}{k} \quad (2.4)$$

A análise dos dados experimentais conta com incertezas e perturbações nas medidas tomadas. Quando a determinação de uma grandeza é feita através de uma relação, ou medição indireta, entre valores medidos diretamente, os quais vêm afetadas de um determinado erro, é necessário estimar a incerteza associada aos valores obtidos por meio da propagação dos erros parciais (NETO; MORAIS, 2014).

Seja  $f$  a grandeza que se pretende determinar, a qual é função das variáveis  $x_1, x_2, \dots, x_n$  cujos erros respectivos são  $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ . Então, o erro associado a  $f$  pode ser calculado com base na expressão geral de propagação dos erros, representada pela

Eq.(2.5) que segue.

$$\Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \dots + \left| \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \Delta x_n \quad (2.5)$$

Os resultados obtidos a partir das metodologias propostas anteriormente são apresentados a seguir, onde são discutidas as dificuldades e desafios encontrados ao longo do processo de fabricação das cápsulas de Bio-PCMs. A discussão dos procedimentos, bem como das considerações necessárias para sua realização, são expostas visando possibilitar sua reprodução de maneira descomplicada. Ponderações são feitas acerca dos processos de solidificação e encapsulamento para que erros e empecilhos sejam evitados no caso de produção em escala. Evidencia-se que a avaliação experimental dos modelos e protótipos produzidos é de extrema importância para que seja comprovada a eficácia do sistema projetado.

## 2.4.1 ENCAPSULAMENTO POR MOLDE

### 2.4.1.1 RAZÃO MÁSSICA NÚCLEO-REVESTIMENTO

Analisou-se, primeiramente, a razão mássica entre núcleo e membrana do protótipo construído a partir desta metodologia. Vale ressaltar que uma das vantagens entre processos de macroencapsulamento, em detrimento de micro ou nanoencapsulamento, é o valor elevado da razão mássica de seu produto, como mencionado na revisão bibliográfica apresentada. Na literatura, os resultados obtidos para este parâmetro em processos de microencapsulamento são inferiores a 50%, o que implica em uma pequena quantidade de energia armazenada e, conseqüentemente, maior custo capital de armazenamento. O macroencapsulamento, apesar de apresentar menor taxa de transferência de calor, possui maior densidade de armazenamento energético, além de reduzir os riscos relacionados ao vazamento do material que compõe o núcleo da cápsula.

Foram tomadas medidas da massa da cápsula antes e após a aplicação do revestimento,  $m_c$  e  $m_t$  respectivamente, utilizando-se balança digital com precisão 0,1 g. A partir destes resultados, calculou-se a massa do revestimento da cápsula subtraindo-se os valores de  $m_t$  e  $m_r$ . A tabela (7) subsequente apresenta as medidas de massa obtidas, todos os valores em gramas.

Tabela 7: Medições de massa para a primeira metodologia.

| Massa da cápsula sem revestimento | Massa da cápsula com revestimento | Massa do revestimento |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| 30,0 ± 0,1                        | 34,6 ± 0,1                        | 4,6 ± 0,2             |

Uma vez conhecidos os valores de massa avaliados, a razão mássica entre o núcleo da cápsula e o material de revestimento foi determinado por meio da Eq.(2.3). A grandeza  $r_{nr}$  calculada foi de 86,7%, resultado que caracteriza alta capacidade de armazenamento de energia segundo CHENG; ZHAI. Estima-se, desta maneira, o valor médio de massa adicionada à cápsula por demão de revestimento aplicado como sendo de 0,8 g, tendo em vista que o primeiro protótipo construído contou com cinco demãos de revestimento.

#### 2.4.1.2 ESPESSURA DO REVESTIMENTO E RESISTÊNCIA TÉRMICA

A transferência de calor entre o fluido circundante e o material de mudança de fase no interior das cápsulas é influenciada por seu revestimento, isto posto é importante que seja analisada a espessura desta membrana que contém o PCM. Tratando-se do método de imersão da cera no estado sólido em emborrachamento líquido, a espessura do revestimento produzido desta maneira dependerá do número de demãos aplicadas à estrutura. Para a realização do presente trabalho, o número de demãos aplicadas ao PCM desmoldado foi arbitrado em cinco, como já visto anteriormente. Pretendia-se atingir espessura entre 1 mm e 2 mm através do procedimento realizado como determinado na fase de projeto do protótipo, embasando-se em valores típicos observados na literatura.

O cálculo da espessura do revestimento aplicado à cera foi dado de maneira indireta, partindo-se das medidas de diâmetro das cápsulas tomados com o auxílio de paquímetro digital de precisão igual a 0,01 mm. Subtraem-se os valores do diâmetro das cápsulas antes e depois de revestidas, dividindo-se o resultado pela metade para obter a estimativa de espessura. O valor mensurado foi alcançado por meio da realização de dez medições. A seguir, a Tab.(8) indica os valores de diâmetro medidos, bem como suas médias e desvios-padrão. Por fim, apresenta-se o valor de espessura média obtido pelo processo.

Tabela 8: Medições do diâmetro das cápsulas para o cálculo de espessura.

| Medida                      | Diâmetro [mm]            |                          |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                             | Cápsula sem revestimento | Cápsula com revestimento |
| 1                           | 55,46 ± 0,01             | 57,02 ± 0,01             |
| 2                           | 55,71 ± 0,01             | 56,60 ± 0,01             |
| 3                           | 55,69 ± 0,01             | 56,76 ± 0,01             |
| 4                           | 55,54 ± 0,01             | 57,03 ± 0,01             |
| 5                           | 55,60 ± 0,01             | 56,71 ± 0,01             |
| 6                           | 55,60 ± 0,01             | 57,00 ± 0,01             |
| 7                           | 55,48 ± 0,01             | 55,61 ± 0,01             |
| 8                           | 55,45 ± 0,01             | 56,80 ± 0,01             |
| 9                           | 55,64 ± 0,01             | 57,04 ± 0,01             |
| 10                          | 55,58 ± 0,01             | 57,06 ± 0,01             |
| <b>Média</b>                | 55,58                    | 56,86                    |
| <b>Desvio Padrão</b>        | 0,092                    | 0,186                    |
| <b>Espessura média [mm]</b> | 0,64 ± 0,02              |                          |

A espessura média calculada para o primeiro método de encapsulamento foi, portanto, de  $0,64 \text{ mm}$ . Esta grandeza será determinante para o cálculo da resistência térmica à condução do revestimento aplicado, que é obtida por meio da Eq.(2.4). Um dos desafios do projeto foi a determinação da condutividade térmica do material da membrana, PLASTI FILM, já que o próprio fabricante do produto não apresenta o valor em sua ficha técnica. No entanto, foi utilizada a condutividade térmica do elastômero termoplástico de poliuretano (TPU), que possui propriedades termo físicas similares ao material utilizado no projeto. O valor de  $k$  do TPU foi obtido através do MATWEB, sendo sua medida de  $0,033 \text{ W/mK}$ . O resultado obtido para o cálculo de resistência térmica do material foi de  $0,019 \text{ m}^2\text{K/W}$ , que representa um valor baixo tomando-se em conta a sua condutividade térmica. Para essa metodologia, a espessura do revestimento pode ser alterada aplicando-se uma nova camada de material. Todavia, é importante notar que quanto maior a espessura da membrana, maior será sua resistência térmica à condução devido a relação direta que existe entre a propriedades.

A propagação dos erros para o cálculo de medições indiretas foi determinada de acordo com as indicações apresentadas no segundo capítulo, utilizando a Eq.(2.5). A tabela (9) a seguir sumariza os resultados alcançados através da execução da primeira metodologia de encapsulamento apresentada e seus respectivos erros.

Tabela 9: Resultados para a primeira metodologia de encapsulamento.

| <b>Encapsulamento por molde</b> |                   |
|---------------------------------|-------------------|
| $m_c$ [g]                       | $30,0 \pm 0,1$    |
| $m_t$ [g]                       | $34,6 \pm 0,1$    |
| $m_r$ [g]                       | $4,6 \pm 0,2$     |
| $r_{nr}$                        | $0,867 \pm 0,005$ |
| $e$ [mm]                        | $0,64 \pm 0,02$   |
| $R$ [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ]  | $0,019$           |
| Tempo de fabricação [h]         | 9                 |

### 2.4.1.3 DIFICULDADES E DESAFIOS

Durante a execução da metodologia proposta, utilizando moldes para injeção da cera, alguns inconvenientes ao longo do processo tiveram de ser vencidos e imperfeições foram verificadas nas cápsulas desenvolvidas. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios e as imperfeições aceitáveis, por se tratar de um primeiro protótipo, todavia é razoável estabelecer discussão acerca dos contratempos encontrados a fim de esquivar-se de futuros erros na confecção das cápsulas.

O primeiro obstáculo encontrado refere-se ao processo de solidificação da cera no interior do molde. A cera deve ser injetada até que o volume de preenchimento seja excedido e que observe-se o afloramento do material pelos canais de respiro, caso contrário será notado um vazio de preenchimento na estrutura da peça. Concluída a mudança de fase do material, observou-se a presença de macroporosidade na superfície da cápsula; naturalmente é objetivo de qualquer procedimento de fundição a eliminação de porosidades na estrutura. O defeito pode ocorrer como decorrência da contração volumétrica durante a solidificação, aprisionamento de ar dentro do molde, ou devido a alimentação inadequada de material. Em casos típicos de macroporosidade, as contrações térmicas durante o processo de solidificação da peça resultam em uma cavidade vazia, com superfície interna rugosa, causada pelo aprisionamento de ar ou em um rebaixo na superfície da peça no último ponto a ser solidificado, denominado rechupe. O material utilizado na operação, a pressão e velocidade de alimentação do molde, o posicionamento do sistema de alimentação e a temperatura do processo são os principais fatores que influenciam o surgimento deste tipo de defeito. A figura (41) que segue ilustra o problema de macroporosidade identificado na fabricação das cápsulas.



Figura 41: Defeito de macroporosidade na solidificação da cera nos moldes.

Os pesquisadores da área de ciência dos materiais e fabricação da Universidade foram consultados e avaliaram-se as recomendações propostas em manuais de solidificação a fim de apaziguar os defeitos que surgem ao longo do processo. Dentre as medidas de prevenção verificadas, destacam-se as que apresentam maior aplicabilidade ao projeto desenvolvido:

- Aquecer o molde antes da injeção, estendendo-se o tempo de solidificação da cera. O pré-aquecimento do molde promove menor diferença de temperaturas entre sua superfície e o PCM injetado, o que garante maior homogeneidade do processo de mudança de fase;
- Aplicar recalque após a injeção do PCM, processo que consiste na aplicação de pressão no canal de alimentação durante um intervalo de tempo. A pressão adicionada

empurra mais cera para o interior do molde, reduzindo os efeitos de macroporosidade durante a solidificação;

- Utilizar alimentadores para controlar a formação de cavidades na superfície da peça devido a contração térmica. Os alimentadores, analogamente aos massalotes em processos de fundição de metais, consistem em um reservatório de material com a função de fornecer líquido à frente de solidificação. Desta maneira na medida em que ocorre a contração térmica, os alimentadores fornecem cera líquida para compensar a diminuição do volume. Por conseguinte, o material líquido fornecido obsta o surgimento de cavidades ou rechupes;
- Dimensionar sistema de alimentação. O processo de solidificação da peça deve ser concluído previamente ao dos canais de alimentação, caso contrário não é possível aplicar pressão de recalque, aumentando a possibilidade de defeitos. Pontos de injeção subdimensionados implicam em uma aceleração do processo de solidificação nos canais.

A cera de palma utilizada para o encapsulamento, por se tratar de material orgânico de origem vegetal, pode sofrer alterações em suas propriedades caso seja aquecida à temperaturas elevadas, como indica (Solven Solventes, 2011). O tipo de PCM selecionado para o desenvolvimento do projeto não deve atingir temperaturas superiores a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  por este motivo. Em uma das tentativas de injeção da cera no molde o material foi demasiadamente aquecido durante seu derretimento, ocasionando mudanças em sua coloração como ilustra a Fig.(42). As propriedades alteradas da cera desta maneira não mais podem ser previstas, bem como seu comportamento ao longo dos ciclos de carregamento térmico a que se deseja submeter as cápsulas desenvolvidas.



Figura 42: Mudança da coloração do material devido ao aquecimento excessivo.

Ressaltam-se, ainda, os problemas relacionados à tentativa de acelerar o processo de solidificação do PCM. Durante as injeções do material, experimentou-se inserir o molde contendo a cera no refrigerador para reduzir o tempo de fabricação do protótipo. O resultado não foi satisfatório, dado que o elevado gradiente de temperatura durante a mudança de fase do material ocasionou rachaduras em sua estrutura.

Por fim, foram encontradas contratempos com relação ao processo de secagem das cápsulas após a imersão em emborrachamento líquido. A peça não deve secar em contato com nenhuma superfície para não comprometer seu acabamento superficial, a suspensão das cápsulas durante a secagem garante a uniformidade da aplicação do revestimento. O primeiro protótipo desenvolvido conta com imperfeições em sua membrana de revestimento e não se sabe ao certo até que ponto a estrutura terá seu formato conservado ao longo dos ciclos, tendo em vista a pequena dimensão de espessura obtida. A geometria das cápsulas torna complicado seu içamento; a técnica utilizada para pendurar a peça provou-se pouco eficiente, dado que a perfuração com agulha pode causar rachaduras na cera em seu estado sólido e os fios utilizados para suspender a cápsula por vezes falharam em sustentar o conjunto. Ainda mais, o material de revestimento não suporta temperaturas acima de  $60^{\circ}C$ , o que impossibilita sua aplicação aos diversos PCMs com ponto de fusão acima deste valor, e não são conhecidas algumas de suas propriedades, tais como a resistência mecânica e a condutividade térmica.

## 2.4.2 ENCAPSULAMENTO POR IMPRESSÃO 3D

### 2.4.2.1 RAZÃO MÁSSICA NÚCLEO-REVESTIMENTO

A segunda metodologia de fabricação apresentada no presente trabalho consiste na impressão da membrana de contenção do material de mudança de fase. A realização deste procedimento permite a medição direta da massa do revestimento da cápsula, uma vez finalizada a impressão 3D do protótipo. Novamente utilizou-se balança digital de precisão  $0,1\text{ g}$  e foram medidas a massa da membrana antes e depois de ser preenchida com a cera orgânica. A massa do PCM inserido na cápsula, por sua vez, é determinado indiretamente a partir da subtração dos valores supracitados. A tabela (10) a seguir indica os resultados obtidos.

Tabela 10: Medições de massa para a segunda metodologia.

| Massa da cápsula sem revestimento | Massa da cápsula com revestimento | Massa da membrana |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| $24,7 \pm 0,2$                    | $34,5 \pm 0,1$                    | $10,7 \pm 0,1$    |

De posse destes valores é possível determinar a razão mássica  $r_{nr}$  do conjunto fabricado. A percentagem calculada para a segunda metodologia foi de  $71,5\%$ , valor inferior ao do primeiro método, porém ainda caracteriza um protótipo com alta capacidade de armazenamento de energia. A discrepância de resultados entre as duas razões mássicas se dá pela diferença da massa da membrana. No primeiro caso, a massa da membrana é de  $4,6\text{ g}$ , enquanto no segundo método é de  $10,7\text{ g}$ , diminuindo assim a razão núcleo-revestimento.

### 2.4.2.2 ESPESSURA DO REVESTIMENTO E RESISTÊNCIA TÉRMICA

Durante a fase de projeto, estipulou-se o valor de  $2,0 \text{ mm}$  para espessura do material da membrana a ser impressa, baseado na investigação de diversas referências encontradas na literatura, tais como os estudos de SATTARI et al. MUÑOZ-SÁNCHEZ et al. ZALBA et al.. Tendo em vista que o processo de impressão em ABS, como todo processo de fabricação, conta com erros em sua execução, verifica-se a espessura das peças fabricadas com auxílio do paquímetro digital. O protótipo fabricado desta maneira consiste em um cápsula oca para preenchimento, isto posto não é necessária a medição do diâmetro para calcular a espessura, este valor pode ser obtido de maneira direta. Foram tomadas dez medidas de espessura para verificar a precisão do processo de fabricação, os resultados obtidos apresentam-se na tabela (11) subsequente, além do desvio padrão das medições e a espessura média calculada.

Tabela 11: Medidas de espessura da membrana fabricada em impressão 3D.

| Medida                 | Espessura [mm]  |
|------------------------|-----------------|
| 1                      | $2,20 \pm 0,01$ |
| 2                      | $2,15 \pm 0,01$ |
| 3                      | $2,03 \pm 0,01$ |
| 4                      | $2,24 \pm 0,01$ |
| 5                      | $2,26 \pm 0,01$ |
| 6                      | $2,06 \pm 0,01$ |
| 7                      | $2,26 \pm 0,01$ |
| 8                      | $2,17 \pm 0,01$ |
| 9                      | $2,24 \pm 0,01$ |
| 10                     | $2,15 \pm 0,01$ |
| <b>Espessura Média</b> | $2,18 \pm 0,02$ |
| <b>Desvio Padrão</b>   | 0,081           |

A partir das medições realizadas é feito o cálculo da resistência térmica da membrana confeccionada em ABS, utilizando a Eq.(2.4). Considerou-se a condutividade térmica do ABS igual a  $0,176 \text{ W/mK}$ , como indicado pelo MATWEB. Assim sendo, o resultado obtido para resistência térmica  $R$  da membrana da cápsula foi de  $0,012 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ . A valor alcançado com esta metodologia indica baixa resistência térmica do revestimento de ABS, em comparação com materiais isolantes de mesma espessura, tais como o poliestireno e a lã de rocha, que apresentam resistência térmica de  $0,06 \text{ m}^2 \text{ K/W}$  e  $0,05 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , respectivamente. A análise revela que a membrana de ABS que encapsula o PCM não se comporta como isolante térmico, visto que a pequena dimensão da espessura compensa a baixa condutividade térmica do material.

Os resultados das medições e cálculos realizados para esta segunda metodologia, onde o revestimento da cápsula é impresso, são sumarizados na Tab.(12) subsequente.

Tabela 12: Resultados para a segunda metodologia de encapsulamento.

| <b>Encapsulamento por impressão 3D</b> |                   |
|--|-------------------|
| $m_c$ [g]                              | $24,7 \pm 0,2$    |
| $m_t$ [g]                              | $34,5 \pm 0,1$    |
| $m_r$ [g]                              | $10,7 \pm 0,1$    |
| $r_{nr}$                               | $0,715 \pm 0,008$ |
| $e$ [mm]                               | $2,18 \pm 0,02$   |
| $R$ [ $m^2K/W$ ]                       | $0,012$           |
| Tempo de fabricação [h]                | 4                 |

### 2.4.2.3 DIFICULDADES E DESAFIOS

Haja vista que o processo de impressão 3D das metades de uma cápsula necessita atenção no que se refere à vedação da conexão entre as mesmas, os maiores obstáculos encontrados durante a execução da metodologia proposta encontram-se na montagem das duas peças. A utilização da cola para a fixação das partes pode comprometer a vida útil das cápsulas ao longo dos ciclos a que devem ser submetidas, ademais a confiabilidade da vedação é de difícil estimativa. Ainda que o ABS seja solúvel em acetona, a aplicação deste composto sobre peças impressas são usualmente realizadas com o intuito de aperfeiçoar o acabamento superficial de peças impressas. Vale ainda salientar que o procedimento de montagem e vedação das partes é feito de maneira manual, o que pode obstaculizar uma eventual produção de cápsulas em maior escala a partir da metodologia proposta.

A seguir, a Figura (43) ilustra os produtos finais obtidos a partir das duas metodologias propostas.



Figura 43: Produtos finais obtidos a partir das duas metodologias propostas.

# 3 AUMENTO DE PRODUÇÃO

O estudo desempenhado no projeto direcionou-se ao desenvolvimento de metodologias de fabricação para macrocápsulas contendo um bio-PCM de alta disponibilidade em território brasileiro, a cera de palma. Foram desenvolvidas duas metodologias distintas: encapsulamento por molde e encapsulamento por impressão 3D. Investigaram-se também os principais parâmetros geométricos, características mecânicas e térmicas das cápsulas produzidas por meio das metodologias propostas, pretendendo-se definir qual destas será adotada para a continuidade do projeto.

O aumento de produção consiste no aprimoramento de uma das metodologias propostas e na fabricação de uma série de cápsulas para posterior estudo de suas propriedades. A metodologia de encapsulamento por molde produziu cápsulas flexíveis, revestidas com material elastômero (TPU) de espessura  $0,64\text{ mm}$ , contendo uma razão mássica  $r_{nr}$  de  $86,7\%$ . O valor determinado para a resistência térmica do material de revestimento é de  $0,019\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , resultado que representa um valor baixo tomando-se em conta a sua reduzida condutividade térmica. Já a segunda metodologia, encapsulamento por impressão 3D, produziu cápsulas rígidas com membrana de ABS com  $2\text{ mm}$  de espessura. A razão núcleo-revestimento  $r_{nr}$  dessas cápsulas é de  $71,5\%$  e sua resistência térmica a condução é de  $0,012\text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , valor inferior ao da metodologia por molde.

A metodologia escolhida para o aumento da produção foi o encapsulamento por molde, principalmente, pelas seguintes razões:

- Maior elasticidade devida a flexibilidade do material de revestimento;
- Maior razão mássica núcleo-revestimento, o que garante uma elevada quantidade de energia armazenada;
- Menor risco de vazamento do material de mudança de fase, pois o revestimento da cápsula não apresenta junções ou fixações;
- Disponibilidade e custo dos materiais utilizados no processo de fabricação.

Algumas mudanças foram implementadas na metodologia de fabricação do encapsulamento por molde a fim de melhorar o acabamento das cápsulas produzidas. Na fase de injeção da cera líquida no molde, deixa-se o conjunto resfriando de ponta cabeça, evitando

o aprisionamento de ar dentro do conjunto, eliminando assim as macroporosidades que frequentemente surgiam na fabricação das cápsulas (descritas na subseção DESAFIOS do capítulo RESULTADOS E DISCUSSÃO). Outra medida adotada, antes da fase de injeção da cera líquida, foi o posicionamento transversal de um fio-dental ao longo do molde por completo. Tal medida facilita a realização dos banhos das cápsulas por imersão da cera no material de revestimento, podendo ser penduradas para secagem, como pode ser observado na Fig.(44), processo que garante o acabamento final da cápsula. A produção de cápsulas a partir da metodologia de encapsulamento por molde é feita de maneira essencialmente manual, ainda que de posse do molde usinado em fresadora CNC. Para uma eventual produção em escala da metodologia, uma solução seria a confecção de diversos moldes de injeção de cera, permitindo assim a fabricação de vários protótipos simultaneamente.



Figura 44: Aumento de produção das cápsulas.

Foram fabricadas para o presente trabalho 30 cápsulas que foram sujeitadas a uma série de experimentos e medições. Os procedimentos e metodologia dos experimentos discriminados serão abordados no capítulo seguinte. A seguir, são apresentados os ensaios que forma realizados, bem como a quantidade de cápsulas atribuída a cada um deles:

- 10 cápsulas para medição da espessura;
- 05 cápsulas para ensaio de resistência mecânica (cera sólida);
- 03 cápsulas para ensaio de resistência mecânica (cera líquida);
- 01 cápsula para ensaio de ciclos de carregamento/descarregamento;
- 01 cápsula para ensaio de limite máximo de temperatura;
- 10 cápsulas para experimentos com calorímetro.

## 4 EXPERIMENTOS

Uma vez que o processo de fabricação foi aprimorado e a produção ampliada, partindo da primeira metodologia proposta, elaborou-se uma sequência de experimentos a fim de determinar as principais características dos protótipos desenvolvidos. Deseja-se explorar com mais acerto as propriedades mecânicas e térmicas das cápsulas de material de mudança de fase produzidas, para garantir sua integridade e efetividade ao longo dos ciclos térmicos a que devem ser submetidas.

### 4.1 ESPESSURA DE REVESTIMENTO

Tratando-se da espessura da membrana de revestimento das cápsulas, utilizou-se paquímetro digital com erro de  $\pm 0,01mm$  para realizar as medições. Adotando-se a metodologia de encapsulamento por molde, faz-se necessário realizar um corte transversal nas cápsulas recém fabricadas para realização das medidas. Além disso, com as cápsulas cortadas é possível avaliar se houve ocorrência de porosidade na cera ao longo do processo de solidificação.

Conhecendo a dimensão da espessura, foi possível efetuar cálculo do valor teórico da resistência térmica de cada tipo de revestimento. A resistência térmica  $R$  [ $m^2K/W$ ] de um material corresponde a dificuldade de transferência de calor e é determinada pelo quociente entre a espessura do material  $e$  [ $mm$ ] e sua condutividade térmica  $k$  [ $W/mK$ ], como indica a Eq.(2.3).

A propagação de erros e posterior análise dos dados experimentais conta com incertezas e perturbações nas medidas tomadas. Esses parâmetros foram calculados de acordo com a expressão geral de propagação dos erros, Eq.(2.5), do capítulo 2 da Metodologia.

### 4.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA MECÂNICA

Foram conduzidos ensaios compressivos sobre os protótipos desenvolvidos, com o propósito de explorar seu comportamento mecânico. Considerando-se a ausência de norma técnica reguladora para testes desta natureza no material utilizado no projeto, a

metodologia empregada para a realização destes ensaios foi embasada na norma ASTM E-9, que especifica metodologias padrão para condução de ensaios compressivos sobre material metálico a temperatura ambiente.

Muitos exemplos de sistemas de armazenamento térmico observados na literatura, utilizando materiais de mudança de fase encapsulados, apresentam reator térmico preenchido com cápsulas de maneira a formar um leito fixo, onde o empacotamento das mesmas constitui um meio poroso. É interessante, portanto, estabelecer a carga compressiva máxima suportada por uma cápsula, tendo em vista que as cápsulas do fundo do reator devem suportar o peso da coluna de cápsulas acima das mesmas. Ainda mais, a metodologia de fabricação adotada, utilizando molde para injeção do PCM no estado líquido e revestindo-o posteriormente com banhos de emborrachamento a frio, contou com cinco demãos de revestimento determinadas empiricamente, necessitando desta maneira um estudo da resistência mecânica dos protótipos para esta dada espessura de revestimento. O ciclo de trabalho das cápsulas passa pelos estados sólido e líquido da cera em seu interior, o que interfere na sensibilidade das cápsulas à compressão.

Isto posto, foram elaboradas sequências de testes utilizando sistema MTS *Landmark*, Fig.(45), para ensaios de tração e compressão em materiais, com células de carga de  $100kN$ . Utilizou-se o *software Basic TestWare* para aquisição dos dados, a uma frequência de  $50Hz$ . O atuador do equipamento comprime o material enquanto são registrados os valores de força aplicada e seu respectivo deslocamento, para posterior levantamento da curva característica.

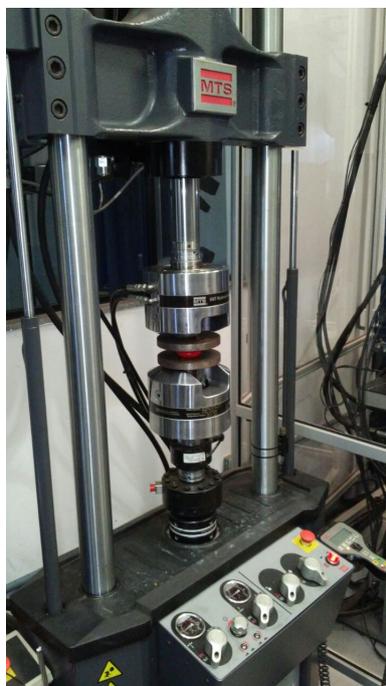


Figura 45: MTS *Landmark* utilizada para os ensaios de compressão.

Desta maneira, foram realizados ensaios compressivos de duas naturezas distintas sobre os protótipos:

- Ensaio destrutivo em cápsulas sólidas: cinco cápsulas com a cera de preenchimento em fase sólida foram avaliadas até que seu revestimento rompesse devido à carga compressiva;
- Ensaio destrutivo em cápsulas líquidas: três cápsulas com a cera de preenchimento em fase líquida foram avaliadas até que seu revestimento rompesse devido à carga compressiva;

O primeiro ensaio realizado, com a cápsula em estado sólido, foi executado utilizando célula de carga de  $5kN$ , o que não foi suficiente para ocasionar o rompimento da membrana de revestimento. Por conseguinte, os resultados obtidos foram descartados e optou-se pela utilização de uma célula de carga de  $100kN$ .

Primeiramente realizou-se uma sequência de seis ensaios de compressão, sendo três deles com cápsulas sólidas e os outros três em estado líquido. Os ensaios foram conduzidos utilizando os seguintes procedimentos:

- (i) Selecionar uma peça base a ser fixada no mordente da máquina adequada ao tamanho do corpo de prova a ser comprimido;
- (ii) Ajustar pressão das garras do equipamento para que não haja escorregamento entre a base e o mordente;
- (iii) Posicionar a peça no centro da base;
- (iv) Definir o avanço do atuador, estipulado em  $3mm/min$ ;
- (v) Definir uma carga máxima de aplicação, estipulado como  $65kN$ , tendo em vista a capacidade da célula de carga;
- (vi) Determinar a posição zero do atuador;
- (vii) Iniciar o processo de compressão e a aquisição de dados, aguardando até a falha da peça ou o final do curso do equipamento.

Os dados obtidos com os testes descritos acima permitem determinar curvas de Força *versus* Deslocamento para cada cápsula ensaiada. É possível, com base na análise dos gráficos, verificar a carga de ruptura da membrana de revestimento, bem como o deslocamento máximo produzido no corpo de prova. Tratando-se dos ensaios realizados em cápsulas contendo o Bio-PCM em fase sólida, observam-se nas curvas características, também, o tipo de fratura que ocorre na cera de palma ao longo do processo de compressão.

Seguidamente, uma vez conhecida a carga de ruptura das cápsulas sólidas, estipulou-se um valor médio de carga a ser aplicada repetidas vezes sobre uma mesma cápsula, com intuito examinar sua integridade estrutural e geométrica ao longo do processo e verificar variações no deslocamento produzido. Foi conduzido, à vista disso, um novo ensaio sobre cápsula sólida seguindo os procedimentos subsequentes:

- (i) Selecionar a peça base adequada ao tamanho do corpo de prova a ser comprimido;
- (ii) Ajustar pressão das garras do equipamento para que não haja escorregamento na base;
- (iii) Posicionar a peça no centro da base;
- (iv) Definir o avanço do atuador, estipulado em  $3\text{mm}/\text{min}$ ;
- (v) Definir uma carga máxima de aplicação, determinada como  $17,5\text{kN}$ , baseada na carga de ruptura encontrada nos ensaios anteriores;
- (vi) Determinar a posição zero do atuador;
- (vii) Iniciar o processo de compressão e a aquisição de dados, aguardando até a falha da peça ou o final do curso do equipamento;
- (viii) Caso a força máxima a ser aplicada pelo atuador seja atingida antes da ruptura da membrana, deve-se zerar a máquina, registrando os dados obtidos, e repetir o processo de compressão até que a cápsula falhe ou novamente a força máxima seja atingida;

O intuito deste ensaio é avaliar a variação do deslocamento causado, por uma mesma força, na cápsula submetida a repetidos ensaios de compressão, posto que a cera no interior da cápsula se fragmenta muito antes da ruptura do elastômero de revestimento. Conseqüentemente, são traçadas diversas curvas de Força *versus* Deslocamento para uma mesma cápsula, onde se espera observar maior diferença entre os valores dos primeiros gráficos e que esta variação diminua ao longo dos ensaios. Não foi possível a realização deste mesmo teste sobre cápsulas contendo o PCM em estado líquido, haja vista que se faz necessário um controle de temperatura para manter a cera derretida ao longo dos processos de compressão.

### 4.3 LIMITE MÁXIMO DE TEMPERATURA

As cápsulas desenvolvidas no presente trabalho destinam-se a aplicações de armazenamento térmico de baixa temperatura. Assim sendo, deseja-se conhecer o limite máximo de temperatura ao qual as mesmas podem ser submetidas sem que sejam danificadas. Foi elaborado, com este propósito, um ensaio destrutivo referente a resistência térmica dos protótipos, ao qual uma única cápsula foi designada.

Auxiliados por um termopar tipo K e um leitor de temperaturas modelo OMEGA 2176A com precisão de  $1^\circ\text{C}$ , realizou-se o ensaio de resistência térmica em solução aquosa de acordo com os seguintes procedimentos:

- (i) Inserir a cápsula em meio aquoso e adicionar calor ao sistema para elevar sua temperatura;
- (ii) Avaliar, por inspeção visual e tátil, a integridade física da cápsula a cada cinco graus Celsius adicionados ao sistema;
- (iii) Repetir o procedimento acima até que danos irreparáveis sejam observados no corpo de prova.

O fabricante do PLASTIFILM, elastômero utilizado para a membrana de revestimento dos protótipos, apresenta recomendações quanto a exposição do produto a temperaturas elevadas. Assim sendo, buscou-se conhecer com maior precisão o limite de resistência térmica do material por meio do ensaio, que possibilitou definir a máxima temperatura a qual as cápsulas fabricadas podem ser submetidas.

## 4.4 ENSAIO DE CICLOS DE CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO

Em um sistema LHTES, as cápsulas contendo material de mudança de fase em seu interior passam por diversos ciclos de carregamento e descarregamento durante seu funcionamento: o PCM absorve energia térmica ao derreter e libera esta energia ao solidificar-se. Esse repetitivo processo pode provocar avarias nas cápsulas, alterando suas características geométricas e sua integridade estrutural. O objetivo do ensaio de ciclos é, portanto, verificar como se comporta a manutenção das principais cotas geométricas do protótipo após cada ciclo.

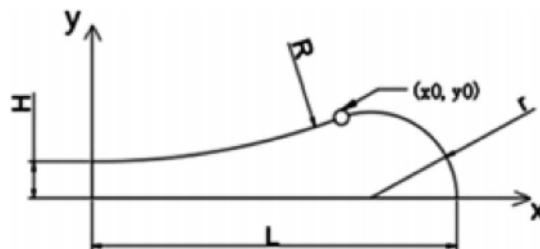


Figura 46: Parametrização da superfície de uma hemácia. Fonte:(CHENG; ZHAI, 2017)

Para a fabricação das cápsulas, o molde de injeção da cera líquida foi projetado para fornecer os valores  $27,37mm$ ,  $8,98, 3,59mm$  e  $28mm$ , para  $R$ ,  $r$ ,  $H$  e  $L$  respectivamente, como propõe o modelo geométrico de (CHENG; ZHAI, 2017) da Fig.(46) acima. A razão  $L:H:r$  aproxima-se de  $7:1:2$ , que está de acordo com os parâmetros geométricos de um glóbulo vermelho real do corpo humano.

As dimensões citadas acima representam as características geométricas da cera antes da aplicação do revestimento emborrachado. A metodologia de encapsulamento por

injeção de cera no molde propõe uma imersão das cápsulas em emborrachamento líquido para confecção da membrana. Após a aplicação de cinco demãos do produto foram obtidas membranas de revestimentos de  $0,84mm$  de espessura nos protótipos. À vista disso, foram tomadas as medidas das principais cotas geométricas das cápsulas,  $D$ ,  $H$  e  $P$  para posterior avaliação das mesmas uma vez realizados os ciclos térmicos. As medidas geométricas das cápsulas com revestimento estão dispostas na Fig.(47) abaixo.

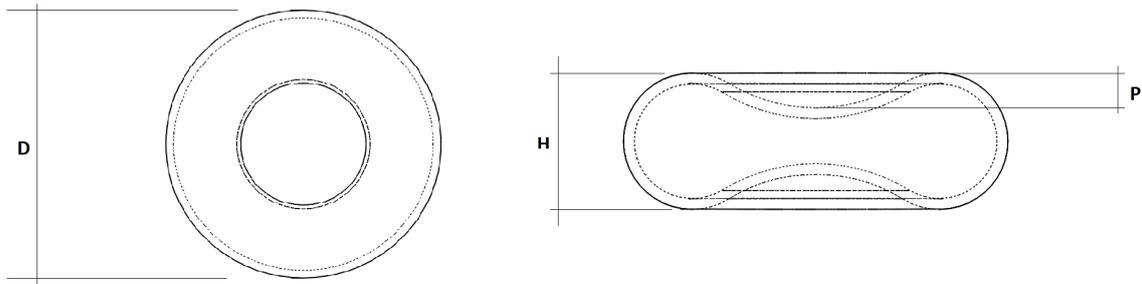


Figura 47: Principais cotas geométricas das cápsulas.

Diante disso, o teste de ciclos foi conduzido seguindo os procedimentos subsequentes:

- (i) Medir as principais cotas geométricas da cápsula com revestimento antes de submetê-la ao ciclo de carregamento;
- (ii) Aquecer a cápsula em água fervente, com auxílio de um termopar, para verificação da temperatura até a mudança de fase do PCM;
- (iii) Imergir a cápsula em meio aquoso a temperatura ambiente para solidificação da mesma;
- (iv) Medir os principais parâmetros geométricos da cápsula novamente para comparação com os valores anteriores;
- (v) Repetir o procedimento cinco vezes para estabelecer comparativo entre os resultados alcançados.

O ensaio foi realizado com o auxílio de um termopar tipo K e um leitor digital de temperaturas modelo OMEGA 2176A, com precisão de  $1^{\circ}C$ . Foram realizados cinco ciclos de carregamento e descarregamento sobre o corpo de prova. Como resultado, foram traçados cinco tabelas comparativas que serviram para análise das principais cotas geométricas da cápsula fabricada pela metodologia proposta após cada ciclo.

## 4.5 CALORÍMETRO

Sistemas de armazenamento térmico, utilizando mecanismo de troca de calor latente, têm sua aplicabilidade definida a depender da quantidade total de calor que pode ser armazenada, bem como o tempo necessário para armazenar/dispor desta energia térmica. Uma vez que foi definida a metodologia de fabricação e os protótipos foram desenvolvidos, além da realização de testes para caracterização mecânica, térmica e geométrica das cápsulas, deseja-se avaliar a quantidade de calor que pode ser armazenada pelo sistema elaborado bem como a taxa de carregamento térmico das cápsulas. Para tal, desenvolveu-se um calorímetro com a pretensão de investigar experimentalmente a performance térmica das cápsulas de cera de palma. Tendo em conta que as cápsulas produzidas possuem densidade menor do que a da água, as mesmas flutuam se não forem fixadas ao calorímetro. A Figura (48) ilustra o esquema de fixação adotado, utilizando palitos de madeira.



Figura 48: Esquema de fixação das cápsulas com palitos de madeira.

### 4.5.1 TAXA DE CARREGAMENTO

A realização do experimento para determinação da taxa de carregamento depende da aplicação de um escoamento sobre o calorímetro, onde o fluido de trabalho determinado foi a água, que deverá trocar calor com as cápsulas. O experimento consiste da coleta de dados de temperatura da água na saída do calorímetro em determinado intervalo de tempo. Devido à uma questão de facilidade de montagem, optou-se por utilizar as cápsulas em estado líquido, ou seja, termicamente carregadas, para que seja traçada uma curva de aquecimento da água (resfriamento das cápsulas). A Figura (49) subsequente ilustra a montagem do experimento utilizando sistema de armazenamento térmico por troca de calor latente.



Figura 49: Esquema de montagem do experimento.

A função do reservatório esquematizado é manter constante a pressão de coluna de água no canal de alimentação do sistema. Para tanto, deve-se preencher seu conteúdo até que esteja transbordando e, em seguida, regula-se a vazão de água que segue para o calorímetro contendo as cápsulas. Deste modo são medidas as temperaturas de entrada e de saída do calorímetro para determinar o calor total trocado entre a água e as cápsulas.

#### 4.5.1.1 MATERIAL UTILIZADO

A montagem do aparato experimental foi feita disposto dos seguintes materiais e instrumentos:

- 10 cápsulas contendo cera de palma;
- 1 reservatório de água com capacidade de 7L;
- 1 calorímetro para contenção das cápsulas, com capacidade de 3L;
- 1 mangueira com diâmetro de 1/2" (utilizou-se mangueira convencional de jardim);
- 2 torneiras para controle de fluxo entre os reservatórios;
- 1 termopar tipo K;
- 1 leitor de temperaturas modelo OMEGA 2176A;
- 1 béquer com capacidade de 1000ml;
- 1 cronômetro digital;

#### 4.5.1.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A montagem do experimento é feita de maneira que o calorímetro seja considerado um sistema isolado, não acarretando em perdas para o ambiente, e de forma que toda troca de calor entre a água e as cápsulas seja dada por mecanismo de convecção. Assim sendo, utiliza-se a Eq.(4.1) a seguir para descrever o calor total trocado no sistema desenvolvido:

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_o - T_i) = hA(T_m - \bar{T}) \quad (4.1)$$

Onde  $\dot{Q}$  representa o calor total trocado,  $\dot{m}$  é a vazão de entrada no sistema,  $T_i$  representa a temperatura de entrada no calorímetro,  $T_o$  corresponde a temperatura de saída do calorímetro,  $h$  é o coeficiente de troca de calor por convecção,  $A$  é a área superficial total de troca de calor,  $T_m$  indica a temperatura de solidificação da cera de palma e  $\bar{T}$  representa a temperatura média entre a entrada e saída do calorímetro. Temos pela Eq.(4.2) a seguinte relação para  $\bar{T}$ :

$$\bar{T} = \frac{(T_o + T_i)}{2} \quad (4.2)$$

Inicialmente é feita uma estimativa da variação total entre as temperaturas de entrada e saída do sistema, de posse dos valores de  $T_m$  e  $T_i$ . Estimou-se a princípio que, para o presente projeto, seja possível obter uma diferença de temperaturas de cerca de  $15^\circ C$ . Assim sendo, é possível determinar o valor de  $\bar{T}$  como indicado acima. Seguidamente estima-se o valor do número de Nusselt para o escoamento em questão, calculado pela Eq.(4.3) subsequente:

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (4.3)$$

O valor de  $k$  compreende a condutividade térmica do fluido de trabalho, enquanto  $D$  representa o comprimento característico de troca por convecção do corpo com o qual o fluido troca calor. Uma vez que o valor de  $D$  para a geometria de hemácias é desconhecido, adotou-se o diâmetro característico de uma esfera, com mesma área superficial que as cápsulas dimensionadas para o presente projeto. O modelo tridimensional das cápsulas construído com auxílio do *software SolidWorks* fornece o valor aproximado de sua área superficial como sendo de  $14544,78mm^2$ . Temos, portanto, o cálculo do diâmetro característico pela Equação (4.4) a seguir:

$$R = \sqrt{\frac{A}{4\pi}} \Rightarrow D = 2R \quad (4.4)$$

O valor de  $R$  encontrado na expressão acima é de  $0,033 m$ , representando o raio característico da esfera com mesma área superficial das cápsulas projetadas, tratando-se o escoamento do experimento como um escoamento em torno de esfera. Desta maneira,

determina-se o diâmetro característico desta esfera e, em seguida, é feita a estimativa da ordem de grandeza de  $Nu$  para o sistema projetado.

Observando-se valores típicos de situações similares ao experimento elaborado, estipulou-se o valor de 20 para o adimensional de Nusselt. O valor estipulado concorda com aqueles encontrados em exemplos de escoamento em torno de esfera encontrados na literatura, com parâmetros aproximados aos do experimento.

Partindo-se da estimativa adotada para o valor do número de Nusselt e baseando-se nas considerações feitas para o projeto, determina-se o valor aproximado do coeficiente de troca de calor por convecção, que é de  $183,63 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

De posse do valor de  $h$ , é possível estimar o valor da vazão de entrada de água no sistema proposto para a realização do experimento, como expressa a Equação (4.5) subsequente:

$$\dot{m}c_p(T_o - T_i) = hA(T_m - \bar{T}) \rightarrow \dot{m} = \frac{hA(T_m - \bar{T})}{c_p(T_o - T_i)} \rightarrow \dot{m} = 0,35 \text{ L/min} \quad (4.5)$$

A rotina realizada durante a execução do experimento permite calcular o valor real da diferença de temperatura entre o fluido na entrada e na saída do calorímetro e, por conseguinte, a quantidade de calor trocada entre a água e as cápsulas. O valor de  $\Delta T$  deve então ser comparado com aquele estimado previamente à realização do experimento e os valores de  $h$  e  $Nu$  recalculados, iniciando desta maneira um processo iterativo para a determinação do fluxo de calor por convecção das cápsulas. A seguir, os procedimentos utilizados para a realização do experimento.

#### 4.5.1.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Utilizou-se o termopar tipo K, com faixa de temperaturas de aplicação de  $-270^\circ\text{C}$  até  $1372^\circ\text{C}$ , e um leitor de temperaturas modelo OMEGA 2176A para as medições das temperaturas de entrada e saída do sistema. Para tal, faz-se necessário realizar a calibração do instrumento de medição empregado. A calibração foi feita com o auxílio de um termopar padrão tipo R, com certificado e faixa de temperaturas de  $-50^\circ\text{C}$  a  $1768^\circ\text{C}$ , além de um banho térmico a base de etilenoglicol modelo Julabo F25, Fig.(50), com abrangência de temperaturas entre  $-20^\circ\text{C}$  e  $100^\circ\text{C}$ .



Figura 50: Ilustração do banho térmico modelo Julabo F25.

A curva de calibração foi traçada a partir das medidas de temperatura dentro do banho térmico, medidas pelo termopar tipo K e pelo termopar tipo R padrão, variando-se a temperatura do banho térmico de  $20^{\circ}C$  a  $60^{\circ}C$ , com intervalos de  $10^{\circ}C$ . A banda de temperaturas utilizada na calibração compreende a faixa de temperaturas de aplicação do PCM empregado para o desenvolvimento do sistema. As cinco temperaturas medidas pelos termopares são apresentadas na Tabela (13) a seguir, além da curva de calibração do instrumento, Fig.(51).

Tabela 13: Dados obtidos no banho térmico para calibração do termopar tipo K.

| Calibração |                     |               |
|------------|---------------------|---------------|
| Pontos     | Termopar R (padrão) | Termopar K    |
| 1          | $20^{\circ}C$       | $19^{\circ}C$ |
| 2          | $30^{\circ}C$       | $30^{\circ}C$ |
| 3          | $41^{\circ}C$       | $40^{\circ}C$ |
| 4          | $51^{\circ}C$       | $50^{\circ}C$ |
| 5          | $61^{\circ}C$       | $60^{\circ}C$ |

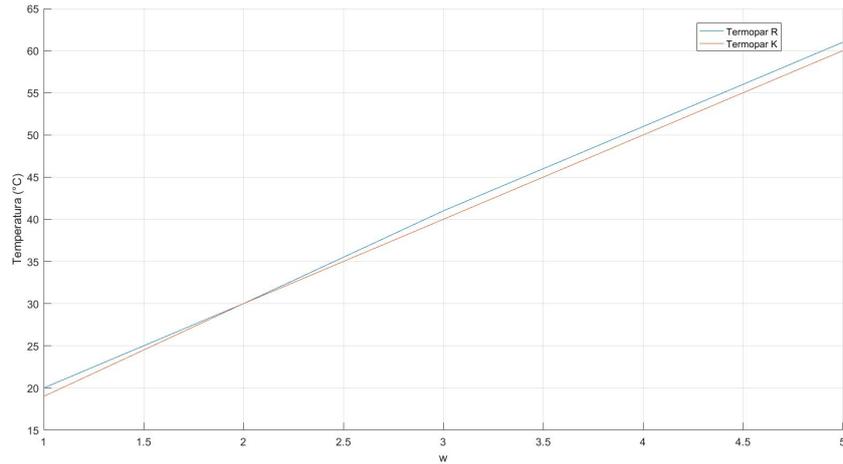


Figura 51: Curva de calibração do termopar utilizado para medição nos experimentos.

Os procedimentos experimentais são os seguintes:

- (i) Preencher o conteúdo do reservatório com água até que seu volume total seja excedido e a água comece a transbordar;
- (ii) Liberar o fluxo de água do reservatório para o calorímetro e medir a vazão de fluido entrando no sistema com o auxílio de um béquer e um cronômetro;
- (iii) Medir a temperatura da água entrando no calorímetro;
- (iv) Com a vazão definida, posicionar as cápsulas já carregadas (com seu conteúdo em estado líquido) dentro do calorímetro;
- (v) Iniciar a contagem do tempo do experimento, utilizando o cronômetro;
- (vi) Realizar medidas de temperatura na saída do calorímetro a cada minuto, até que seja observada a estabilização dos valores medidos.

De posse dos valores de temperatura na saída do sistema, conhecendo também a temperatura inicial da água no início do processo, é possível traçar a curva de aquecimento do fluido no intervalo de tempo de realização do experimento. Seguidamente, compara-se o valor da diferença de temperaturas na entrada e na saída medidos ao longo do ensaio e aquele estimado previamente à sua execução. Utilizando o mesmo equacionamento apresentado no início deste capítulo, corrige-se o valor de  $\Delta T$  e, por conseguinte, determina-se novos valores para  $h$  e  $Nu$ . Doravante, inicia-se um processo iterativo atribuindo-se um novo valor para a vazão de fluido na entrada do sistema e recalcula-se o valor de  $\Delta T$  teórico, para a nova vazão estimada. Desta maneira, a medida de  $\Delta T$  ao longo do experimento permite a correção dos valores de  $h$  e  $Nu$  de maneira iterativa. Quando a convergência entre os valores encontrados for verificada, obtém-se o valor da taxa de carregamento  $\dot{Q}$  das cápsulas com maior precisão.

Vale ainda ressaltar que a metodologia adotada para realização do experimento conta com diversas estimativas e aproximações que acarretam em imprecisões nos resultados finais. Portanto recomenda-se a realização de processo iterativo previamente à execução do experimento, para ajustar dos valores estimados como parâmetros de entrada. O mesmo não foi realizado para os fins do presente projeto, tendo em vista a dificuldade de regular os parâmetros de entrada do experimento, como vazão de fluido e temperatura inicial. Contudo, o desenvolvimento do processo iterativo proposto encontra-se em anexo.

## 4.5.2 CALOR ARMAZENADO

A determinação da quantidade de calor que uma cápsula é capaz de armazenar é feita utilizando-se o calorímetro contendo água em repouso. Novamente utilizam-se as cápsulas já em estado líquido, para que seja observado o resfriamento das mesmas e o aquecimento da água. A realização do experimento é feita a partir de medidas de temperatura da água no interior do calorímetro em determinado intervalo de tempo.

### 4.5.2.1 MATERIAL UTILIZADO

- 10 cápsulas contendo cera de palma;
- 1 calorímetro para contenção das cápsulas e da água com capacidade de  $3L$ ;
- 1 termopar tipo K;
- 1 leitor de temperaturas modelo OMEGA 2176A;
- 1 cronômetro digital;

### 4.5.2.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

O calorímetro empregado na execução do ensaio é considerado um sistema isolado, de maneira que todo calor seja trocado entre a água e as cápsulas sem perdas para o ambiente por mecanismo de condução, uma vez que o volume de água encontra-se em repouso. Desta maneira, a Equação (4.6) a seguir representa a quantidade de calor total trocado no sistema.

$$Q = mc_p\Delta T \quad (4.6)$$

Onde  $Q$  indica o calor total trocado no sistema,  $m$  a massa de fluido no interior do calorímetro e  $\Delta T$  a diferença de temperaturas no início e no final do processo.

Conhecendo a massa e o calor específico da quantidade de água que preenche o calorímetro, bem como a distribuição de temperaturas ao longo de um intervalo de

tempo, determina-se o total calor trocado no sistema e, por conseguinte, o valor referente à quantidade de calor absorvido por uma única cápsula.

#### 4.5.2.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

A execução do experimento é feita a partir dos seguintes procedimentos:

- (i) Preencher o conteúdo do calorímetro com  $2L$  de água, registrando sua temperatura inicial;
- (ii) Posicionar as cápsulas termicamente carregadas no interior do calorímetro;
- (iii) Iniciar a contagem do tempo do experimento, utilizando o cronômetro;
- (iv) Realizar medidas de temperatura da água do calorímetro a cada minuto, até que seja observada a estabilização dos valores medidos.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 ESPESSURA DE REVESTIMENTO

A primeira parte do projeto foi centrada no desenvolvimento de metodologias de fabricação de macrocápsulas contendo material Bio-PCM. A partir disso, foram obtidos resultados preliminares para os protótipos fabricados, entre eles a medição indireta da espessura de revestimento para posterior cálculo de resistência térmica do material. Os valores encontrados para a espessura média e resistência térmica do material de revestimento foram de  $0,64\text{ mm}$  e  $0,019\text{ m}^2\text{K/W}$ , respectivamente.

Para esta etapa do projeto, optou-se por realizar a medição direta da espessura de revestimento por meio de um corte transversal na cápsula, Fig.(52), permitindo assim uma avaliação real da cota. Além disso, o corte possibilita a análise de porosidade da cera sólida, problema recorrente encontrado na fabricação da metodologia de encapsulamento por injeção no molde. A tabela (14) abaixo apresenta os valores de espessuras medidos pelo paquímetro digital com erro de  $\pm 0,01\text{ mm}$ , assim como a média, desvio padrão e uma espessura média que será considerada para o cálculo da resistência térmica real do material de revestimento.



Figura 52: Cápsula cortada para medição de espessura.

Tabela 14: Valores medidos para a espessura da membrana de revestimento.

| <b>Espessura</b>            |                   |
|-----------------------------|-------------------|
| <b>Medida</b>               | <b>Valor [mm]</b> |
| 1                           | $0,82 \pm 0,01$   |
| 2                           | $0,83 \pm 0,01$   |
| 3                           | $0,87 \pm 0,01$   |
| 4                           | $0,87 \pm 0,01$   |
| 5                           | $0,83 \pm 0,01$   |
| 6                           | $0,86 \pm 0,01$   |
| 7                           | $0,87 \pm 0,01$   |
| 8                           | $0,81 \pm 0,01$   |
| 9                           | $0,85 \pm 0,01$   |
| 10                          | $0,83 \pm 0,01$   |
| <b>Espessura Média [mm]</b> | 0,84              |
| <b>Desvio Padrão</b>        | 0,022             |

A partir dos dados coletados, é possível utilizar a Eq.(2.4) para o cálculo da resistência térmica do revestimento. O resultado obtido para  $R$  foi de  $0,025 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ , valor superior ao encontrado nos Resultados Preliminares. Como já comentado anteriormente, o valor encontrado representa um valor baixo tomando-se em conta a sua condutividade térmica. Não foram observadas porosidades nas cápsulas cortadas para medição de espessura, o que garante a razão mássica núcleo-revestimento calculada também no Capítulo 3 de Resultados Preliminares.

## 5.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA

### 5.2.1 CÁPSULAS SÓLIDAS

Inicialmente foram ensaiadas cápsulas com seu conteúdo de cera de palma em estado sólido, onde a primeira sequência de ensaios foi realizada através da aplicação de carga compressiva até que a membrana de revestimento se rompesse. A Figura (53) a seguir ilustra a cápsula com a camada de elastômetro rompido, imediatamente após o término do ensaio.



Figura 53: Cápsula com membrana rompida após ensaio compressivo.

Os dados de força aplicada e deslocamento do atuador, obtidos da MTS *Landmark*, foram utilizados para o levantamento de curvas de compressão, por meio do *software* MATLAB. A Figura (54) a seguir apresenta as curvas de  $F$  versus  $d$ , para os quatro ensaios realizados nesta primeira etapa do teste. Os gráficos dos ensaios individuais compressivos com a cera em estado sólido estão dispostos em ANEXO II.

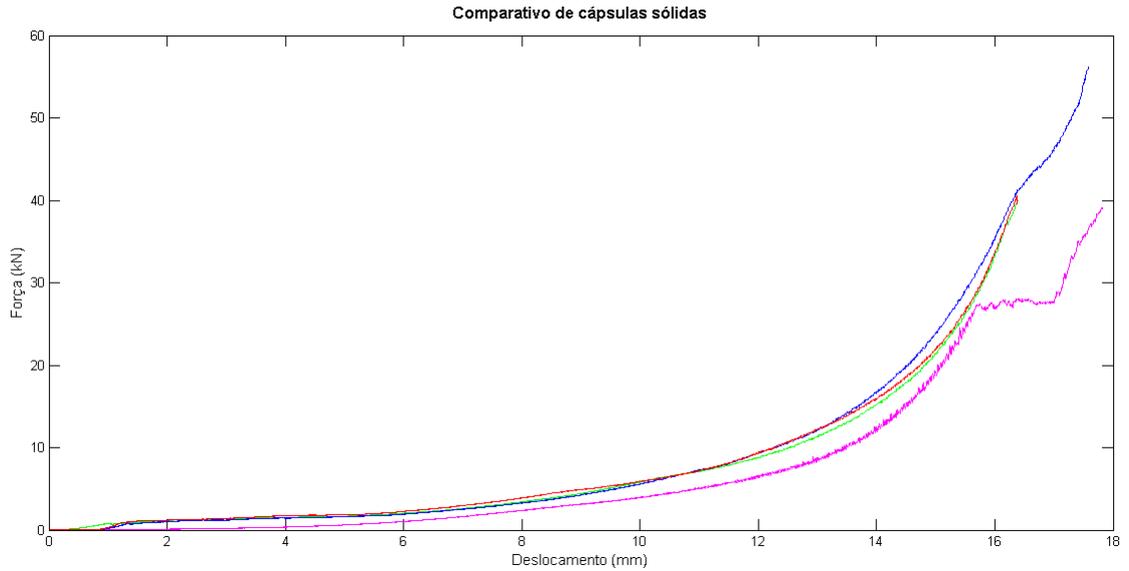


Figura 54: Gráfico comparativo entre os ensaios compressivos realizados com cera em estado sólido.

A análise das seções das curvas obtidas fornece o deslocamento máximo do atuador e a força aplicada no momento da ruptura da membrana, para cada uma das quatro cápsulas ensaiadas. A Tabela (15) subsequente indica os resultados obtidos a partir da realização dos ensaios compressivos.

Tabela 15: Resultados de força e deslocamento máximo obtidos nos ensaios compressivos para as cápsulas contendo cera sólida.

|                  | $F_{max}[kN]$ | $d_{max}[mm]$ |
|------------------|---------------|---------------|
| <b>Cápsula 1</b> | 39,02         | 17,81         |
| <b>Cápsula 2</b> | 39,86         | 16,38         |
| <b>Cápsula 3</b> | 40,49         | 16,37         |
| <b>Cápsula 4</b> | 56,20         | 17,58         |

Observou-se, ao longo da execução dos ensaios, grande capacidade de deformação da estrutura e geometria das cápsulas antes de seu rompimento. Ainda que a cera no interior das cápsulas estivesse totalmente fragmentada, a membrana de revestimento conteve o material em seu interior expandindo excessivamente seu diâmetro e reduzindo sua espessura, como se percebe na figura (55). Assim que cada ensaio foi finalizado e o atuador retornou a sua posição inicial, as cápsulas imediatamente retomaram a estrutura e aspecto geométrico projetados, a menos de pequenas deformações. A tendência das cápsulas de retornarem à sua geometria inicial após o processo de compressão pode ser observada comparando-se a Fig.(53) e a Fig.(55) a seguir.



Verifica-se que a primeira aplicação de carga compressiva é suficiente para fragmentar o Bio-PCM no interior das cápsulas, fazendo com que a primeira curva de  $F$  versus  $d$  seja diferente das demais. Com o interior das cápsulas já fragmentado, as três aplicações de carga que deram sequência conferiram maior deformação às cápsulas para uma mesma força aplicada, trazendo as curvas mais para a direita do gráfico. Tendo em vista a convergência das curvas para um mesmo comportamento na medida em que se repetia a aplicação da carga, submeteu-se o protótipo testado à um ciclo completo de carregamento e descarregamento térmico e novamente aplicou-se a carga de  $17,5kN$ . Observou-se, desta maneira, uma variação na curva característica obtida e a cápsula teve sua membrana rompida. A curva mais à direita da Fig.(56) indica o comportamento da cápsula após ser submetida ao ciclo térmico e retornar ao estado sólido.

### 5.2.2 CÁPSULAS LÍQUIDAS

O comportamento das cápsulas sob carga compressiva, com seu interior em estado líquido, também foi analisado, porém sem muita expressividade em seus resultados. A seguir, na Figura (57), estão representadas as curvas de compressão das três cápsulas em estado líquido ensaiadas. Os gráficos individuais dos ensaios compressivos com a cera líquida estão dispostos em APÊNDICE II.

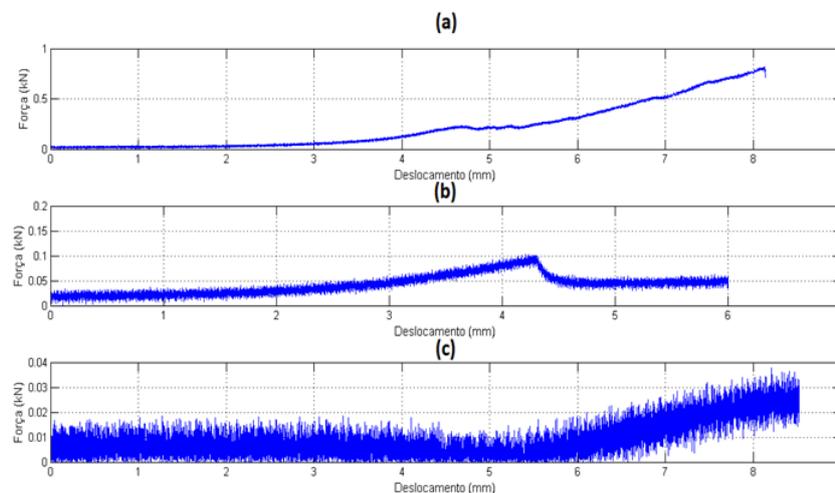


Figura 57: Curvas de compressão das cápsulas com seu interior em estado líquido.

Os valores registrados de força para ruptura na membrana das cápsulas não apresentam proximidade entre si, tornando os resultados inconclusivos. Ainda mais, a força a qual as cápsulas líquidas resistem é de ordem de magnitude muito menor do que em estado sólido. As dificuldades encontradas ao longo dos ensaios relacionam-se com a mudança de fase do PCM e a variação da temperatura ao longo do processo de compressão. Em uma tentativa de tornar mais homogênea a distribuição de temperaturas ao longo do ensaio, a base fixada às garras da MTS foi aquecida previamente à realização do ensaio e,

ainda assim, não foi verificada convergência entre os resultados alcançados. A Tabela (16) subsequente apresenta os valores máximos de força suportada pelas cápsulas em estado líquido sob compressão e seus respectivos deslocamentos.

Tabela 16: Resultados de força e deslocamento máximo para as cápsulas contendo cera líquida.

|                  | $F_{max}[kN]$ | $d_{max}[mm]$ |
|------------------|---------------|---------------|
| <b>Cápsula 1</b> | 0,78          | 8,13          |
| <b>Cápsula 2</b> | 0,10          | 4,28          |
| <b>Cápsula 3</b> | 0,03          | 8,51          |

### 5.3 LIMITE MÁXIMO DE TEMPERATURA

Assim como o teste de resistência mecânica, a análise de resistência térmica tem como o intuito determinar a temperatura que ocasiona a avaria da membrana de revestimento. Determinado o valor de  $0,84mm$  para a espessura do revestimento dos protótipos, avaliou-se o valor máximo de temperatura ao qual as cápsulas projetadas podem ser expostas num eventual sistema de armazenamento de calor latente.

Vale notar que o fabricante do material de revestimento recomenda um valor máximo de temperatura ao qual o produto pode ser submetido, contudo desejou-se conhecer com maior precisão este limite, que dependerá da espessura do revestimento aplicado nas cápsulas. O teste de resistência térmica conduzido seguiu os procedimentos apresentados no capítulo anterior operando na faixa de  $24^{\circ}C$  (temperatura ambiente da água) a  $96^{\circ}C$  (temperatura máxima atingida). Não foi possível determinar o limite superior de temperatura que uma cápsula suporta, pois não foram verificados danos relevantes à superfície da membrana.

### 5.4 CICLO DE CARREGAMENTO/DESCARREGAMENTO

Seguindo os procedimentos apresentados no capítulo anterior, o teste de ciclos consistiu na medição das principais cotas geométricas da cápsula emborrachada, recém fabricada, e posterior avaliação das mesmas quando submetidas a um ciclo completo de carregamento e descarregamento. A cápsula testada passou por um total de cinco ciclos, registrando-se as medidas de suas cotas após o término de cada um deles. A Tabela (17) abaixo apresenta os valores médios das principais cotas geométricas analisadas para comparação. A tabela completa com os valores iniciais medidos para o protótipo, assim como as variações observadas após cada ciclo estão dispostas em APÊNDICE III. As medidas foram tomadas com auxílio de um paquímetro digital, com erro de  $\pm 0,01mm$ . Os valores médios calculados apresentam erro associado de  $\pm 0,01mm$ .

Tabela 17: Tabela contendo as médias das principais cotas geométricas do protótipo.

| Medições [ $mm$ ] ( $\pm 0,01$ ) |           |           |           |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | $\bar{D}$ | $\bar{H}$ | $\bar{P}$ |
| <b>Dimensões Iniciais</b>        | 57,90     | 20,24     | 6,01      |
| <b>1º ciclo</b>                  | 56,02     | 21,74     | 6,01      |
| <b>2º ciclo</b>                  | 55,68     | 22,02     | 5,88      |
| <b>3º ciclo</b>                  | 55,22     | 22,20     | 4,53      |
| <b>4º ciclo</b>                  | 54,98     | 22,24     | 4,43      |
| <b>5º ciclo</b>                  | 54,89     | 22,31     | 4,19      |

Pela análise da Tabela (17) acima, observa-se o decremento do parâmetro  $D$  ao longo dos ciclos, variando de 57,90  $mm$  a 54,89  $mm$  e conseqüentemente um aumento da cota  $H$ , que parte de 20,24  $mm$  e progride à 22,31  $mm$ . Nota-se também uma diminuição no valor de  $V$ , que se atenua de 6,01  $mm$  a 4,19  $mm$ .

Além das medições feitas após cada ciclo de carregamento e descarregamento, são realizadas inspeções visuais no protótipo a fim de constatar quaisquer alterações na geometria e acabamento da membrana de revestimento. Com os dados obtidos pelas medições das principais cotas geométricas da cápsula, constata-se que o protótipo passa a perder a concavidade característica de glóbulo vermelho ao longo dos cinco ciclos, se aproximando cada vez mais da geometria de um elipsóide. Especula-se que a variação da geometria da cápsula ao longo dos ciclos de carregamento e descarregamento advém da convecção natural causada pela frente de fusão da cera e um conseqüente aumento da pressão interna no encapsulamento, forçando a região côncava para fora e tornando-a cada vez mais plana. Este resultado é extremamente relevante para o projeto, pois a geometria da cápsula influencia diretamente nas trocas de calor entre o protótipo e o fluido de transferência.

Uma solução que pode ser implementada para diminuir essa variação de geometria seria o aumento da espessura de revestimento, seguida de um novo teste de ciclos para avaliação da manutenção das cotas.

## 5.5 CALORÍMETRO

### 5.5.1 TAXA DE CARREGAMENTO

O experimento para determinar a taxa de descarregamento das cápsulas de Bio-PCM projetadas passou por um total de três rotinas. Nos dois primeiros ensaios realizados, onde a temperatura de entrada da água no sistema era de 23°C e 25°C, respectivamente, não foi observada variação na temperatura de saída do calorímetro. Ademais, as primeiras duas rotinas realizadas serviram como base para o ajuste dos parâmetros de entrada do

experimento e para tanto, foram utilizadas vazões de  $1,25L/min$  e  $0,40L/min$ .

A temperatura de solidificação da cera de palma é relativamente próxima da temperatura de entrada da água, o que dificulta o ganho de temperatura da água ao longo do experimento. Além disso, quanto maior a vazão de água imposta na entrada do sistema, menor o acréscimo da temperatura medida na saída. Sabe-se, pela análise da revisão bibliográfica, que a taxa de carregamento/descarregamento cresce diretamente com a vazão de entrada. Contudo, isto só poderia ser observado caso o termopar utilizado fosse posicionado no interior da cápsula, medindo a temperatura da cera ao longo do processo de mudança de fase. Por estas razões é razoável constatar que não foi verificada variação nos valores medidos na entrada e na saída do sistema.

Para a execução da terceira rotina experimental, adicionou-se  $4kg$  de gelo em cubos no reservatório de água com o intuito de diminuir a temperatura de entrada no sistema. O material utilizado para o reservatório foi o poliestireno, devido às suas propriedades isolantes, portanto considerou-se aproximadamente constante a temperatura em seu interior. A temperatura inicial alcançada foi de  $7^{\circ}C$  e, ajustando os parâmetros de entrada para o experimento, estabeleceu-se vazão de  $0,35L/min$ . A Tabela (18) indica os valores de temperatura medidos a cada minuto num intervalo de 30 minutos e a Fig.(58) apresenta a curva de aquecimento da água.

Tabela 18: Medições de temperatura de saída da água no calorímetro.

| <b>Medições de temperatura</b> |                        |                        |
|--------------------------------|------------------------|------------------------|
| $T_1 = 9^{\circ}C$             | $T_{11} = 11^{\circ}C$ | $T_{21} = 10^{\circ}C$ |
| $T_2 = 9^{\circ}C$             | $T_{12} = 11^{\circ}C$ | $T_{22} = 10^{\circ}C$ |
| $T_3 = 10^{\circ}C$            | $T_{13} = 11^{\circ}C$ | $T_{23} = 10^{\circ}C$ |
| $T_4 = 11^{\circ}C$            | $T_{14} = 10^{\circ}C$ | $T_{24} = 10^{\circ}C$ |
| $T_5 = 11^{\circ}C$            | $T_{15} = 10^{\circ}C$ | $T_{25} = 10^{\circ}C$ |
| $T_6 = 11^{\circ}C$            | $T_{16} = 10^{\circ}C$ | $T_{26} = 10^{\circ}C$ |
| $T_7 = 11^{\circ}C$            | $T_{17} = 11^{\circ}C$ | $T_{27} = 10^{\circ}C$ |
| $T_8 = 11^{\circ}C$            | $T_{18} = 11^{\circ}C$ | $T_{28} = 9^{\circ}C$  |
| $T_9 = 11^{\circ}C$            | $T_{19} = 10^{\circ}C$ | $T_{29} = 9^{\circ}C$  |
| $T_{10} = 11^{\circ}C$         | $T_{20} = 11^{\circ}C$ | $T_{30} = 9^{\circ}C$  |

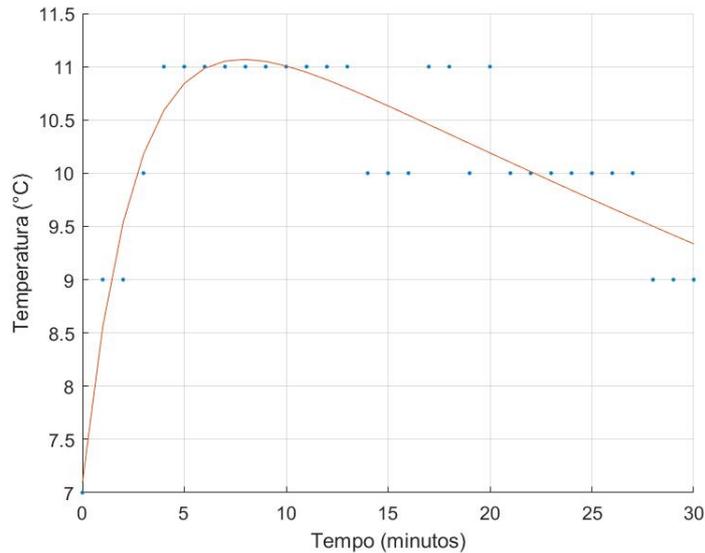


Figura 58: Curva de aquecimento da água ao longo do experimento de taxa de carregamento.

Utilizando o *software* MATLAB os dados coletados foram plotados no gráfico e foi realizado ajuste exponencial de curva com dois termos, onde a aproximação foi dada por  $R^2 = 0,8341$ . O ajuste se faz necessário tendo em vista a baixa precisão do instrumento de medição utilizado. Observa-se, no início do gráfico, um elevado gradiente de temperaturas, decorrente da troca de calor sensível antes do processo de mudança de fase da cera de palma. Percebe-se que a partir do quarto minuto de experimento a temperatura atinge um pico e se estabiliza em  $11^{\circ}\text{C}$ , o que evidencia o início da solidificação do PCM no interior da cápsula. Esta temperatura foi mantida aproximadamente constante durante 16 minutos e, em seguida, verificou-se um decaimento nos valores medidos, indicando que as cápsulas foram completamente solidificadas e a temperatura de saída tende a se aproximar da temperatura de entrada.

A maior diferença de temperaturas alcançada com o experimento foi de  $4^{\circ}\text{C}$ . Especula-se que no início do processo de mudança de fase da cera, forma-se uma camada de material sólido próximo à membrana de revestimento que dificulta a transferência do calor do interior das cápsulas para a água devido à baixa condutividade térmica característica de materiais orgânicos, ocasionando apenas um pequeno acréscimo na temperatura de saída do calorímetro.

De posse da distribuição de temperaturas ao longo do tempo do experimento, conhecendo o valor da vazão e temperatura de entrada do sistema, a taxa de descarregamento calculada, por meio da Eq. (4.1), foi de  $\dot{Q} = 588\text{J/s}$ . Após o término da rotina do experimento, o valor máximo de temperaturas encontrado deve ser atribuído à equação de fluxo de calor para determinar novos valores de  $Nu$ ,  $h$  e  $\dot{m}$ . Impondo no sistema o novo valor encontrado para a vazão, registra-se uma nova diferença de temperaturas e, repetindo este processo, os valores de taxa de carregamento obtidos adquirem maior

precisão.

## 5.5.2 CALOR ARMAZENADO

O calor total armazenado por uma cápsula foi determinado utilizando o mesmo calorímetro, desta vez imergindo as cápsulas pré-carregadas em um volume fixo de água estipulado em  $2L$ , com temperatura inicial de  $15^{\circ}C$ . A distribuição de temperaturas obtida e a curva de aquecimento da água estão apresentadas na Tabela (19) e na Fig.(59) a seguir, respectivamente. As medidas foram tomadas a cada minuto em um intervalo de 60 minutos.

Tabela 19: Medições de temperatura dentro do calorímetro durante o experimento.

| Medições de temperatura |                        |                        |                        |                        |                        |
|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $T_1 = 16^{\circ}C$     | $T_{11} = 18^{\circ}C$ | $T_{21} = 19^{\circ}C$ | $T_{31} = 20^{\circ}C$ | $T_{41} = 20^{\circ}C$ | $T_{51} = 20^{\circ}C$ |
| $T_2 = 16^{\circ}C$     | $T_{12} = 18^{\circ}C$ | $T_{22} = 19^{\circ}C$ | $T_{32} = 20^{\circ}C$ | $T_{42} = 20^{\circ}C$ | $T_{52} = 20^{\circ}C$ |
| $T_3 = 16^{\circ}C$     | $T_{13} = 18^{\circ}C$ | $T_{23} = 19^{\circ}C$ | $T_{33} = 20^{\circ}C$ | $T_{43} = 20^{\circ}C$ | $T_{53} = 20^{\circ}C$ |
| $T_4 = 16^{\circ}C$     | $T_{14} = 18^{\circ}C$ | $T_{24} = 19^{\circ}C$ | $T_{34} = 20^{\circ}C$ | $T_{44} = 20^{\circ}C$ | $T_{54} = 20^{\circ}C$ |
| $T_5 = 17^{\circ}C$     | $T_{15} = 18^{\circ}C$ | $T_{25} = 19^{\circ}C$ | $T_{35} = 20^{\circ}C$ | $T_{45} = 20^{\circ}C$ | $T_{55} = 20^{\circ}C$ |
| $T_6 = 17^{\circ}C$     | $T_{16} = 18^{\circ}C$ | $T_{26} = 19^{\circ}C$ | $T_{36} = 20^{\circ}C$ | $T_{46} = 20^{\circ}C$ | $T_{56} = 20^{\circ}C$ |
| $T_7 = 17^{\circ}C$     | $T_{17} = 18^{\circ}C$ | $T_{27} = 19^{\circ}C$ | $T_{37} = 20^{\circ}C$ | $T_{47} = 20^{\circ}C$ | $T_{57} = 20^{\circ}C$ |
| $T_8 = 17^{\circ}C$     | $T_{18} = 19^{\circ}C$ | $T_{28} = 19^{\circ}C$ | $T_{38} = 20^{\circ}C$ | $T_{48} = 20^{\circ}C$ | $T_{58} = 20^{\circ}C$ |
| $T_9 = 17^{\circ}C$     | $T_{19} = 19^{\circ}C$ | $T_{29} = 19^{\circ}C$ | $T_{39} = 20^{\circ}C$ | $T_{49} = 20^{\circ}C$ | $T_{59} = 20^{\circ}C$ |
| $T_{10} = 18^{\circ}C$  | $T_{20} = 19^{\circ}C$ | $T_{30} = 19^{\circ}C$ | $T_{40} = 20^{\circ}C$ | $T_{50} = 20^{\circ}C$ | $T_{60} = 20^{\circ}C$ |

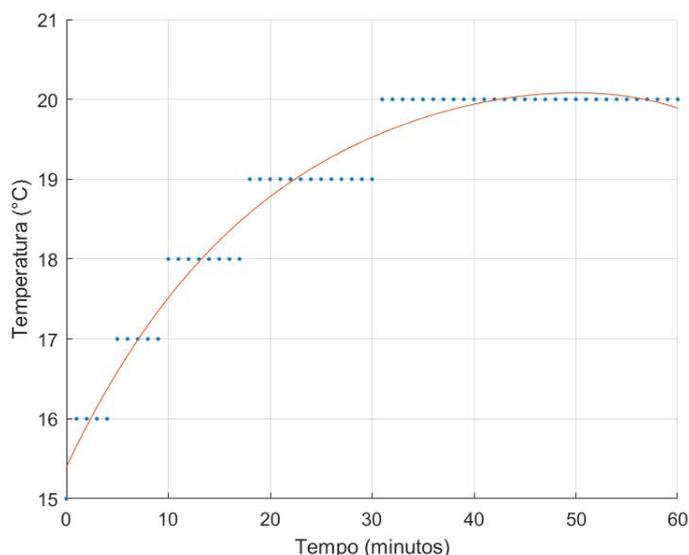


Figura 59: Curva de aquecimento da água ao longo do experimento de quantidade de calor armazenado.

Analisando o gráfico, observa-se que a temperatura cresce rapidamente até se estabilizar em um valor máximo de  $20^{\circ}C$ . O ajuste da curva foi feito utilizando função

polinomial, com aproximação dada por  $R^2 = 0,9431$ . Novamente calor sensível é trocado no início do experimento até que se inicie o processo de mudança de fase. Haja vista que não há fluxo de água através do sistema, verifica-se um maior tempo de descarregamento da energia acumulada das cápsulas. Ainda mais, a ausência de vazão faz com que a temperatura mantenha-se em seu valor máximo sem decair, sendo o calorímetro um sistema aproximadamente isolado.

O calor que uma cápsula é capaz de armazenar em seu interior, determinado por meio da Eq.(4.6), foi de  $Q = 4200J$ .

## 6 CONCLUSÃO

O estudo acerca de sistemas de macroencapsulamento de materiais de mudança de fase provou-se extremamente relevante devido à atual corrida por soluções sustentáveis em engenharia e energia. A cera de palma, Bio-PCM utilizada no presente projeto, é de grande disponibilidade em território brasileiro e a caracterização do material pelo método *T-history* identificou suas propriedades relevantes para o desenvolvimento de um sistema de armazenamento térmico.

Tratando-se das estruturas e geometrias de encapsulamento encontradas na literatura, estipulou-se aquela que apresentou melhor performance térmica. A geometria de hemácias adotada apresenta inúmeras vantagens; destacam-se entre elas a maior razão entre área superficial e volume (que colabora para acomodar expansões volumétricas), maior taxa de carregamento e menor duração do processo de mudança de fase.

Foram desenvolvidas duas metodologias distintas para a fabricação dos protótipos. Os resultados obtidos por meio das metodologias propostas são reunidos na Tab.(20) a seguir, com o intuito de estabelecer comparativo entre os dois protótipos fabricados.

Tabela 20: Comparativo entre as duas metodologias apresentadas.

|   | <b>Cápsula fabricada<br/>por injeção no molde</b> | <b>Cápsula fabricada<br/>por impressão 3D</b> |
|---|---|---|
| <b>Massa total</b> [g]                  | 34,6 ± 0,1  | 34,5 ± 0,1                                    |
| <b>Razão mássica</b>                    | 0,867 ± 0,005                                     | 0,715 ± 0,008                                 |
| <b>Espessura</b> [mm]                   | 0,64 ± 0,02                                       | 2,18 ± 0,02                                   |
| <b>Resistência térmica</b> [ $m^2K/W$ ] | 0,019   | 0,012   |
| <b>Tempo de fabricação</b> [h]          | 9   | 4   |

Adotando-se a metodologia de encapsulamento por molde, desenvolveram-se uma série de protótipos para realização de ensaios mecânicos e térmicos. Com a espessura da membrana de revestimento de 0,84mm, alcançou-se uma resistência térmica de 0,025 $m^2K/W$  e a condução dos experimentos resultou em calor de 4200J armazenado em uma cápsula e uma taxa de carregamento de 588W. Ao submeter-se as cápsulas a ciclos repetidos de carregamento e descarregamento, observou-se a tendência da alteração de sua geometria de hemácias para a estrutura de um elipsóide, devido ao aumento da pressão interna e movimento de convecção natural.

Com relação à sua resistência mecânica à carregamento compressivo, as cápsulas desenvolvidas suportaram carga uma média de  $43,89kN$ , em estado sólido, e  $0,30kN$  em estado líquido. Ainda que as cápsulas apresentem baixa resistência em fase líquida, em estado sólido os resultados alcançados foram surpreendentemente grandes tendo em vista a finalidade do projeto. Aplicando uma carga média de  $17,5kN$  sobre um mesmo protótipo, verificou-se sua notória capacidade de deformação sem que sua membrana de revestimento rompa, ainda que a cera no interior da cápsula esteja totalmente fragmentada.

Haja vista a baixa condutividade térmica típica de materiais orgânicos e também do material empregado para a membrana de revestimento das cápsulas, o tempo necessário para executar o carregamento/descarregamento da energia armazenada é relativamente elevado. Ademais, os efeitos de cristalização do material próximo a superfície ao longo do processo de mudança de fase dificultam a troca de calor entre a fração líquida de PCM no interior das cápsulas. Isto posto, sugere-se a aplicação das cápsulas desenvolvidas em sistemas cuja finalidade é de inércia térmica.

## 6.1 SUGESTÕES E PROPOSTAS FUTURAS

A partir da análise dos resultados obtidos e conclusões tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto, constatam-se oportunidades de trabalhos futuros acerca do tema para a continuidade do estudo realizado. As sugestões e propostas são discriminadas a seguir.

- Tendo em vista a maior praticidade da fabricação do revestimento das cápsulas, para posterior injeção do PCM, e ainda que a utilização de moldes possibilita produção em escala, propõe-se a usinagem de molde para confecção da membrana. O molde consiste em uma parte rebaixada e outra ressaltada, no qual a diferença de dimensão entre as duas partes corresponde a espessura do revestimento desejado. A figura (60) a seguir esquematiza o processo de fabricação descrito;



Figura 60: Modelo CAD 3D do molde para confecção da membrana da cápsula.

- Desenvolvimento de modelo computacional para analisar o comportamento do material durante o processo de mudança de fase;
- Conduzir estudo acerca da espessura da membrana de revestimento, que influencia em todos os parâmetros analisados no presente projeto;
- Conduzir estudo acerca da influência do tamanho das cápsulas em seu comportamento térmico e mecânico;
- Investigar a influência da temperatura na resistência da membrana de revestimento;
- Estabelecer comparativos entre a resistência à compressão de cápsulas com geometria de hemácias e cápsulas esféricas;

# Referências

AGYENIM, F. et al. A review of materials, heat transfer and phase change problem formulation for latent heat thermal energy storage systems (LHTESS). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, n. 2, p. 615–628, fev. 2010. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002469>>. Citado 3 vezes nas páginas 2, 6 e 8.

ALAM, T. E. et al. Macroencapsulation and characterization of phase change materials for latent heat thermal energy storage systems. *Applied Energy*, v. 154, p. 92–101, set. 2015. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261915005498>>. Citado 7 vezes nas páginas v, 9, 23, 24, 25, 26 e 32.

BéDÉCARRATS, J. P. et al. Study of a phase change energy storage using spherical capsules. Part I: Experimental results. *Energy Conversion and Management*, v. 50, n. 10, p. 2527–2536, out. 2009. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890409002210>>. Citado 3 vezes nas páginas iv, 18 e 19.

CHENG, X.; ZHAI, X. Thermal performance analysis of a novel PCM capsule in red blood cell shape. *Applied Thermal Engineering*, v. 120, p. 130–137, jun. 2017. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117303885>>. Citado 12 vezes nas páginas iv, v, viii, 10, 11, 12, 13, 32, 35, 41, 46 e 59.

CHENG, X.; ZHAI, X.; WANG, R. Thermal performance analysis of a packed bed cold storage unit using composite PCM capsules for high temperature solar cooling application. *Applied Thermal Engineering*, v. 100, p. 247–255, maio 2016. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111630179X>>. Citado 5 vezes nas páginas iv, v, 21, 22 e 23.

CUI, Y. et al. The experimental exploration of carbon nanofiber and carbon nanotube additives on thermal behavior of phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, v. 95, n. 4, p. 1208–1212, abr. 2011. ISSN 0927-0248. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024811000353>>. Citado 6 vezes nas páginas iv, 4, 8, 14, 15 e 16.

FLUECKIGER, S. M.; GARIMELLA, S. V. Latent heat augmentation of thermocline energy storage for concentrating solar power – A system-level assessment. *Applied Energy*, v. 116, p. 278–287, mar. 2014. ISSN 0306-2619. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261913009665>>. Citado 5 vezes nas páginas v, 5, 26, 27 e 28.

HALE, J.; VISKANTA, R. Solid-liquid phase change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above or below. 1980. Citado na página 8.

- HONG, H.; KIM, S. K.; KIM, Y.-S. Accuracy improvement of T-history method for measuring heat of fusion of various materials. *International Journal of Refrigeration*, v. 27, n. 4, p. 360–366, jun. 2004. ISSN 0140-7007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700703001981>>. Citado 5 vezes nas páginas v, 32, 33, 34 e 88.
- JACOB, R.; BRUNO, F. Review on shell materials used in the encapsulation of phase change materials for high temperature thermal energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 48, p. 79–87, ago. 2015. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001914>>. Citado na página 10.
- JURINAK, J.; ABDEL, K. Performance of air-based solar heating systems utilizing phase change energy storage. 1979. Citado na página 8.
- KHODADADI, J.; HOSSEINIZADEH, S. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. 2007. Citado na página 8.
- LAFDI, A. E. K. Effect of carbon nanofiber additives on thermal behavior of phase change materials, *Carbon* 43. 2005. Citado na página 8.
- MILLER, W. Energy storage via desiccants for food/agricultural applications. 1983. Citado na página 8.
- MORRISON, D.; ABDEL, K. Effects of phase change energy storage on the performance of air-based and liquid-based solar heating systems. 1978. Citado na página 8.
- MUÑOZ-SÁNCHEZ, B. et al. Encapsulated High Temperature PCM as Active Filler Material in a Thermocline-based Thermal Storage System. *Energy Procedia*, v. 69, p. 937–946, maio 2015. ISSN 1876-6102. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021500483X>>. Citado 7 vezes nas páginas v, 10, 27, 28, 29, 32 e 51.
- NETO, C. O.; MORAIS. *Análise de dados experimentais - Tratamento estatístico e propagação de erros*. 2014. Citado na página 44.
- ODUNSI, A. O.; O'DONOVAN, T. S.; REAY, D. A. Temperature stabilisation in Fischer–Tropsch reactors using phase change material (PCM). *Applied Thermal Engineering*, v. 93, p. 1377–1393, jan. 2016. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115008807>>. Citado na página 14.
- PIELICHOWSKA, K.; PIELICHOWSKI, K. Phase change materials for thermal energy storage. *Progress in Materials Science*, v. 65, p. 67–123, ago. 2014. ISSN 0079-6425. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642514000358>>. Citado 6 vezes nas páginas 3, 4, 7, 8, 10 e 14.
- RAFAEL, M.; FELIPE, C. Transformação de uma máquina SMT em uma fresadora CNC de pequeno porte. 2015. Citado 2 vezes nas páginas viii e 37.
- SATTARI, H. et al. CFD simulation of melting process of phase change materials (PCMs) in a spherical capsule. *International Journal of Refrigeration*, v. 73, p. 209–218, jan. 2017. ISSN 0140-7007. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700716302870>>. Citado 5 vezes nas páginas iv, 16, 17, 18 e 51.

- SHAILKH, S.; K., L.; K, H. Carbon nanoadditives to enhance latent energy storage of phase change materials. 2008. Citado na página 8.
- SHARMA, A. et al. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, n. 2, p. 318–345, fev. 2009. ISSN 1364-0321. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107001402>>. Citado 4 vezes nas páginas iv, 3, 7 e 8.
- SHARMA, R. K. et al. Developments in organic solid–liquid phase change materials and their applications in thermal energy storage. *Energy Conversion and Management*, v. 95, p. 193–228, maio 2015. ISSN 0196-8904. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415000989>>. Citado na página 10.
- Solven Solventes. *Ceras e Parafinas*. 2011. Disponível em: <<http://solven.com.br/produto/ceras-e-parafinas/>>. Citado na página 49.
- STANIŠKIS, J. K.; KATILĪŅTĒ, E. Complex evaluation of sustainability in engineering education: case & analysis. *Journal of Cleaner Production*, v. 120, p. 13–20, maio 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615013141>>. Citado na página 5.
- TELKES, M.; RAYMOND, E. Storing solar heat in chemicals-a report on the Dover house. 1949. Citado na página 8.
- TELKS, M. Thermal Energy Storage in salt hydrates. 1980. Citado na página 8.
- WANG, J.; Z.XIN. Thermal properties of paraffin based composites containing multi-walled carbon nanotubes. 2009. Citado na página 8.
- WU, J. et al. Population balance modeling for the charging process of a PCM cold energy storage tank. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 85, p. 647–655, jun. 2015. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931015001751>>. Citado 2 vezes nas páginas v e 30.
- WU, J. et al. Experimental investigation of the dynamic behavior of a large-scale refrigeration – PCM energy storage system. Validation of a complete model. *Energy*, v. 116, Part 1, p. 32–42, dez. 2016. ISSN 0360-5442. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216313688>>. Citado na página 29.
- YANG, L.; ZHANG, X.; XU, G. Thermal performance of a solar storage packed bed using spherical capsules filled with PCM having different melting points. *Energy and Buildings*, v. 68, Part B, p. 639–646, jan. 2014. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813006427>>. Citado 4 vezes nas páginas iv, 19, 20 e 21.
- ZALBA, B. et al. Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 23, n. 3, p. 251–283, fev. 2003. ISSN 1359-4311. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102001928>>. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 14 e 51.
- ZHANG Y; JIANG Y. A simple method, the T-history method, of determining the heat of fusion, specific heat and thermal conductivity of phase-change materials. jan. 1999. Citado 3 vezes nas páginas 9, 32 e 34.

# Apêndices

|                     |  | Pág. |
|---------------------|--|------|
| <b>Apêndice I</b>   | Equações de energia corrigidas e tabela com descrição das variáveis. | 88   |
| <b>Apêndice II</b>  | Gráficos dos ensaios compressivos realizados.                        | 90   |
| <b>Apêndice III</b> | Tabela comparativa com as principais cotas geométrica do protótipo.  | 99   |
| <b>Apêndice IV</b>  | Processo iterativo para determinação dos parâmetros do experimento.  | 100  |

As formulações de energia corrigidas por [HONG; KIM; KIM](#) são descritas a seguir. As equações (1), (2) e (3) representam o PCM no estado líquido, na mudança de fase e no estado sólido, respectivamente. Já as Eqs.(4), (5) e (6) descrevem o comportamento do material de referência.

$$(m_{t,p}C_{p,t} + m_p C_{p,l})(T_0 - T_s) = hA_c A_1 \quad (1)$$

$$(m_{t,p}C_{p,t} + m_p \frac{C_{p,l} + C_{p,s}}{2})(T_m - T_i) + m_p H_m = hA_c A_2 \quad (2)$$

$$(m_{t,p}C_{p,t} + m_p C_{p,s})(T_i - T_f) = hA_c A_3 \quad (3)$$

$$(m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w})(T_0 - T_s) = hA'_c A'_1 \quad (4)$$

$$(m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w})(T_m - T_i) = hA'_c A'_2 \quad (5)$$

$$(m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w})(T_i - T_f) = hA'_c A'_3 \quad (6)$$

Finalmente, o método *T-history* modificado fornece as Eqs.(7), (8) e (9) onde são calculados os valores de calor específico na fase líquida, calor específico na fase sólida e calor latente do PCM, respectivamente. A tabela (21) a seguir contém a descrição de todas as variáveis utilizadas nos cálculos, assim como suas unidades.

$$C_{p,l} = \frac{m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w}}{m_p} \frac{A_c A_1}{A'_c A'_1} - \frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t} \quad (7)$$

$$C_{p,s} = \frac{m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w}}{m_p} \frac{A_c A_3}{A'_c A'_3} - \frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t} \quad (8)$$

$$H_m = -\left(\frac{m_{t,p}}{m_p} C_{p,t} + \frac{C_{p,t} + C_{p,s}}{2}\right)(T_m - T_i) + \frac{m_{t,w}C_{p,t} + m_w C_{p,w}}{m_p} \frac{A_c A_2}{A'_c A'_2} (T_m - T_i) \quad (9)$$

Tabela 21: Descrição das variáveis utilizadas no cálculo das propriedades.

| Variáveis | Descrição                                  | Unidade     |
|-----------|--|-------------|
| $m_p$     | Massa do PCM                               | $kg$        |
| $m_w$     | Massa do material de referência            | $kg$        |
| $m_{t,p}$ | Massa do tubo de PCM                       | $kg$        |
| $m_{t,w}$ | Massa do tubo de água                      | $kg$        |
| $C_{p,t}$ | Calor específico do tubo                   | $kJ/kgK$    |
| $C_{p,w}$ | Calor específico do material de referência | $kJ/kgK$    |
| $C_{p,s}$ | Calor específico na fase sólida            | $kJ/kgK$    |
| $C_{p,l}$ | Calor específico na fase líquida           | $kJ/kgK$    |
| $T_0$     | Temperatura inicial                        | $^{\circ}C$ |
| $T_s$     | Temperatura de solidificação               | $^{\circ}C$ |
| $T_m$     | Temperatura de fusão                       | $^{\circ}C$ |
| $T_i$     | Temperatura de inflexão                    | $^{\circ}C$ |
| $T_f$     | Temperatura final                          | $^{\circ}C$ |
| $H_m$     | Calor latente de fusão                     | $kJ/kg$     |
| $h$       | Coefficiente de transferência de calor     | $W/m^2K$    |
| $A_c$     | Área de troca de calor do tubo             | $m^2$       |
| $A_1$     | Área para o estado líquido                 | $m^2$       |
| $A_2$     | Área para a mudança de fase                | $m^2$       |
| $A_3$     | Área para o estado sólido                  | $m^2$       |
| $A'_c$    | Área de troca de calor do tubo (água)      | $m^2$       |
| $A'_1$    | Área para o estado líquido (água)          | $m^2$       |
| $A'_2$    | Área para a mudança de fase (água)         | $m^2$       |
| $A'_3$    | Área para o estado sólido (água)           | $m^2$       |

As figuras de (61) a (72) representam os ensaios compressivos individuais para a cápsula contendo cera no estado sólido.

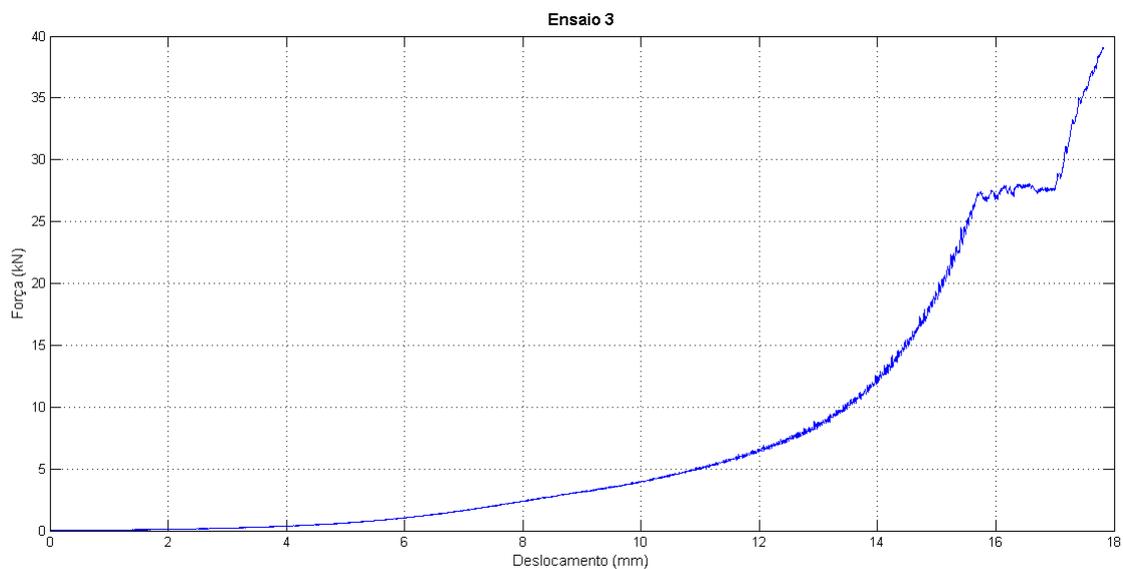


Figura 61: Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 1)

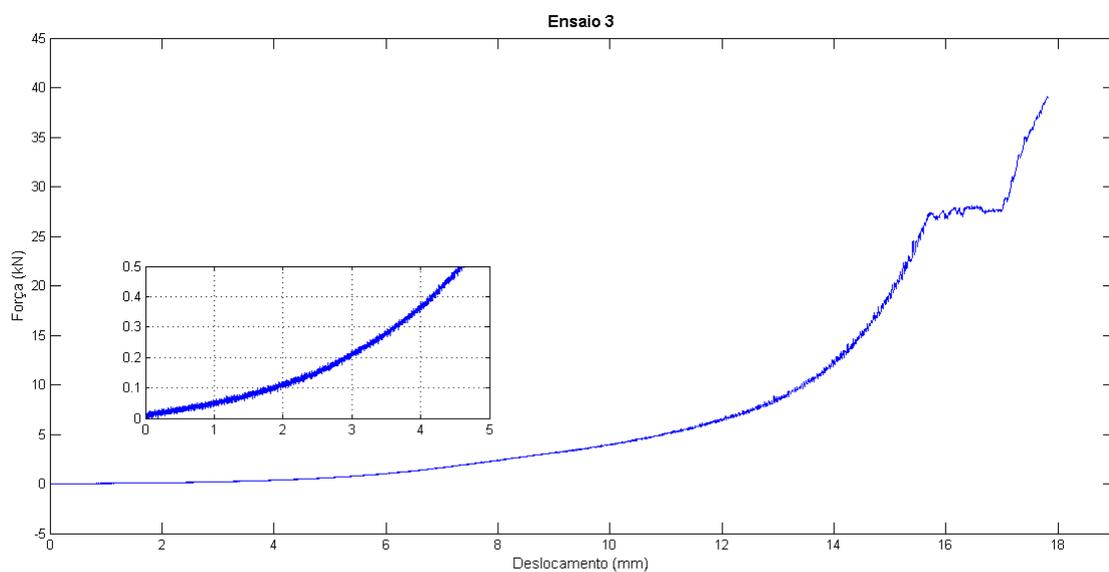


Figura 62: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da cera. (Cápsula 1)

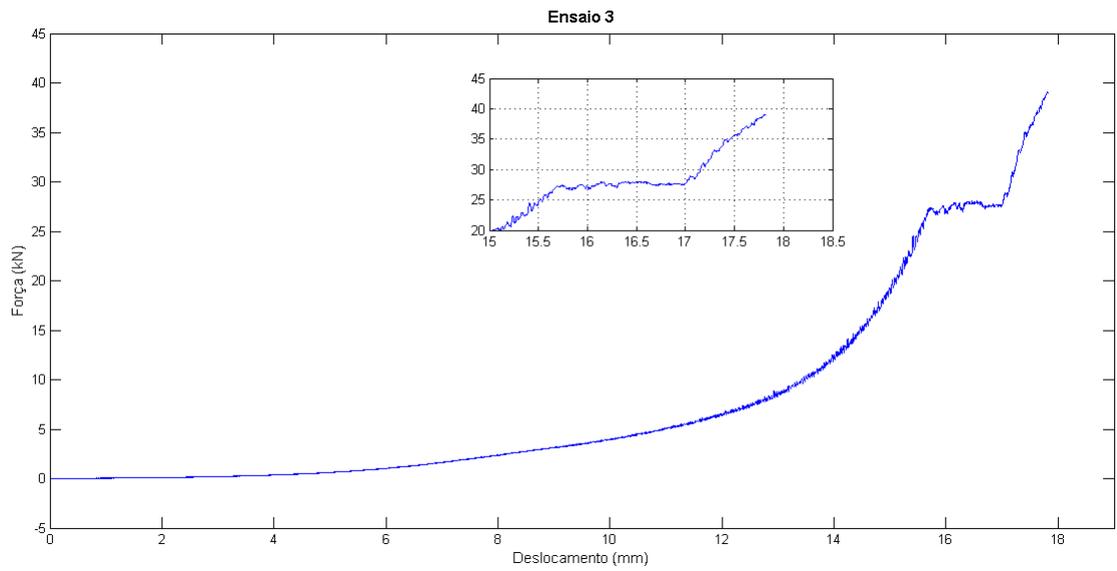


Figura 63: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da membrana de revestimento. (Cápsula 1)

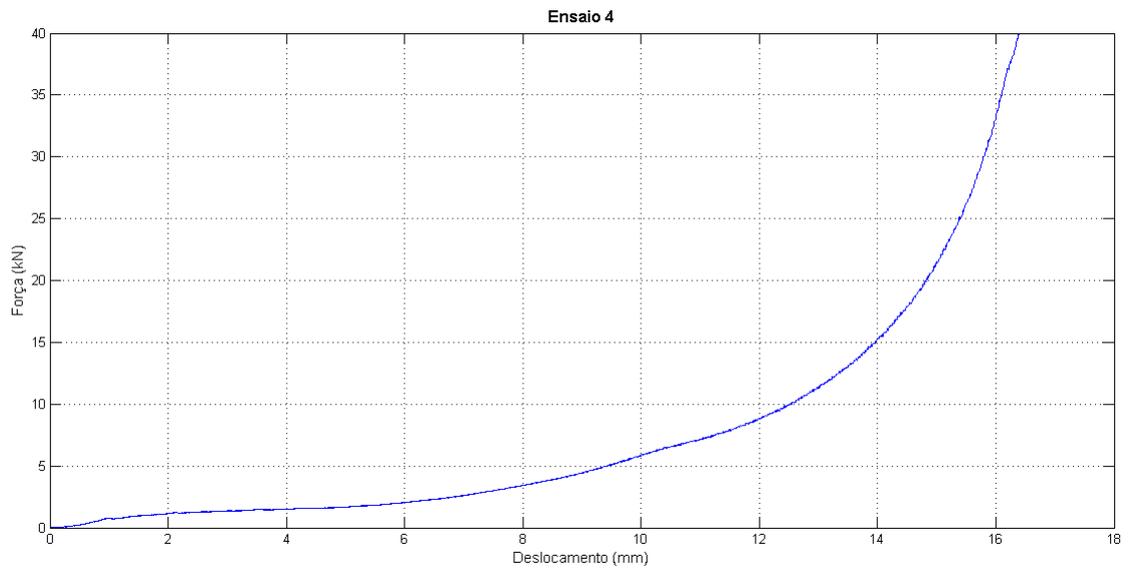


Figura 64: Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 2)

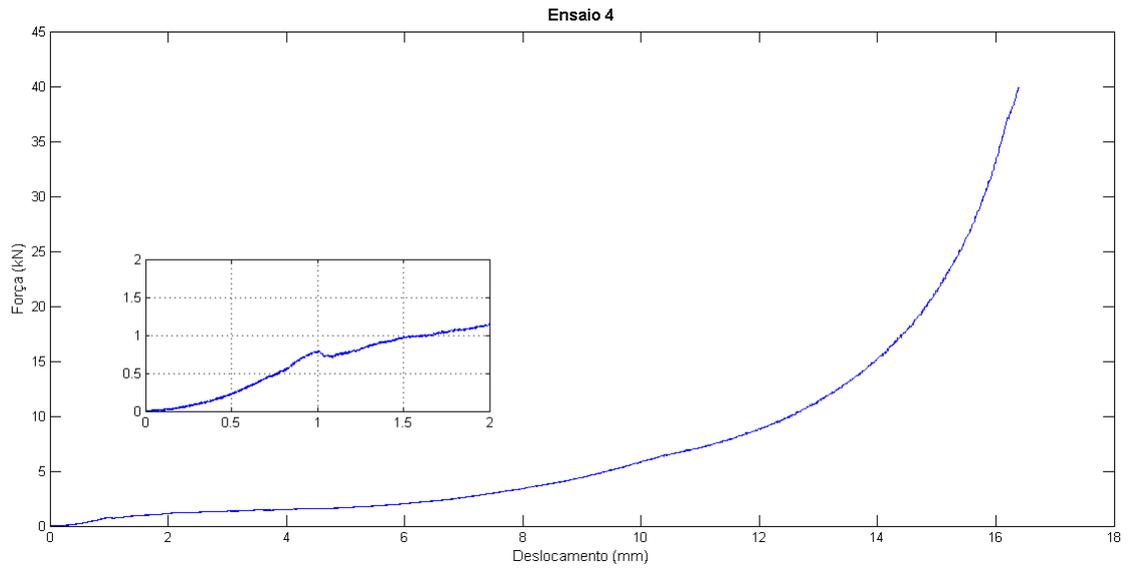


Figura 65: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da cera. (Cápsula 2)

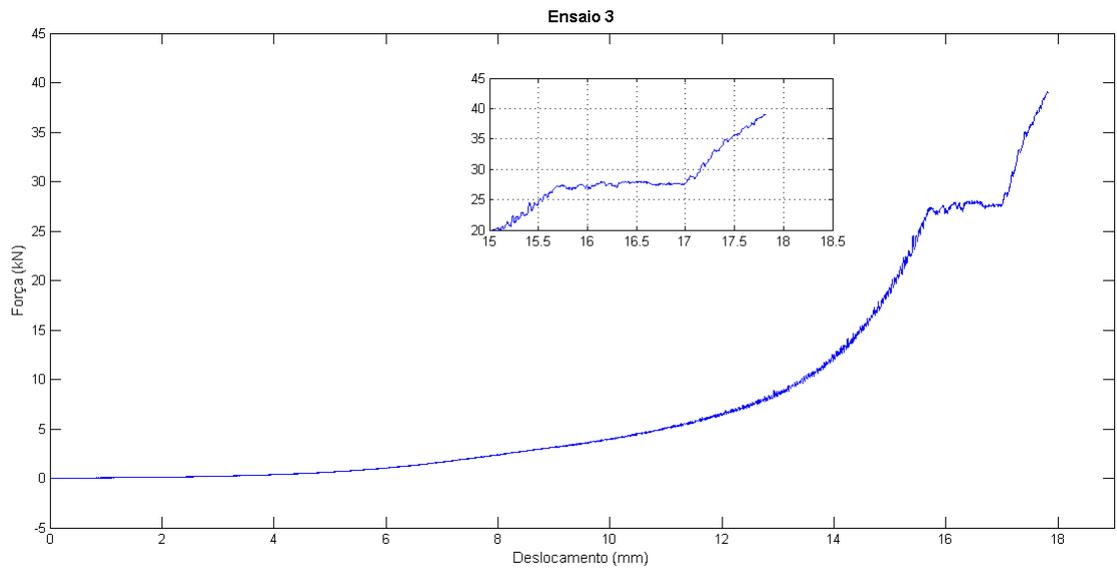


Figura 66: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da membrana de revestimento. (Cápsula 2)

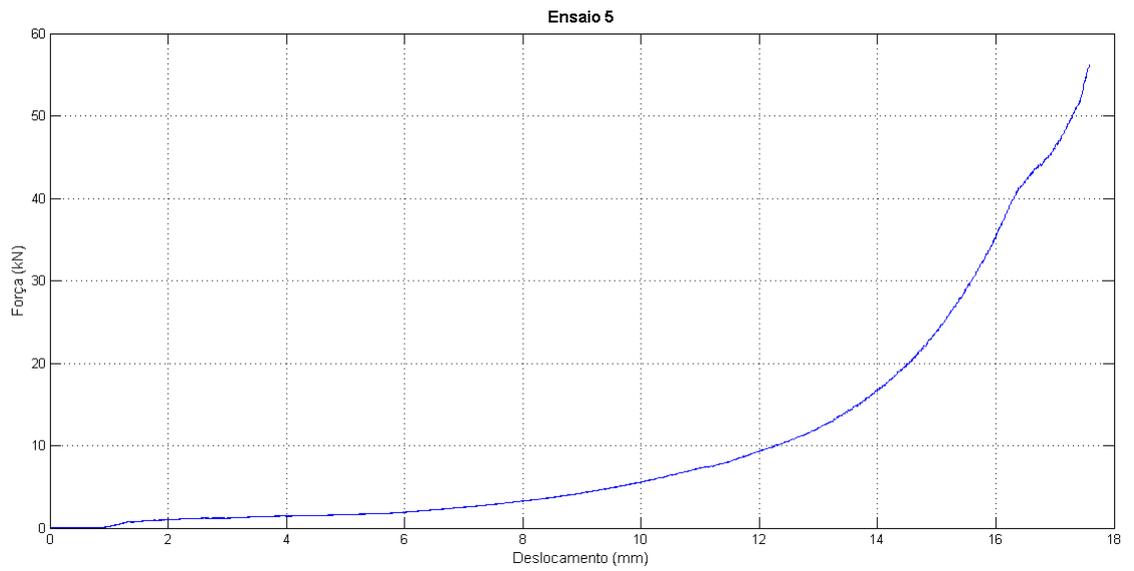


Figura 67: Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 3)

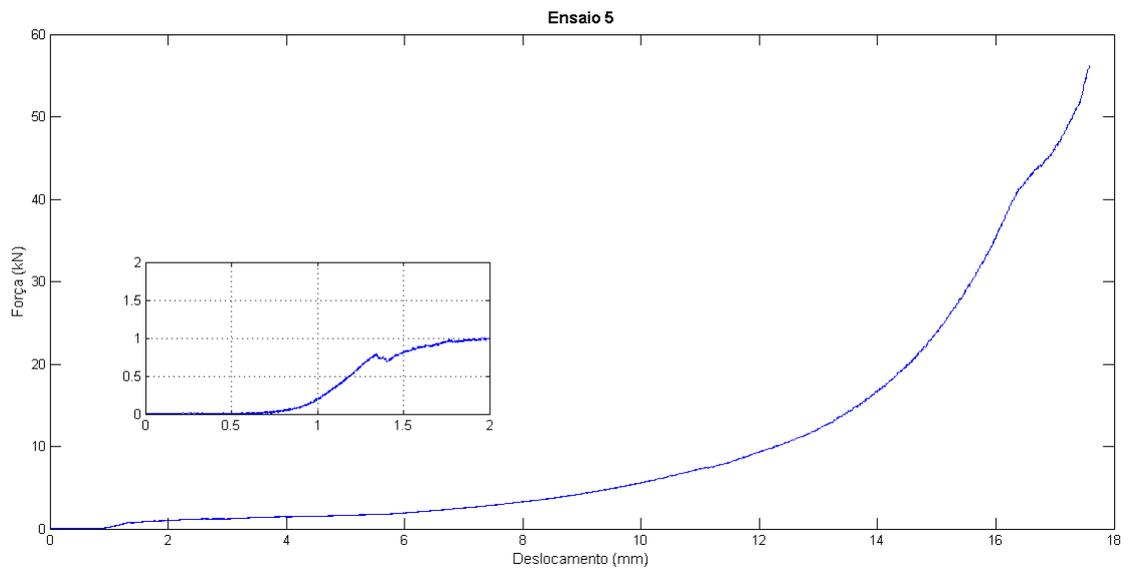


Figura 68: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da cera. (Cápsula 3)

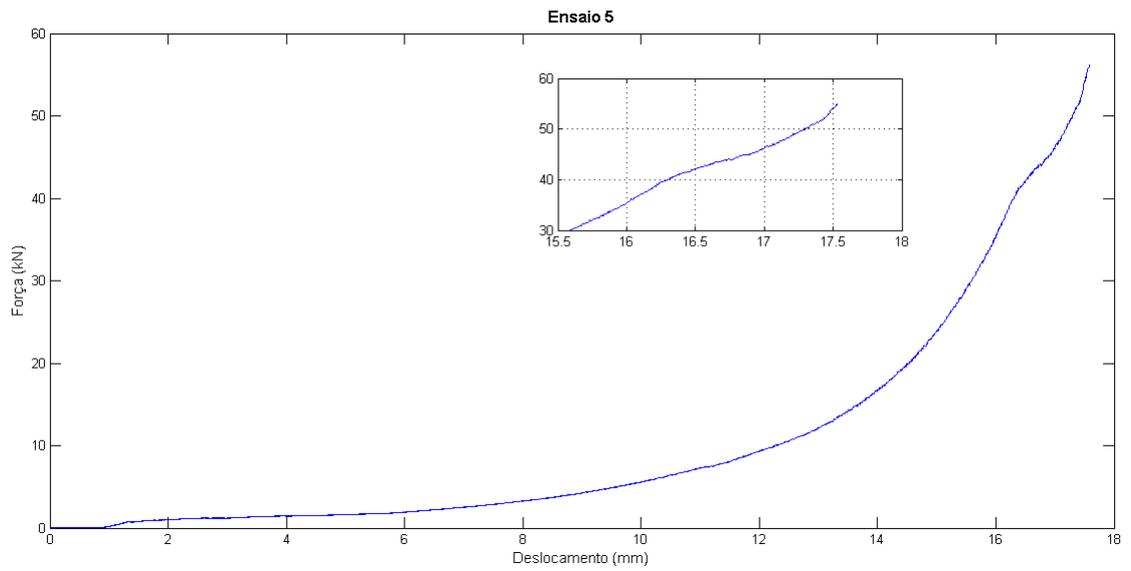


Figura 69: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da membrana de revestimento. (Cápsula 3)

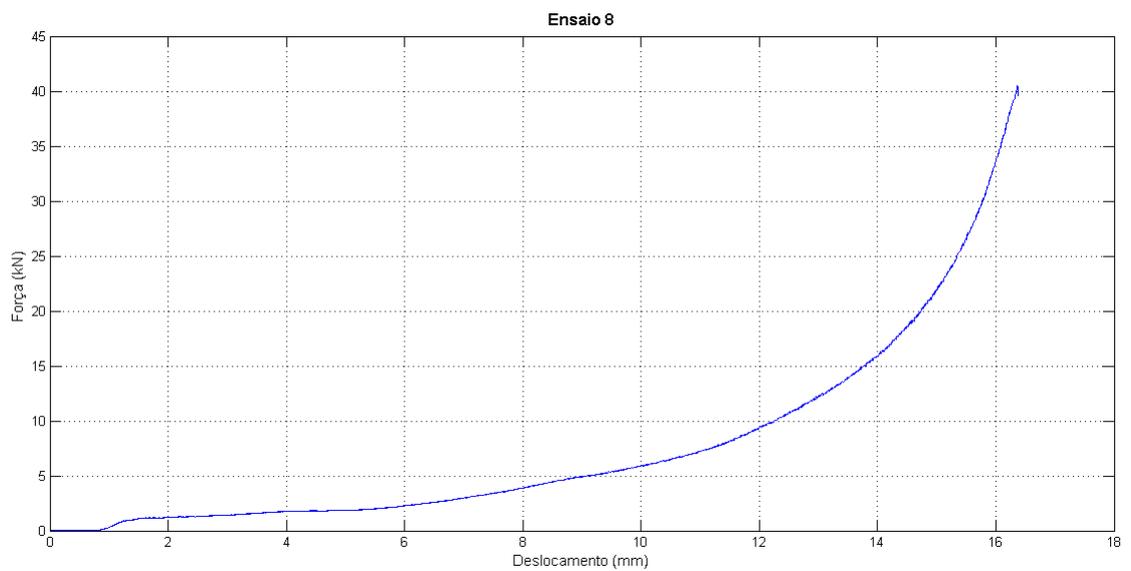


Figura 70: Ensaio compressivo com a cera sólida. (Cápsula 4)

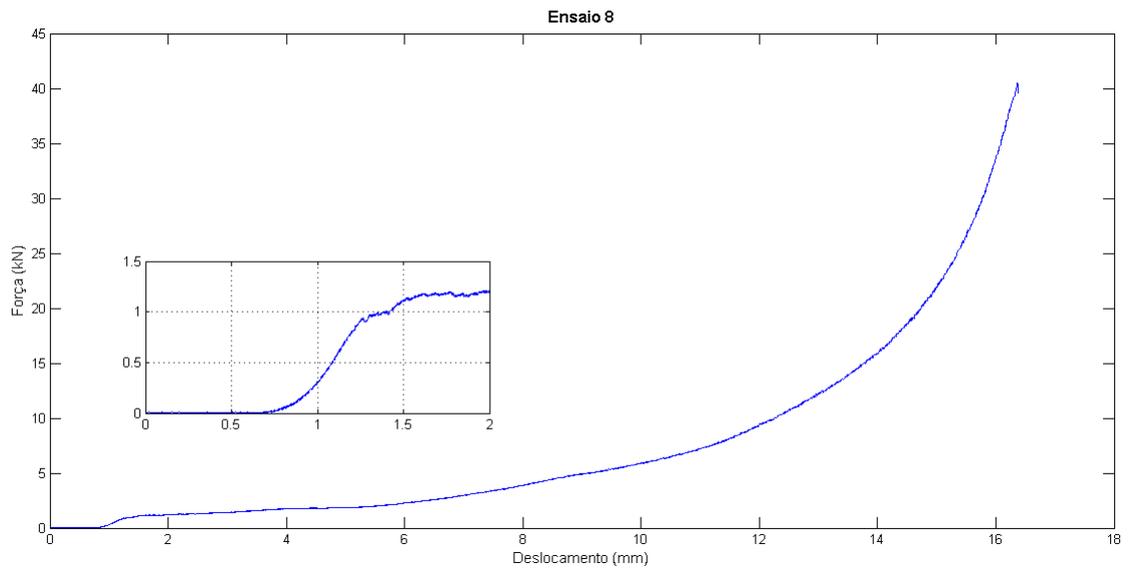


Figura 71: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise da falha frágil da cera. (Cápsula 4)

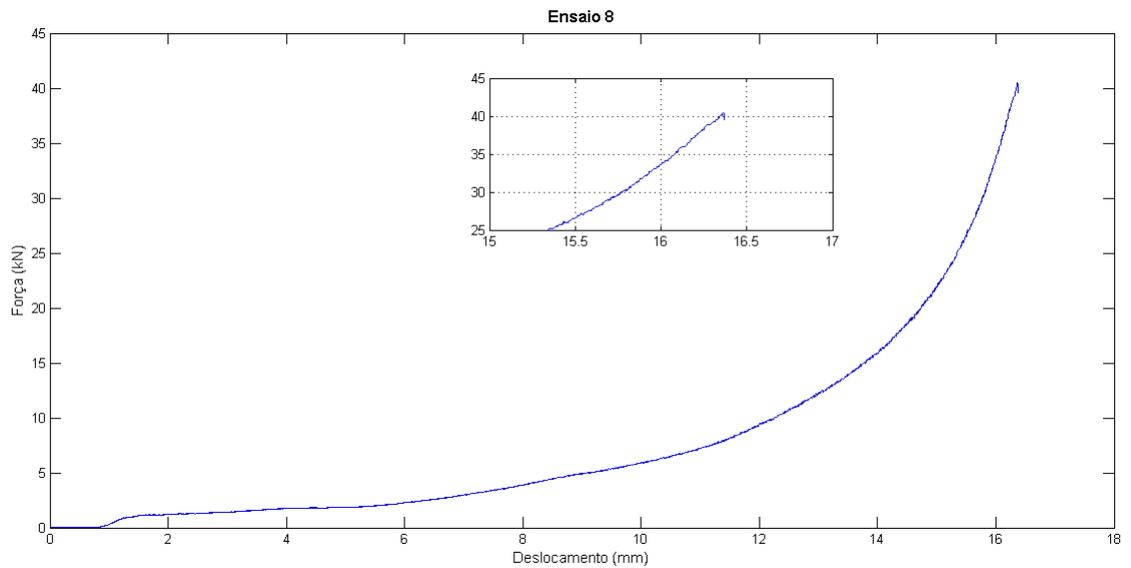


Figura 72: Ensaio compressivo com a cera sólida com análise na ruptura da membrana de revestimento. (Cápsula 4)

As Figuras (73), (74) e (75) a seguir representam os ensaios compressivos individuais das cápsulas contendo a cera no estado líquido em seu interior.

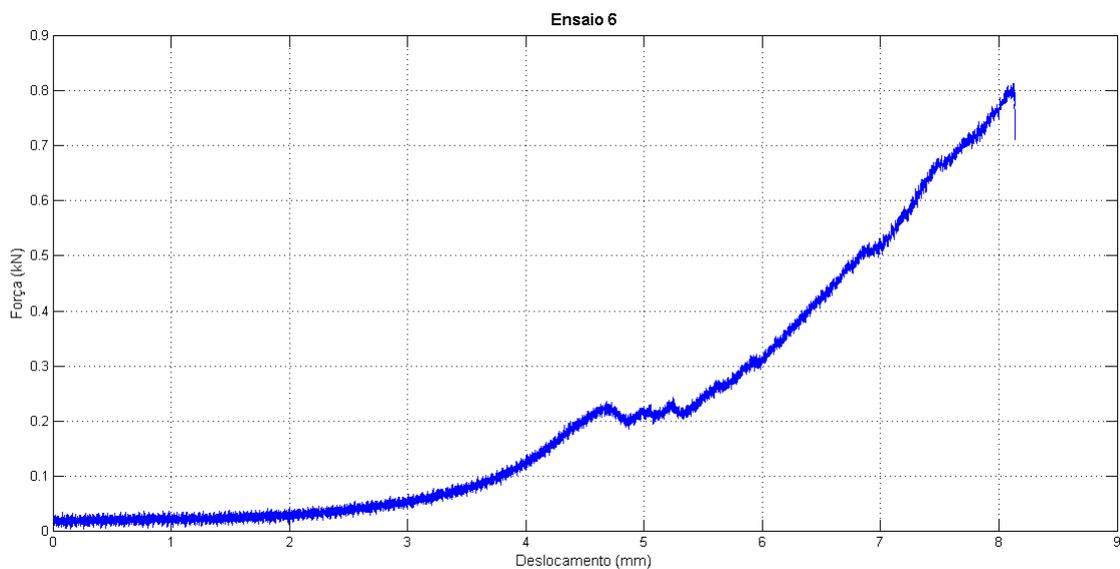


Figura 73: Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 1)

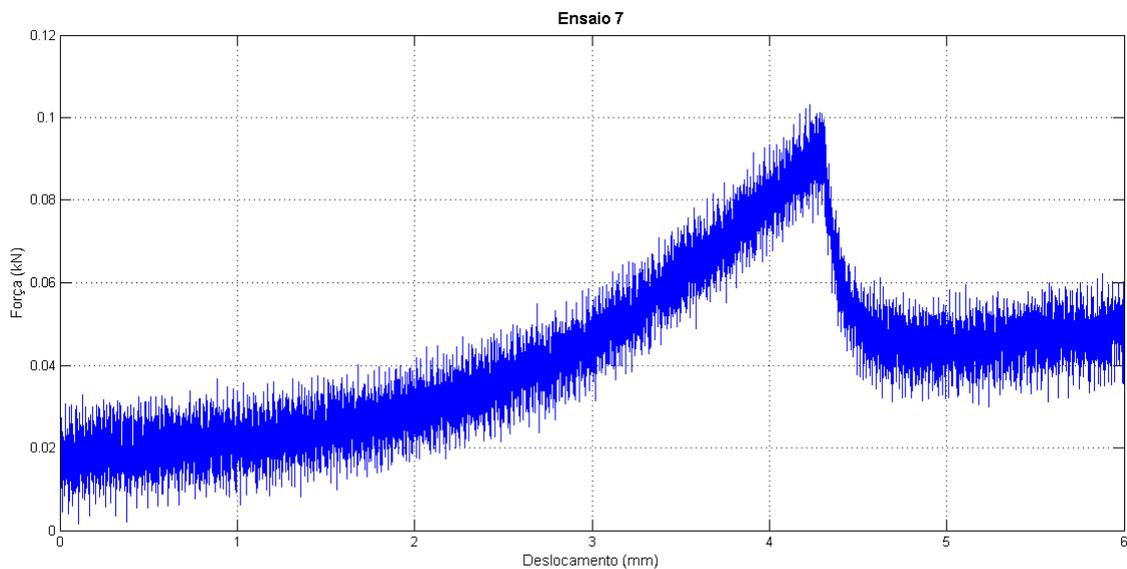


Figura 74: Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 2)

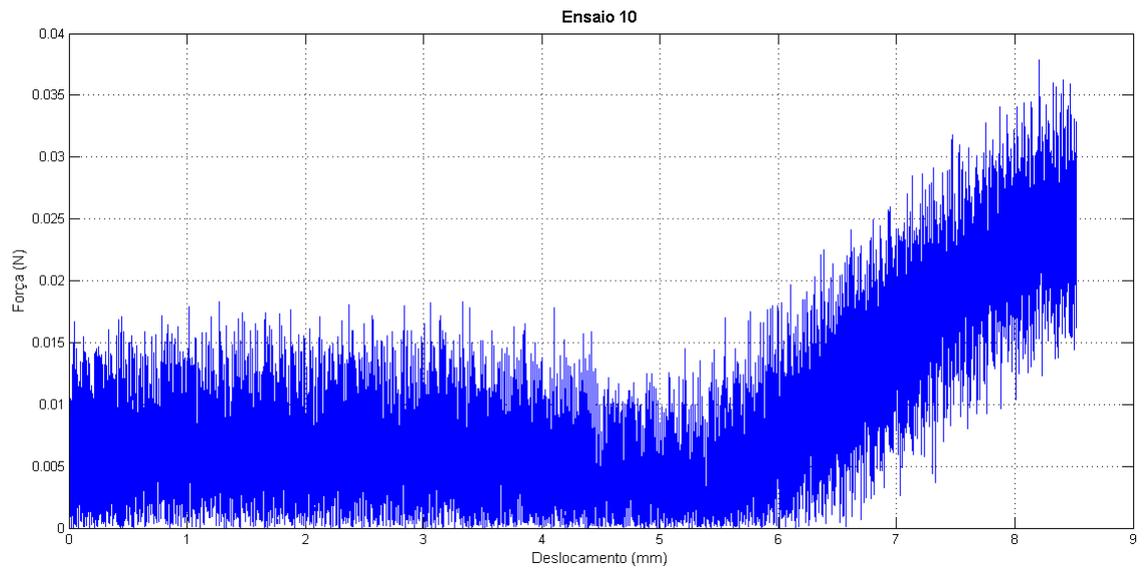


Figura 75: Ensaio compressivo com a cera líquida. (Cápsula 3)

As Figuras (76) e (77) a seguir mostram um comparativo dos ensaios compressivos das cápsulas contendo cera no estado sólido, juntamente com análise de seção para a fratura da cera e ruptura da membrana.

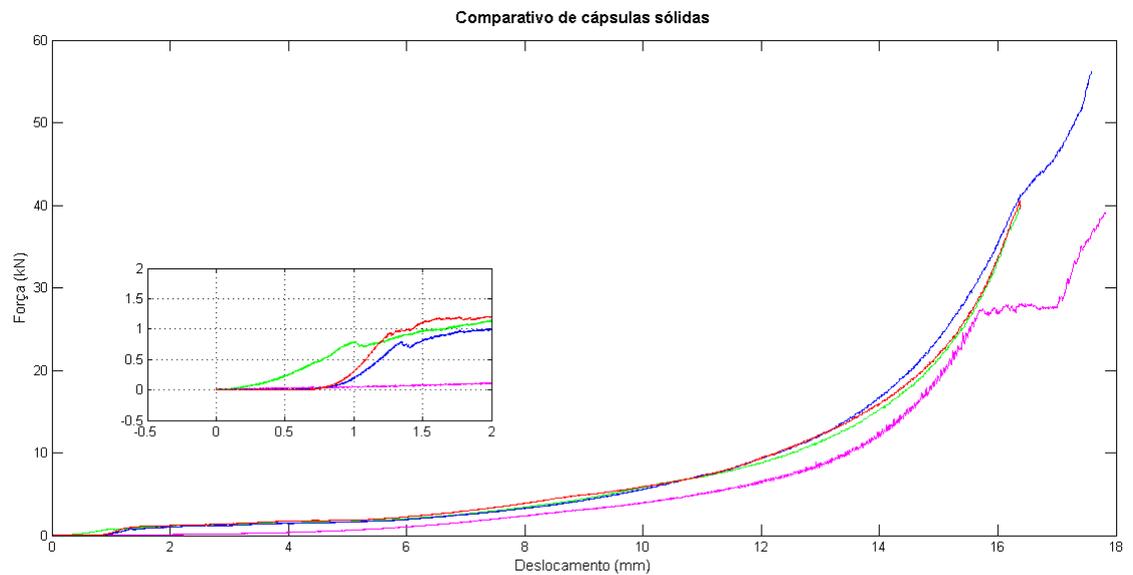


Figura 76: Gráfico comparativo dos ensaios compressivos com cera no estado sólido com análise de seção da fratura da cera.

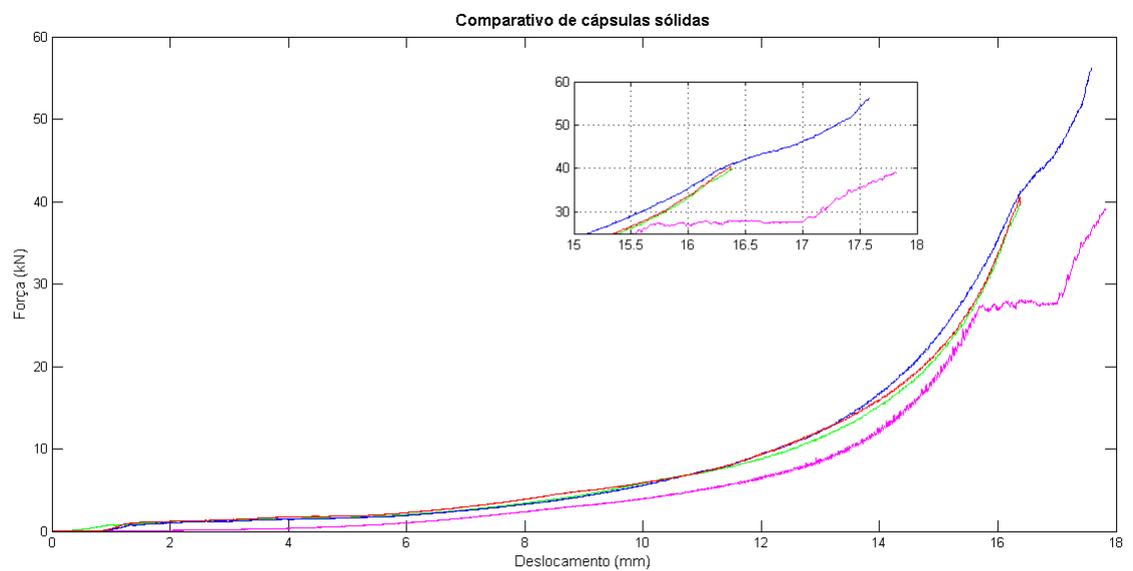


Figura 77: Gráfico comparativo dos ensaios compressivos com cera no estado sólido com análise de seção da ruptura da membrana.

A seguir, a Tabela (22) mostra os valores medidos para as principais cotas geométricas da cápsula para posterior comparação.

Tabela 22: Medições das principais cotas geométricas da cápsula para posterior avaliação da preservação de seu formato.

|                       |               | Medições [mm] |               |                   |  |
|-----------------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|--|
| Dimensões<br>Iniciais | $D_1 = 58$    | $D_2 = 57,84$ | $D_3 = 57,88$ | $\bar{D} = 57,90$ |  |
|                       | $H_1 = 20,45$ | $H_2 = 20,15$ | $H_3 = 20,14$ | $\bar{H} = 20,24$ |  |
|                       | $P_1 = 5,92$  | $P_2 = 6,13$  | $P_3 = 5,96$  | $\bar{P} = 6,01$  |  |
| 1º ciclo              | $D_1 = 56,17$ | $D_2 = 56,00$ | $D_3 = 55,91$ | $\bar{D} = 56,02$ |  |
|                       | $H_1 = 21,83$ | $H_2 = 21,68$ | $H_3 = 21,73$ | $\bar{H} = 21,74$ |  |
|                       | $P_1 = 5,95$  | $P_2 = 6,04$  | $P_3 = 5,67$  | $\bar{P} = 5,88$  |  |
| 2º ciclo              | $D_1 = 55,63$ | $D_2 = 55,65$ | $D_3 = 55,77$ | $\bar{D} = 55,68$ |  |
|                       | $H_1 = 21,97$ | $H_2 = 22,06$ | $H_3 = 22,09$ | $\bar{H} = 22,04$ |  |
|                       | $P_1 = 5,59$  | $P_2 = 5,35$  | $P_3 = 5,31$  | $\bar{P} = 5,41$  |  |
| 3º ciclo              | $D_1 = 55,35$ | $D_2 = 55,21$ | $D_3 = 55,11$ | $\bar{D} = 55,22$ |  |
|                       | $H_1 = 22,34$ | $H_2 = 22,07$ | $H_3 = 22,19$ | $\bar{H} = 22,20$ |  |
|                       | $P_1 = 4,40$  | $P_2 = 4,54$  | $P_3 = 4,67$  | $\bar{P} = 4,53$  |  |
| 4º ciclo              | $D_1 = 55,02$ | $D_2 = 54,88$ | $D_3 = 55,10$ | $\bar{D} = 54,98$ |  |
|                       | $H_1 = 22,22$ | $H_2 = 22,24$ | $H_3 = 22,27$ | $\bar{H} = 22,24$ |  |
|                       | $P_1 = 4,58$  | $P_2 = 4,46$  | $P_3 = 4,27$  | $\bar{P} = 4,43$  |  |
| 5º ciclo              | $D_1 = 54,96$ | $D_2 = 54,80$ | $D_3 = 54,93$ | $\bar{D} = 54,89$ |  |
|                       | $H_1 = 22,30$ | $H_2 = 22,29$ | $H_3 = 22,36$ | $\bar{H} = 22,31$ |  |
|                       | $P_1 = 4,22$  | $P_2 = 4,22$  | $P_3 = 4,13$  | $\bar{P} = 4,19$  |  |

O processo iterativo descrito no capítulo 6, relacionado à realização do experimento, é recomendado tendo em vista as considerações e aproximações feitas para determinar os parâmetros do ensaio. Inicialmente estima-se uma diferença de temperaturas a ser medida entre a entrada e a saída do calorímetro, atribuindo o valor encontrado à Eq.(4.1) que representa o fluxo de calor através do sistema.

$$\dot{m}C_p\Delta T = hA(T(m) - \bar{T}) \quad (10)$$

Seguidamente é feita a estimativa do número adimensional de Nusselt para o escoamento em questão, determinado pela Eq.(4.3) a seguir. De posse do valor de  $Nu$  é possível definir a magnitude do coeficiente  $h$  de troca de calor por convecção.

$$Nu = \frac{hD}{k} \rightarrow h = \frac{kNu}{D} \quad (11)$$

Atribuindo-se o valor de  $h$  encontrado à Eq.(4.5), obtém-se um valor inicial para a vazão mássica a ser imposta no sistema de acordo com a expressão seguinte:

$$\dot{m} = \frac{hA(T(melt) - \bar{T})}{C_p\Delta T} \quad (12)$$

Para os fins do presente projeto, considerou-se o escoamento sobre uma esfera para definição dos parâmetros experimentais. Desta maneira é possível descrever o número de Nusselt como função do número de Reynolds e de Prandtl, como é mostrado na Eq.(13) subsequente encontrada na literatura.

$$Nu = 2 + (0,4Re^{1/2} + 0,06Re^{2/3})Pr^{0,4} \quad (13)$$

Conhecendo a área da seção transversal do canal de alimentação do calorímetro e utilizando o valor determinado para a vazão é factível o cálculo da velocidade do escoamento. As propriedades termodinâmicas da água são conhecidas e tabeladas na literatura, o que viabiliza o cálculo do número de Reynolds. O número de Prandtl depende apenas do comportamento do fluido de escoamento. O novo valor de  $Nu$  calculado pela Eq.(4.3) dá início, portanto, a um processo iterativo entre os valores, que deve ser realizado até que se observe a convergência dos resultados. Obtém-se um valor corrigido para o coeficiente  $h$  de troca de calor por convecção que, quando aplicado novamente na equação do fluxo de calor, resulta em um novo valor de vazão. A nova vazão resulta em uma nova velocidade do escoamento e, por conseguinte, um novo  $Re$  e  $Nu$ , dando prosseguimento ao processo iterativo.

# Anexos



**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 1 de 11

**1. IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA**

**Nome do Produto:** PLASTI FILM.

**Código do produto:**

**Aplicação:** Emborrachamento à frio.

**Fornecedor:** Tapmatic do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

**Endereço:** R. Salesópolis, 16.

**Bairro:** Jd. Califórnia                      **CEP:** 06409 – 150.

**Cidade:** Barueri                              **Estado:** São Paulo.

**Telefone:** (0xx11) 3312-9999.

**Telefone de Emergência:** (0xx11) 4198-4792.

**E-mail:** quimatic@quimatic.com.br.

**Home page:** www.quimatic.com.br.

**2. IDENTIFICAÇÃO DE PERIGOS**

**2.1 Classificação do perigo segundo o GHS (NBR 14725):**

Líquidos inflamáveis: Categoria 3.

Corrosão / Irritação a pele: Categoria 2.

Lesões oculares graves / irritação ocular: Categoria 2B.

Toxicidade para órgãos-alvo específicos. Exposição repetida: Categoria 2.

Perigo por aspiração: Categoria 2.

Perigo ao ambiente aquático. Agudo: Categoria 3.

**2.2 Outros perigos que resultam em classificação:**

O produto não possui outros perigos.

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 2 de 11

**2.3 Elementos de rotulagem e frases de precaução:**

Pictogramas:



Palavra de advertência: Atenção!

Frases de perigo:

H226 – Líquidos e vapores inflamáveis.

H305 – Pode ser nocivo se ingerido e penetrar nas vias respiratórias.

H315 – Provoca irritação à pele.

H320 – Provoca irritação ocular.

H373 – Pode causar danos aos órgãos (aparelho respiratório, aparelho digestivo e sistema nervoso) após exposição prolongada ou repetida, por aspiração.

H402 – Nocivo para os organismos aquáticos.

Frases de precaução:

Prevenção:

P210 – Mantenha afastado de calor / faísca / chama aberta / superfícies quentes. Não fume.

P233 – Mantenha o recipiente hermeticamente fechado.

P240 – Aterre o vaso contendor e o receptor do produto durante transferências.

P241 – Utilize equipamento elétrico / de ventilação / de iluminação, etc. à prova de explosão.

P242 – Utilize apenas ferramentas antifaiscantes.

P243 – Evite o acúmulo de cargas eletrostáticas.

P260 – Não inale a poeira / fumos / gases / névoas / vapores / aerossóis.

P264 – Lave cuidadosamente após o manuseio.

P273 – Evite a liberação para o meio ambiente.

P280 – Use luvas de proteção / roupa de proteção / proteção ocular/proteção facial.

Resposta à emergência:

P301 – Em caso de ingestão: P310 – Contate imediatamente um CENTRO DE INFORMAÇÃO TOXICOLÓGICA ou um médico. P331 – Não provoque vômito.

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ N° 043

Página 3 de 11

P303 – Em caso de contato com a pele (ou o cabelo): P361 – Retire imediatamente toda a roupa contaminada. P353 – Enxágue a pele com água / tome uma ducha. P352 – Lave com água em abundância. P321 – Tratamento específico com cremes hidratantes, se necessário.

P305 – Em caso de contato com os olhos: P351 – Enxague cuidadosamente com água durante vários minutos. P338 – No caso de uso de lentes de contato, remova-as, se for fácil. Continue enxaguando. P337 – Caso a irritação ocular persista: P313 – Consulte um médico.

P314 – Em caso de mal estar consulte um médico.

P370 – Em caso de incêndio: P378 – Para a extinção utilize água na forma de neblina, CO<sub>2</sub>, Espuma p/ Hidrocarbonetos, Pó químico.

**Armazenamento:**

P235 – Mantenha em local fresco.

P403 – Armazene em local bem ventilado.

P405 – Armazene em local fechado a chave.

**Disposição:**

P501 – Descarte o conteúdo / recipiente por incineração, co-processamento, decomposição térmica ou aterro industrial, de acordo com a legislação local. Não reutilizar ou recuperar as embalagens vazias.

**3. COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÕES SOBRE OS INGREDIENTES****Natureza química**

Este produto químico é uma mistura.

**Ingredientes que contribuem para o perigo:**

| Nome químico                                       | N° CAS                    | Concentração % | Classificação |
|--|---------------------------|----------------|---------------|
| Mistura de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos | 246538-79-4 e<br>108-88-3 | > 70 %         | 3             |

**4. MEDIDAS DE PRIMEIROS-SOCORROS**

**Inalação:** Remover a pessoa acidentada da área contaminada, mantendo-a deitada, quieta e aquecida. Manter as vias respiratórias livres; remover dentes postigos (chapas). Administrar respiração artificial e manobras de ressuscitação, se a pessoa estiver inconsciente, asfíxiada e/ou se tiver sofrido parada cardíaca. Chamar/encaminhar imediatamente ao médico.

## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 4 de 11

**Contato com a pele:** Remover roupas e sapatos contaminados. Não apalpar nem friccionar partes atingidas. Lavar com água e sabão neutro. Não usar solventes ou diluentes. Aplicar cremes hidratantes se a pele ficar muito ressecada. Chamar/encaminhar ao médico, no caso de persistir irritação, dermatite ou queimadura.

**Contato com os olhos:** Não friccionar. Remover lentes de contato. Lavar imediatamente com água corrente por 15 minutos (mínimo) mantendo os olhos abertos. Encaminhar ao oftalmologista.

**Ingestão:** Não provocar vômito. Dar água para diluir efeito tóxico. Não fornecer líquido ou induzir ao vômito se a pessoa estiver inconsciente ou em convulsão. Chamar/encaminhar ao médico.

**Ações que devem ser evitadas:** Não induzir vômito. Não oferecer nada por via oral se a pessoa estiver inconsciente.

**Proteção para os prestadores de primeiros socorros:** Desligar fontes de ignição e afastar fontes de calor ou chama. Usar equipamento de proteção individual. Evitar contato com o produto ao socorrer a pessoa acidentada. Manter a pessoa acidentada em repouso e aquecida. O tratamento sintomático compreende medidas de suporte como correção de distúrbios hidroeletrólíticos, metabólicos e assistência respiratória.

**Sintomas e efeitos mais importantes, agudos ou tardios:** Vermelhidão nos olhos, pele e mucosas. Tontura, sonolência, dores de cabeça, irritabilidade em caso de exposição prolongada.

**Notas para o médico:** Tratamento sintomático. Remover roupas contaminadas. Realizar lavagem gástrica de forma cautelosa evitando a aspiração do produto para as vias aéreas. O óleo mineral é contra indicado, pois aumenta a absorção de hidrocarbonetos.

### 5. **MEDIDAS DE COMBATE A INCÊNDIO**

**Meios de extinção:** Água na forma de neblina, CO<sub>2</sub>, Espuma p/ Hidrocarbonetos, Pó químico.

**Meios de extinção não apropriados:** Água em jato pleno.

**Perigos específicos:** Produto inflamável. No incêndio pode produzir vapores e fumos tóxicos, como monóxido de carbono. Os recipientes podem explodir quando aquecidos.

## Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ N° 043

Página 5 de 11

**Métodos específicos:** Evacuar a área e combater o fogo a uma distância segura. Utilizar diques para conter a água usada no combate. Posicionar-se de costas para o vento. Para resfriar equipamentos nas proximidades do fogo usar água em forma de neblina.

**Medidas de proteção da equipe de combate ao fogo:** Utilizar equipamentos autônomos para respiração (máscara com cilindro de oxigênio) e roupas de aproximação/proteção para temperaturas elevadas.

### 6. **MEDIDAS DE CONTROLE PARA DERRAMAMENTO OU VAZAMENTO**

**Precauções pessoais, equipamento de proteção e procedimento de emergência:** Vestir equipamentos de proteção pessoal (luvas e roupas impermeáveis de pvc ou borracha, óculos, máscara contra vapores orgânicos). Colocar as pessoas em segurança. Evitar contato com os olhos e pele. Evitar a inalação de névoas/vapores. Evitar o contato direto com o produto. Reduzir vapores usando água em spray. Eliminar fontes quentes e de ignição.

**Prevenção da inalação e do contato com a pele, mucosa e olhos:** Manter as pessoas afastadas, isolando a área e impedindo a entrada. Eliminar ou remover fontes de ignição. Evitar faíscas e eletricidade eletrostática. Usar luvas, botas de borracha e óculos de proteção. Máscaras com filtros para vapores orgânicos ou máscara autônoma, em caso de vazamento ou incêndio.

**Precauções ao meio ambiente:** Evitar que o produto derramado entre na rede de esgoto, rios, lagos e qualquer outro corpo de água ou manancial. Se houver vazamento e contaminação de água superficial contatar o órgão ambiental.

**Métodos e materiais para a contenção e limpeza:** Desligar motores e fontes quentes ou de ignição. Estancar o vazamento se isto puder ser feito sem risco; isolar a área e recolher o produto derramado. O produto é escorregadio. Absorver com areia ou material inerte, posteriormente coletar com uma pá. Acondicionar em recipientes limpos e adequados para posterior descarte (incineração ou aterramento de acordo com regulamentação). Não dispor em lixo comum.

### 7. **MANUSEIO E ARMAZENAMENTO**

**Precauções para manuseio seguro:** Manusear de acordo com as normas de segurança estabelecidas. Utilizar EPIs indicados no item 8. Manusear em local fresco e arejado. Não reutilizar a embalagem. Manter as embalagens bem

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 6 de 11

fechadas. Não fumar, comer ou beber na área de manuseio de embalagens. Evitar quedas das embalagens. Evitar furos e desaparecimento do rótulo do produto.

**Prevenção da exposição:** Usar óculos de proteção, luvas e roupas de borracha ou pvc.

**Prevenção de incêndio e explosão:** Eliminar fontes quentes e de ignição. Todos os equipamentos elétricos usados devem ser blindados e a prova de explosão. As instalações e os equipamentos devem ser aterrados para evitar a eletricidade estática. Não fumar.

**Condições de armazenamento seguro, incluindo qualquer incompatibilidade:**

**Medidas técnicas apropriadas:** Local ventilado. Não armazenar junto de alimentos.

**Condições de armazenamento:**

**Adequadas:** Armazenar em local coberto, fresco, seco e ventilado, com piso impermeável.

**A evitar:** Exposição ao sol, chuva, próximo a fontes de ignição e temperaturas elevadas (acima de 50 °C). Não armazenar próximo ou junto de alimentos.

**Produtos incompatíveis:** Incompatível com agentes oxidantes fortes (cloratos, peróxidos, ácidos fortes, etc.).

**Materiais para embalagens:**

**Recomendados:** A própria embalagem ou embalagem metálica fechada.

**Não recomendados:** Embalagem plástica ou metálica de tampa removível.

**8. CONTROLE DE EXPOSIÇÃO E PROTEÇÃO INDIVIDUAL**

**Parâmetros de controle:**

**Limites de exposição ocupacional:** Não são especificados pela legislação brasileira os limites do produto final. Recomenda-se que sejam observados os limites de tolerância dos ingredientes perigosos: Solventes aromáticos = 377 mg/m<sup>3</sup>.

**Indicadores biológicos:** N. D.

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 7 de 11

**Medidas de controle de engenharia:** Utilizar ventilação/ exaustão adequada nos locais de trabalho. Manter a concentração da mistura abaixo dos limites de exposição ocupacional.

**Medidas de proteção pessoal:**

**Proteção respiratória:** Não é necessária se o produto for manuseado corretamente, nas condições normais de temperatura; em caso de incêndio utilizar máscara com filtro para vapores orgânicos ácidos.

**Proteção para as mãos:** Luvas impermeáveis.

**Proteção para os olhos:** Utilizar óculos de proteção contra produtos químicos.

**Proteção para a pele e corpo:** Avental impermeável.

**Medidas de higiene:** Evitar contato com a pele. Retirar imediatamente roupas molhadas e salpicadas. Utilizar ventilação adequada. Não comer, beber, ou guardar alimentos no local de trabalho. Higienizar a pele com creme suave após manuseio com o produto.

**9. PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS**

**Estado físico:** Líquido viscoso.

**Odor:** Característico.

**Cor:** Branco, Incolor, Preto, Azul ou Vermelho.

**pH (concentrado temp. 25°C):** N. A.

**Temperaturas específicas ou faixas de temperatura nas quais ocorrem mudanças de estado físico:**

**Ponto de ebulição:** N. D.

**Ponto de congelamento:** N. D.

**Temperatura de decomposição:** N. D

**Ponto de fulgor:** 5 °C (vaso fechado).

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 8 de 11

**Limites de explosividade:** N. D.

**LEI:** 1,2 %.

**LES:** 7,0 %.

**Densidade:** 0,83 - 0,95 g/cm<sup>3</sup> a 25 °C.

**Solubilidade:** Insolúvel em água. Solúvel em solventes orgânicos.

**Coefficiente de partição n-octanol/água:** N. D.

**Viscosidade:** Copo Ford 4 a 25°C - 50 - 180 segundos

## **10. ESTABILIDADE E REATIVIDADE**

**Reatividade:** Produto não reage de forma violenta ou perigosa nas condições normais de utilização, manuseio e armazenamento.

**Estabilidade química:** Produto estável quando armazenado e manuseado adequadamente.

**Possibilidade de reações perigosas:** Manter afastado de agentes oxidantes e redutores fortes (peróxidos, cloratos, permanganatos, cromatos, etc.).

**Condições a serem evitadas:** Evitar contato com fontes de calor, chamas ou de ignição e com agentes oxidantes ou redutores fortes.

**Materiais incompatíveis:** agentes oxidantes ou redutores fortes.

**Produtos perigosos de decomposição:** Em caso de incêndio pode desprender gases e vapores tóxicos como monóxido de carbono.

## **11. INFORMAÇÕES TOXICOLÓGICAS**

**Toxicidade aguda:** O produto não foi testado. A afirmação foi derivada das propriedades dos componentes individuais. Solventes: DL50 - Oral rato = 5.000 mg/Kg.

**Inalação:** pode provocar asfixia e desmaio na pessoa, podendo levar até a morte, caso ela esteja em local confinado e sem ventilação. A inalação prolongada pode

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**

Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 9 de 11

causar confusão mental e distúrbios psíquicos. Pode prejudicar também o fígado e os pulmões.

**Contato com a pele:** O contato prolongado pode causar irritações, dermatites e até queimaduras.

**Contato com os olhos:** Pode causar irritações e queimaduras.

**Ingestão:** Pode causar irritação no trato digestivo, queimadura e intoxicação.

**Efeitos locais:** N. D.

**12. INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS**

Ar: Vapores dos solventes reduzem a concentração do oxigênio no ar tornando o ambiente asfixiante e extremamente tóxico. Água: O produto, em estado líquido, e a água resultante do combate ao fogo e de diluição são prejudiciais à flora e à fauna. Parte dos solventes do produto derramado na água evaporará e parte será biodegradado. Altas concentrações inibem a biodegradação. A velocidade de biodegradação depende das condições climáticas, diluição e dos microorganismos presentes. Os solventes e o produto não é absorvido no sedimento nem bioconcentrado em organismos aquáticos. Solo: O produto derramado ao solo, poderá seu solventes, em parte ser evaporado, em parte ser degradado biologicamente e em parte ser lixiviado e percolar contaminando o lençol freático limitando desta forma seu uso.

**13. CONSIDERAÇÕES SOBRE DESTINAÇÃO FINAL**

**Resíduos do produto:** Incinerado, co-processamento, decomposição térmica ou aterro industrial, de acordo com a legislação local.

**Embalagens contaminadas:** Não reutilizar ou recuperar as embalagens vazias. As embalagens devem ser eliminadas adequadamente.

**14. INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTE**

**Transporte rodoviário no Brasil (ANTT):**

**Nome apropriado para embarque:** Líquido inflamável, N. E.

**Número ONU:** 1993.

**Classe de risco / divisão:** 3.

**Risco subsidiário:** N. D.

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ Nº 043

Página 10 de 11

**Número de risco:** 30.**Transporte rodoviário no Mercosul:****Nome apropriado para embarque:** Líquido inflamável, N. E.**Número ONU:** 1993.**Classe de risco / divisão:** 3.**Risco subsidiário:** N. D.**Número de risco:** 30.**Transporte aéreo Doméstico e Internacional (ANAC & ICAO-TI & IATA-DGR):****Proper Shipping Name:** Flammable liquid, N. O. S.**UN Number:** 1993.**Hazard Class / Division:** 3.**Packing Group:** II.**Comment:****Subsidiary Risk:****IATA Packaging Instruction:** Passenger aircraft 305, Y305; Cargo aircraft 307.**Transporte marítimo Nacional e Internacional – (ANTAQ-DPC & IMDG):****Proper Shipping Name:** Flammable liquid, N. O. S.**UN Number:** 1993.**Hazard Class/Division:** 3.**Packing Group:** N. D.**15. INFORMAÇÕES SOBRE REGULAMENTAÇÕES**

Nenhuma outra regulamentação específica.

**16. OUTRAS INFORMAÇÕES**

Nos locais onde se manipulam produtos químicos deverá ser realizado monitoramento da exposição dos trabalhadores, conforme PPRA (Programa de Prevenção de Riscos Ambientais) da NR-9. Funcionários que manipulam produtos químicos, em geral, devem ser monitorados biologicamente conforme o PCMSO (Programa de Controle Médico de Saúde Ocupacional) da NR-7.

**SIGLAS UTILIZADAS:**

|       |   |                                  |
|-------|---|----------------------------------|
| N. A. | = | Não Aplicável                    |
| N. D. | = | Não Disponível                   |
| LEI   | = | Limite de Explosividade Inferior |

**Ficha de Informações de Segurança  
de Produto Químico**Nome do produto: PLASTI FILM  
Código do produto:

FISPQ N° 043

Página 11 de 11

|  |
|--|
| LES = Limite de Explosividade Superior |
|--|

Os dados contidos no presente documento, nos catálogos e rótulos do produto, baseiam-se em fontes que, acreditamos, sejam corretas e confiáveis. Constitui total responsabilidade do usuário a determinação da aplicação correta de qualquer produto mencionado no presente documento, adotando as devidas e aconselháveis precauções para proteger bens e pessoas contra quaisquer danos, que possam derivar de tal manipulação e uso. Recomendamos ao usuário em potencial testar a aplicação desejada, antes do uso definitivo do produto. Observar atentamente a destinação e forma de uso do produto, só utilizando-o de acordo com as instruções impressas no rótulo. Não podemos assumir qualquer responsabilidade por dano conseqüente ou imprevisto, inclusive lucros cessantes, resultado do uso inadequado por terceiros, sobre cujos métodos de aplicação ou manuseio não temos controle. Em caso de dúvida, solicitar orientação técnica. Limitamos nossa responsabilidade unicamente à troca do produto, caso fique comprovado que o mesmo esteja defeituoso.