

**ESTUDO SOBRE A INCORPORAÇÃO DE PCM'S  
EM SISTEMAS TÉRMICOS PASSIVOS**

**Rafael Ramalho Gonçalves**

Licenciado em Engenharia Civil pelo Instituto Politécnico de Bragança

Dissertação submetida para obtenção do grau de Mestre em

**Engenharia da Construção**

**Escola Superior de Tecnologia e de Gestão do**

**Instituto Politécnico de Bragança**

Este trabalho foi efetuado sob orientação de:

**Manuel Joaquim da Costa Minhoto**

Bragança, dezembro de 2015

## **Agradecimentos**

Todo este trabalho não seria possível sem o apoio de todas as pessoas que acompanharam a realização desta tese, a todas estas pessoas gostaria de manifestar o meu sincero agradecimento. De forma mais direta gostava de agradecer:

Ao meu orientador Professor Doutor Manuel Joaquim da Costa Minhoto, por todo o acompanhamento que me proporcionou ao longo deste trabalho.

Às Professora Doutora Débora Macanjo Ferreira e Professora Doutora Eduarda Cristina Pires Luso, pelo apoio, motivação e cooperação na realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Rolando Dias pela colaboração neste trabalho.

Ao Engenheiro Paulo Tristão pela sua ajuda na elaboração deste trabalho.

Aos técnicos de laboratórios João Augusto Pires, Octávio Manuel do Nascimento Pereira, Vítor Manuel Pereira Gomes e Hermínia Maria Mesquita Morais, que com uma grande vontade me apoiaram em todas as tarefas que lhes competiam e muitas mais.

À direção da ESTIG – IPB, pela possibilidade de realizar este trabalho disponibilizando tanto bens monetários, como equipamentos e instalações desta instituição.

Gostava de agradecimento á minha família que esteve sempre por trás de mim a apoiar e incentivar para chegar a este ponto. Um especial agradecimento a minha namorada que me apoiou em todas as fases deste trabalho e que me ajudou a atravessar todas as dificuldades.

Por fim gostava de agradecer a todos os amigos que me acompanharam, não só durante a realização deste trabalho mas também durante todo este ciclo de estudo.

## **Resumo**

O consumo energético constitui um dos principais responsáveis pela absorção dos recursos económicos das famílias e do país. Um dos caminhos para reduzir esse consumo e aumentar a eficiência energética pode basear-se na utilização de novos materiais de construção, tais como os materiais de mudança de fase (PCM - Phase Change Materials).

O trabalho que se apresenta, consistiu num estudo orientado para a avaliação do comportamento de materiais termo-ativos de mudança de fase (PCM), quando usados numa perspetiva de eficiência energética. Pretende-se demonstrar as vantagens e desvantagens na introdução deste material em argamassas constituintes de paredes de trombe e em reservatórios de água (termoacumuladores), perspetivando a melhoria do conforto térmico e redução de consumos nas construções de habitação. O trabalho privilegiou a abordagem experimental, com a criação de modelos físicos à escala reduzida que permitiram simular o comportamento térmico dos elementos construtivos em estudo.

Para o estudo experimental dos referidos modelos, quer do comportamento de argamassas em paredes de trombe, quer os modelos representativos do comportamento de reservatórios termoacumuladores, foram desenvolvidas formas de registar o comportamento térmico destes modelos, como resultado da aplicação de carregamentos térmicos, seja por via artificial seja por via da exposição atmosférica

Os materiais de mudança de fase (PCM's) adotados no estudo resultam de trabalhos de investigação desenvolvidos na Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTIG), do Instituto Politécnico de Bragança (IPB), e que são o Octadecano e a Parafina. O seu comportamento difere ao nível dos pontos de fusão, o que faz com que possam ser aplicados em diferentes situações.

Conclui-se com este trabalho que a incorporação de PCM's em argamassas aplicadas ao sistema construtivo - parede de trombe, pode trazer vantagens a nível de conforto térmico, maior eficiência e sustentabilidade aos edifícios. Quanto aos reservatórios termoacumuladores, verifica-se que a aplicação do PCM – Parafina do modo como foi aplicado não trás vantagens a nível energético.

**Palavras-chave:** PCM, eficiência energética, comportamento térmico, paredes de trombe, reservatórios (termoacumuladores) e aquisição de dados.

## **Abstract**

The energy consumption is a major contributor to the absorption of the economic resources of families and countries. One way to reduce the consumption is by increasing energy efficiency, which can be archived with the use of new building materials, such as Phase Change Materials (PCM's).

The following work, consist in a study to evaluate the behaviour of thermo-active material (PCM), when used in an energy efficiency perspective. It is intended to demonstrate the advantages and disadvantages in the introduction of this material into the mortar of Trombe wall and into water tanks (water heaters), with the expectation of improving thermal comfort and reduce consumption in residential buildings. This work adopts the experimental approach, with the creation of physical models at reduced scale that simulated the thermal performance of building elements under study.

For the experimental study of these models, either for mortars behaviour in Trombe wall, or the storage heaters reservoirs, there are have been developed a way to record the thermal behaviour of these models, as a result of application of thermal loads, by artificial means or via atmospheric exposure.

The phase change materials adopted in the study are the result of another research conducted in the Superior School of Technology and Management (ESTIG), the Polytechnic Institute of Bragança (IPB), which are the “Octadecano” and “Parafina”. The behaviour differs in the melting point, so it can be applied in different situations.

With this work we conclude that the incorporation of PCM's in mortars and applied to the building system Trombe wall, can bring benefits in terms of thermal comfort, improved efficiency and sustainability in buildings. As for the water heaters reservoir, it is apparent that the application of PCM Parafina, the way it was applied in this work, didn't show advantages in energy level.

**Keywords:** PCM, energy efficiency, Thermal performance, *Trombe* wall, Tanks (water heaters) and Data acquisition.

## Índice

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>                           | <b>13</b> |
| 1.1 – Enquadramento .....                                      | 13        |
| 1.2 – Objetivos.....   | 14        |
| 1.3 – Organização do trabalho .....                            | 15        |
| <b>Capítulo 2 – Aplicação de PCM's na construção .....</b>     | <b>16</b> |
| 2.1 – Definições.....  | 17        |
| 2.2 – Formas de incorporação de PCM .....                      | 20        |
| 2.2.1 – Encapsulamento de PCM's .....                          | 20        |
| 2.2.1.1 – Macroencapsulamento .....                            | 20        |
| 2.2.1.2 – Microencapsulamento .....                            | 21        |
| 2.3 – Aplicações práticas .....                                | 22        |
| 2.3 – Parede de trombe .....                                   | 25        |
| 2.4 – Particularização para o estudo desenvolvido.....         | 27        |
| <b>Capítulo 3 – Estudo experimental.....</b>                   | <b>28</b> |
| 3.1 – Descrição dos elementos de ensaio .....                  | 28        |
| 3.1.1 – Sistema de aquisição de dados.....                     | 29        |
| 3.1.1.1 – Unidades de aquisição e armazenamento de dados ..... | 29        |
| 3.1.1.2 – Termopares .....                                     | 30        |
| 3.1.1.3 – Sensores .....                                       | 31        |
| 3.1.2 – Argamassas .....                                       | 31        |
| 3.1.2.1 – Provetes cúbicos.....                                | 32        |
| 3.1.2.2 – Modelos de teste .....                               | 33        |
| 3.1.3 – Reservatórios (Termoacumuladores).....                 | 36        |
| 3.1.3.1 - Termopares .....                                     | 37        |
| 3.1.3.2 - Reservatórios .....                                  | 37        |
| 3.1.3.3 - Cápsulas.....  | 38        |
| 3.1.3.4 - Aquecimento.....                                     | 39        |
| 3.2 – Ensaio de calibração.....                                | 40        |
| 3.2.1 – Provetes cúbicos .....                                 | 40        |
| 3.2.1.1 – Provetes com octadecano .....                        | 41        |
| 3.2.1.2 – Provetes com parafina.....                           | 47        |
| 3.2.2 – Modelos de teste .....                                 | 48        |
| 3.2.3 – Reservatórios (Termoacumuladores).....                 | 55        |
| 3.3 – Ensaio finais.....                                       | 81        |

|  |            |
|--|------------|
| 3.3.1 – Provetes cúbicos .....                           | 82         |
| 3.3.1.1 – Provetes com octadecano .....                  | 82         |
| 3.3.1.2 – Provetes com parafina .....                    | 83         |
| 3.3.2 – Modelos de teste .....                           | 83         |
| 3.3.3 – Reservatórios (Termoacumuladores) .....          | 85         |
| <b>Capítulo 4 – Análise de resultados .....</b>          | <b>87</b>  |
| 4.1 – Provetes cúbicos .....                             | 87         |
| 4.1.1 – Provetes com octadecano .....                    | 87         |
| 4.1.2 – Provetes com parafina .....                      | 90         |
| 4.2 – Modelos de teste .....                             | 91         |
| 4.3 – Reservatórios (Termoacumuladores) .....            | 94         |
| <b>Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros .....</b> | <b>98</b>  |
| <b>5.1 – Conclusões gerais .....</b>                     | <b>98</b>  |
| <b>5.2 – Trabalhos futuros .....</b>                     | <b>99</b>  |
| <b>Referências bibliográficas .....</b>                  | <b>100</b> |

## Índice de figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Esquema explicativo do funcionamento dos PCM [4] -----     | 18 |
| Figura 2 - Fase absorção e libertação de energia calorífica -----     | 19 |
| Figura 3 – Macrocápsulas PCM em folha de plástico [6] -----           | 21 |
| Figura 4 - Macrocápsulas Esférica de polímero [3] -----               | 21 |
| Figura 5 – Macrocápsulas de alumínio [7] -----                        | 21 |
| Figura 6 - Macrocápsulas de alumínio [7]-----                         | 21 |
| Figura 7 – Aspeto de PCM Microencapsulados [3] -----                  | 22 |
| Figura 8 - Esquema do Microencapsulamento -----                       | 22 |
| Figura 9 - Vista das microcápsulas amplificadas [8]-----              | 22 |
| Figura 10 – Painéis de argamassa com PCM [8] -----                    | 23 |
| Figura 11 - Blocos de alvenaria com PCM [8] -----                     | 23 |
| Figura 12 - Rolo de biopcm [6] -----                                  | 24 |
| Figura 13 – Aplicação da manta num teto falso na horizontal [6] ----- | 24 |
| Figura 14 - Aplicação da manta na vertical [6] -----                  | 24 |
| Figura 15 - Esquema do sistema de Reservatório -----                  | 25 |
| Figura16 - Macrocápsulas aplicadas em reservatórios [9] -----         | 25 |
| Figura 17 - Parede de trombe ventilada [10] -----                     | 26 |
| Figura 18 - Parede de trombe não ventilada [10]-----                  | 26 |
| Figura 19 - Datataker dt50-----                                       | 30 |
| Figura 20 - Datataker dt50, com ligações -----                        | 30 |
| Figura 21 - Datataker dt515 -----                                     | 30 |
| Figura 22 - Datataker dt515, com ligações-----                        | 30 |
| Figura 23 – Termopares do tipo I (T1)-----                            | 31 |
| Figura 24 – Termopares do tipo II (T2)-----                           | 31 |
| Figura 25 – Sensor de temperatura -----                               | 31 |
| Figura 26 - Piranómetro -----   | 31 |
| Figura 27 - Provetes com PCM-octadecano-----                          | 32 |
| Figura 28 - Provetes com PCM-parafina -----                           | 32 |
| Figura 29 - Posicionamento dos termopares -----                       | 33 |
| Figura 30 - Termopar – face-----                                      | 33 |
| Figura 31 - Termopar - ar interior -----                              | 33 |
| Figura 32 – Posicionamento dos termopares-----                        | 35 |
| Figura 33 – Termopar - Superficial caixa-de-ar -----                  | 35 |
| Figura 34 – Termopar - Superficial interior-----                      | 35 |
| Figura 35 – Posicionamento dos 3 termopares -----                     | 35 |
| Figura 36 – Estação meteorológica da ESA-----                         | 36 |
| Figura 37 – Estação meteorológica da ESTIG-----                       | 36 |
| Figura 38 – Termopares T1 -----                                       | 37 |
| Figura 39 – Termopares T2 -----                                       | 37 |
| Figura 40 – Reservatório R1 -----                                     | 38 |
| Figura 41 – Reservatório R2 -----                                     | 38 |
| Figura 42 – Reservatório R3 -----                                     | 38 |
| Figura 43 – Reservatório R4 -----                                     | 38 |
| Figura 44 – Reservatório R5 -----                                     | 38 |
| Figura 45 – Capsula C1 -----  | 39 |
| Figura 46 – Capsula C2-----   | 39 |
| Figura 47 – Capsula C3 -----  | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 48 – Aquecimento A1 -----  | 40 |
| Figura 49 – Aquecimento A2 -----  | 40 |
| Figura 50 – Provetes Cúbicos -----  | 41 |
| Figura 51 – Representação em zoom do 1º ensaio -----                              | 42 |
| Figura 52 – 2º ensaio -----   | 42 |
| Figura 53 – Posicionamento 2º ensaio -----  | 42 |
| Figura 54 - Representação do 2º ensaio-----                                       | 43 |
| Figura 55 – Posicionamento 3º ensaio -----  | 43 |
| Figura 56 – 4º ensaio -----   | 43 |
| Figura 57 – Posicionamento 4º ensaio -----  | 43 |
| Figura 58 - Representação do 4ºensaio -----                                       | 44 |
| Figura 59 – colocação dos provetes -----  | 44 |
| Figura 60 – Posicionamento das caixas-----  | 44 |
| Figura 61 - Representação ampliada do 5º ensaio-----                              | 45 |
| Figura 62 - Aquecimento dos Provetes -----  | 46 |
| Figura 63 – Posicionamento no 6º ensaio -----                                     | 46 |
| Figura 64 - Representação das temperaturas interiores no 6ºensaio -----           | 46 |
| Figura 65 - Representação da temperatura na face do 6ºensaio -----                | 47 |
| Figura 66 – 9º ensaio -----   | 47 |
| Figura 67 – Posicionamento 9º ensaio -----  | 47 |
| Figura 68 - Representação das temperaturas no 9ºensaio -----                      | 48 |
| Figura 69 - Representação do aquecimento no 10ºensaio-----                        | 48 |
| Figura 70 – 1º ensaio -----   | 49 |
| Figura 71 – Posicionamento 1º ensaio -----  | 49 |
| Figura 72 – Esquema do Posicionamento 1ºensaio -----                              | 49 |
| Figura 73 – Esquema de ligação 1ºensaio -----                                     | 49 |
| Figura 74 – Representação da temperatura interior do 1º ensaio-----               | 50 |
| Figura 75 – 2º teste -----  | 50 |
| Figura 76 – Posicionamento 2º teste -----   | 50 |
| Figura 77 – Esquema do Posicionamento 2ºensaio -----                              | 51 |
| Figura 78 – Esquema de ligação 2ºensaio -----                                     | 51 |
| Figura 79 - Representação da temperatura interior no 2ºensaio -----               | 51 |
| Figura 80 - Representação da temperatura interior do modelo 6, no 2º ensaio ----- | 52 |
| Figura 81 – 3º ensaio -----   | 52 |
| Figura 82 - Esquema do Posicionamento 3ºensaio-----                               | 52 |
| Figura 83 - Esquema de ligação 3ºensaio-----                                      | 52 |
| Figura 84 - Representação das temperaturas interiores no 3ºensaio -----           | 53 |
| Figura 85 – 4º ensaio -----   | 53 |
| Figura 86 – Caixa de aquisição de dados no 4ºensaio -----                         | 53 |
| Figura 87 - Esquema do Posicionamento 4ºensaio-----                               | 53 |
| Figura 88 – Caixa de aquisição de dados no 4ºensaio -----                         | 53 |
| Figura 89 - Representação da temperatura interior no 4ºensaio -----               | 54 |
| Figura 90 – 5º ensaio -----   | 54 |
| Figura 91 – Posicionamento no 5ºensaio -----                                      | 54 |
| Figura 92 – Esquema do Posicionamento -----                                       | 55 |
| Figura 93 - Esquema de ligação -----  | 55 |
| Figura 94 - Representação da temperatura interior no 5ºensaio -----               | 55 |
| Figura 95 – 1º ensaio aquecimento-----  | 57 |
| Figura 96 – 1º ensaio arrefecimento-----  | 57 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 97 - Representação da temperatura interior para o 1ºensaio-----                              | 57 |
| Figura 98 – Cápsula no 2º ensaio-----   | 58 |
| Figura 99 – 2º ensaio-----  | 58 |
| Figura 100 - Representação das temperaturas interiores para o 2ºensaio -----                        | 58 |
| Figura 101 – 3º ensaio -----  | 59 |
| Figura 102 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 3ºensaio             | 59 |
| Figura 103 – 4º ensaio aquecimento -----  | 60 |
| Figura 104 - 4º ensaio-----   | 60 |
| Figura 105 – Capsula no 4ºensaio -----  | 60 |
| Figura 106 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior para 4ºensaio --        | 60 |
| Figura 107 – Aspeto da banha -----  | 61 |
| Figura 108 – 5º ensaio -----  | 61 |
| Figura 109 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior do 5ºensaio             | 61 |
| Figura 110 – 6º ensaio -----  | 62 |
| Figura 111 – Despejo da água-----   | 62 |
| Figura 112 - Representação da temperatura interior no 6ºensaio-----                                 | 62 |
| Figura 113 – Posicionamento no 7º ensaio-----   | 62 |
| Figura 114 – 7º ensaio -----  | 62 |
| Figura 115 - Representação da temperatura interior no 7ºensaio-----                                 | 63 |
| Figura 116 – Posicionamento no 8º ensaio-----   | 63 |
| Figura 117 – 8º ensaio -----  | 63 |
| Figura 118 - Representação da temperatura interior no 8ºensaio-----                                 | 64 |
| Figura 119 - Representação da temperatura interior no 9ºensaio-----                                 | 64 |
| Figura 120 – Representação da temperatura interior do 10º ensaio-----                               | 65 |
| Figura 121 – Posição desfavorável-----  | 65 |
| Figura 122 – Posição favorável-----   | 65 |
| Figura 123 - Representação do posicionamento dos reservatórios no 11ºensaio-----                    | 66 |
| Figura 124 - Capsula -----  | 66 |
| Figura 125 – 12º ensaio-----  | 66 |
| Figura 126 - Representação da ampliação da variação das temperaturas no 12ºensaio -----             | 66 |
| Figura 127 – 13º ensaio-----  | 67 |
| Figura 128 - Representação da ampliação da variação de temperatura no 13ºensaio-----                | 67 |
| Figura 129 – Capsula usada no 14ºensaio -----   | 68 |
| Figura 130 – Reservatório 14º ensaio-----   | 68 |
| Figura 131 – 14º ensaio-----  | 68 |
| Figura 132 - Representação da ampliação da variação da temperatura no 14ºensaio-----                | 68 |
| Figura 133 – Reservatório 15ºensaio-----  | 69 |
| Figura 134 – 15º ensaio-----  | 69 |
| Figura 135 - Representação da temperatura interior no 15ºensaio -----                               | 69 |
| Figura 136 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 16ºensaio---         | 69 |
| Figura 137 – 17ºensaio-----   | 70 |
| Figura 138 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 17ºensaio---         | 70 |
| Figura 139 – 18ºensaio-----   | 71 |
| Figura 140 - Representação da ampliação da variação da temperatura no interior do<br>18ºensaio----- | 71 |
| Figura 141 – Capsula 19ºensaio -----  | 71 |
| Figura 142 – 19ºensaio-----   | 71 |
| Figura 143 - Representação da temperatura interior no 19ºensaio -----                               | 72 |
| Figura 144 – Aquecimento no 20ºensaio -----   | 72 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 145 – Arrefecimento no 20ºensaio-----   | 72 |
| Figura 146 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 20ºensaio---          | 73 |
| Figura 147 – 21ºensaio-----  | 73 |
| Figura 148 - Representação da temperatura interior no 21ºensaio -----                                | 74 |
| Figura 149 – 22ºensaio-----  | 74 |
| Figura 150 - Representação da temperatura interior no 22ºensaio -----                                | 74 |
| Figura 151 – 23ºensaio-----  | 75 |
| Figura 152 – 23ºensaio-----  | 75 |
| Figura 153 - Representação da temperatura dos reservatórios do tipo III no 23ºensaio----             | 75 |
| Figura 154 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo II no 23ºensaio --       | 76 |
| Figura 155 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo I no 23ºensaio --        | 76 |
| Figura 156 – 24ºensaio-----  | 77 |
| Figura 157 – Arrefecimento 24ºensaio-----  | 77 |
| Figura 158 - Representação das temperaturas exteriores do 24ºensaio-----                             | 77 |
| Figura 159 – Monitorização no 25ºensaio-----   | 78 |
| Figura 160 – Reservatórios do 25ºensaio-----   | 78 |
| Figura 161 – Posicionamento no 25ºensaio -----   | 78 |
| Figura 162 - Representação da temperatura interior nos reservatórios do tipo R4 24ºensaio---         | 78 |
| Figura 163 - Representação da temperatura interior no 26ºensaio -----                                | 79 |
| Figura 164 – 27ºensaio-----  | 79 |
| Figura 165 – Arrefecimento 27ºensaio-----  | 79 |
| Figura 166 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo R5 no<br>27ºensaio ----- | 80 |
| Figura 167 – 28ºensaio-----  | 80 |
| Figura 168 - Representação da temperatura interior em reservatórios com 200ml no<br>28ºensaio -----  | 81 |
| Figura 169 – 7º ensaio -----   | 82 |
| Figura 170 – Posicionamento 7º ensaio-----   | 82 |
| Figura 171 – 8º ensaio -----   | 82 |
| Figura 172 – Posicionamento 8º ensaio-----   | 82 |
| Figura 173 – 11º ensaio -----  | 83 |
| Figura 174 – Posicionamento 11º ensaio -----   | 83 |
| Figura 175 – Preparação para o 6º ensaio -----   | 83 |
| Figura 176 – 6º ensaio -----   | 83 |
| Figura 177 – estação meteorológica-----  | 84 |
| Figura 178 - Esquema do Posicionamento -----   | 84 |
| Figura 179 - Esquema de ligação-----   | 84 |
| Figura 180 – Aberturas de ventilação-----  | 84 |
| Figura 181 – 7º ensaio -----   | 84 |
| Figura 182 – Esquema do Posicionamento-----  | 85 |
| Figura 183 - Esquema de ligação-----   | 85 |
| Figura 184 – 29ºensaio-----  | 85 |
| Figura 185 – Arrefecimento 29ºensaio-----  | 85 |
| Figura 186 – Reservatório 30ºensaio-----   | 86 |
| Figura 187 – Aquecimento 30ºensaio-----  | 86 |
| Figura 188 – Arrefecimento 30ºensaio-----  | 86 |
| Figura 189 – Arrefecimento 31ºensaio-----  | 86 |
| Figura 190 – 31ºensaio-----  | 86 |
| Figura191 - Representação da temperatura interior do 7ºensaio -----                                  | 88 |

|   |    |
|---|----|
| Figura192 - Aproximação do um ciclo do 7º ensaio -----                                  | 89 |
| Figura 193 - Representação da temperatura interior 8ºensaio -----                       | 89 |
| Figura 194 – Aproximação de um ciclo do 8º ensaio -----                                 | 90 |
| Figura 195 - Representação de temperaturas no 11ºensaio -----                           | 90 |
| Figura 196 - Aproximação do 11º ensaio-----   | 91 |
| Figura197 - Representação da temperatura do ar interior no 6ºensaio-----                | 91 |
| Figura 198 - Representação ampliada da temperatura interior em um pico, no 6ºensaio --- | 92 |
| Figura 199 - Representação da temperatura interior no 7ºensaio-----                     | 93 |
| Figura 200 - Representação ampliada da temperatura interior no 7ºensaio-----            | 93 |
| Figura 201 - Representação da temperatura interior no 29ºensaio -----                   | 94 |
| Figura 202 - Representação ampliada da temperatura interior no 29ºensaio -----          | 95 |
| Figura 203 - Representação da temperatura interior do 30ºensaio -----                   | 95 |
| Figura 204 - Ampliação da variação da temperatura interior no 30ºensaio -----           | 96 |
| Figura 205 - Representação da temperatura interior no 31ºensaio -----                   | 96 |
| Figura 206 - Ampliação da variação da temperatura interior no 31ºensaio -----           | 97 |

## Índice de tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Modelos de teste -----                        | 34 |
| Tabela 2- Resumo de ensaios aos provetes cúbicos-----    | 40 |
| Tabela 3 – Resumo dos ensaios aos modelos de teste ----- | 49 |
| Tabela 4 – Resumo dos ensaios dos reservatórios-----     | 56 |
| Tabela 5 - Ensaio finais dos provetes cúbicos -----      | 87 |
| Tabela 6 – Ensaio finais dos modelos de teste-----       | 87 |
| Tabela 7 – Ensaio Finais dos reservatórios -----         | 87 |

## **Capítulo 1 – Introdução**

### **1.1 – Enquadramento**

O consumo de energia é uma das maiores causas das emissões de gás com efeito de estufa já que em sua grande maioria é obtida por fontes não renováveis, para além de consumir recursos económicos das famílias e dos países. Construir os edifícios onde vivemos, trabalhamos e estudamos, de forma mais eficiente, convergindo para um caminho de cumprimento de metas impostas pela União Europeia, reduzindo gastos e aumentando a eficiência usando energia proveniente de fontes renováveis.

26A União Europeia estabeleceu como prioridade a redução de consumos energéticos lançando assim um desafio e metas dos “20 20 20”, ou seja, 20% de redução de emissões de gases com efeito de estufa, 20% do aumento da utilização das energias renováveis na produção energética total e 20% de redução do consumo de energia, mediante um aumento da eficiência energética.

Esta problemática torna-se pertinente no enquadramento deste trabalho pelo facto de o setor da construção civil, ser responsável pelo consumo de 40% da energia consumida na União Europeia. Neste contexto, torna-se necessário tratar da implementação de medidas de eficiência energética no parque edificado nos diversos países da União Europeia. Necessidade de implementação de medidas de eficiência energética dos edifícios coloca um duplo desafio, a renovação da eficiência energética dos edifícios existentes e a construção de novos edifícios eficientes.

Um dos caminhos para aumentar a eficiência é a utilização de novos materiais de construção. Tanto na área estrutural com a introdução de materiais compósitos mais leves e resistentes que os materiais tradicionais, como na área de isolamento onde tem existido introdução de alguns materiais.

Uns dos tipos de materiais que têm sido objeto de investigação e aplicação experimental são os revestimentos cuja composição incorpora materiais termo-ativos. Estes materiais, têm como principal característica a capacidade de armazenamento de energia e a libertação em fase oportuna ou seja, absorve energia térmica quando sujeito a temperaturas altas, libertando essa energia quando exposto a baixas temperaturas. Estes materiais são denominados por materiais de mudança de fase (Phase Changing Materials – PCM).

Existem já, algumas empresas a comercializar este material para a construção, como a BASF, Micronal ® PCM, sendo estes aplicados em argamassa de revestimento. No caso do trabalho desenvolvido, e que aqui se apresenta, optou-se pelo uso dum produto desenvolvido no

âmbito dum estudo de investigação, desenvolvido por um aluno da ESTIG - IPB [1], tentando assim usar produtos da escola e promover a partilha de conhecimento entre as diversas áreas científica da Instituição. O trabalho anteriormente realizado por este aluno, que consistiu na microencapsulação de vários tipos PCM's.

O tema do trabalho desenvolvido enquadra-se nas preocupações de sustentabilidade na construção, apontadas acima, de muita atualidade no sector da construção civil, na perspetiva da otimização do consumo energético, com a redução da energia.

Assim, apresenta-se neste trabalho o resultado do estudo de avaliação do comportamento deste tipo de materiais quando usados na construção para benefícios térmicos. Pretende-se demonstrar as vantagens e desvantagens da introdução destes materiais em argamassas e em reservatórios, para enriquecimento do conforto térmico e redução de consumos. No âmbito deste trabalho foi estudado o comportamento de modelos físicos integrando dois tipos de PCM's, o Octadecano e a Parafina, desenvolvidos na ESTIG, por serem materiais que apresentam gamas de temperatura de fusão da ordem de grandeza relacionada com as temperaturas de conforto do ser humano.

## **1.2 – Objetivos**

O objetivo principal desde trabalho consistiu em estudar, em termos de desempenho térmico, o comportamento de materiais termo-ativos aplicados em soluções de Engenharia Civil, concretamente por aplicação de PCM de duas formas diferentes: uma com a incorporação na composição de argamassas (argamassa térmicas) e outra na incorporação em reservatórios de águas quentes (termoacumuladores).

Para a realização do estudo foram desenvolvidos modelos físicos para ensaios experimentais, quer para o estudo de argamassas em paredes de trombe quer para o estudo dos reservatórios, tendo em vista, para ambos os casos, monitorizar os modelos através de aplicação de termopares ligados a sistemas de aquisição de dados, para registo da evolução dos valores de temperatura, essenciais no estudo.

O uso destes modelos de ensaio para simulação do comportamento de edifícios, com a fachada principal a funcionar no sistema parede de trombe, teve como objetivo caracterizar o benefício de ter os PCM's (Parafina e Octadecano) misturados numa argamassa, esperando-se um efeito de acréscimo da inércia térmica e do isolamento aos picos de temperaturas. Assim foram estudados seis modelos de teste distintos, em várias condições.

Por outro lado, a aplicação do PCM (Parafina) nos reservatórios foi pensada com o intuito de conseguir melhorar a absorção de calor por parte do PCM durante o período onde existe aquecimento, para mais tarde essa energia ser libertada durante o período de arrefecimento. A melhor aplicação será num sistema solar onde existe durante o dia o aquecimento e depois um arrefecimento derivado ao uso de água quente e ao arrefecer próprio da massa de água. Assim foram estudados diversos tipos de reservatórios com diversas quantidades de água e de PCM.

### **1.3 – Organização do trabalho**

O trabalho realizado contém cinco capítulos e terá a seguinte organização:

O **Capítulo 1** será um resumo para poder enquadrar com o contexto e com os objetivos deste trabalho.

No **Capítulo 2** vai-se descrever a fundamentação teórica do trabalho, onde serão expostos os tipos de matérias utilizadas, as suas características, as suas funções e possíveis aplicações desses materiais.

No **Capítulo 3** serão descritos os métodos utilizados para o ensaio dos vários modelos. Irão ser descritos todas as configurações usadas tanto na análise da argamassa como na análise dos ensaios dos reservatórios.

No **Capítulo 4** ir-se-á fazer a análise de todos os resultados obtidos no capítulo 3.

O **Capítulo 5** irá conter as conclusões e apontar direções para possíveis trabalhos futuros

## Capítulo 2 – Aplicação de PCM's na construção

O controlo do balanço energético num edifício corrente, objetivando o conforto térmico na sua utilização, passa por garantir o bom desempenho das componentes intervenientes nesse balanço, principalmente das componentes passivas, caracterizadas pelos elementos de construção e pelos seus materiais constituintes, e das componentes ativas, caracterizadas pelos equipamentos de base térmica, como sejam os sistemas de aquecimento / arrefecimento.

Por inerência vocacional, cabe à área da Engenharia Civil promover a otimização de soluções no que diz respeito à componente passiva das construções, atuando sobre os sistemas construtivos e seus materiais e, até, em alguns equipamentos passivos, como sejam por exemplo reservatórios com isolamento térmico (termoacumuladores). A otimização pode passar pela melhoria da gestão da energia obtida diretamente do ambiente, como por exemplo da contribuição solar.

É indiscutível que um dos ganhos térmicos passivos mais importantes num edifício corrente está associado aos ganhos provenientes do sol, em particular por via da radiação. O calor produzido pelo efeito da radiação normalmente é absorvido pelos materiais e depois é libertado para a envolvente nos períodos em que o ambiente da envolvente desses materiais se encontra mais frio (durante a ausência de sol ou da sua influência). Considera-se importante desenvolver formas de otimizar este processo, recorrendo quer à melhoria dos sistemas construídos quer à otimização do desempenho dos materiais, de forma a otimizar a “gestão” de energia calorífica no edifício.

Parte da responsabilidade por estes processos energéticos está atribuída aos vários materiais constituintes das soluções construtivas, os quais, muitas vezes atuando a par doutras soluções ativas (equipamentos) que contribuem para uma melhor gestão energética dos edifícios. Seria de todo desejável que os materiais de construção com vocação passiva assumissem uma participação mais ativa na gestão energética dos edifícios.

Nos últimos anos tem-se assistido, através de diversos estudos à introdução do uso de materiais mais ativos termicamente, como por exemplo os PCM's, aplicados em elementos construtivos correntemente usados em edifícios, como por exemplo em paredes exteriores, pavimentos e tetos. A aplicação dos PCM's nestas componentes construtivas deve-se ao facto de os PCM exibirem capacidades de armazenamento de calor por unidade de volume superiores a qualquer outro material [1].

Neste capítulo apresenta-se o resultado do estudo da bibliografia consultada e cujo conteúdo suportou o desenvolvimento do presente trabalho de investigação. Objetivou-se no trabalho o uso de materiais desenvolvidos na ESTIG e, como tal, os trabalhos desenvolvidos anteriormente neste contexto constituíram elementos de partida que condicionaram algumas das decisões ao longo do trabalho. A abordagem aos materiais de mudança de fase, com aplicações práticas principalmente em argamassas e reservatórios de águas quentes constitui o principal enfoque do presente estudo. Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os principais aspetos relacionados com o uso dos PCM na construção, nomeadamente: a sua definição, caracterização de materiais, e caracterização das soluções construtivas, tendo em vista a sua aplicação em reservatórios de água quente e em paredes de trombe.

## **2.1 – Definições**

Os materiais de mudança de fase são materiais capazes de armazenar uma grande quantidade de energia calorífica, devida ao seu elevado calor de fusão, e conseguem libertar esta energia a uma temperatura constante durante a sua mudança de fase. Estão associados a estes materiais, principalmente, processos de transição do estado sólido para o estado líquido, devido às pequenas alterações de volume associadas, denominando-se o processo por fusão, assim como o inverso, denominando-se por solidificação. Esta energia pode ser utilizada de forma eficiente para melhorar o conforto térmico [2, 3].

O funcionamento dos PCM's está esquematizado na Figura 1, na qual se expõe um exemplo de comportamento dum PCM que transita de fase, da forma líquida para a sólida, exibindo um processo de mudança de fase em que se constata a absorção e libertação de energia do PCM.

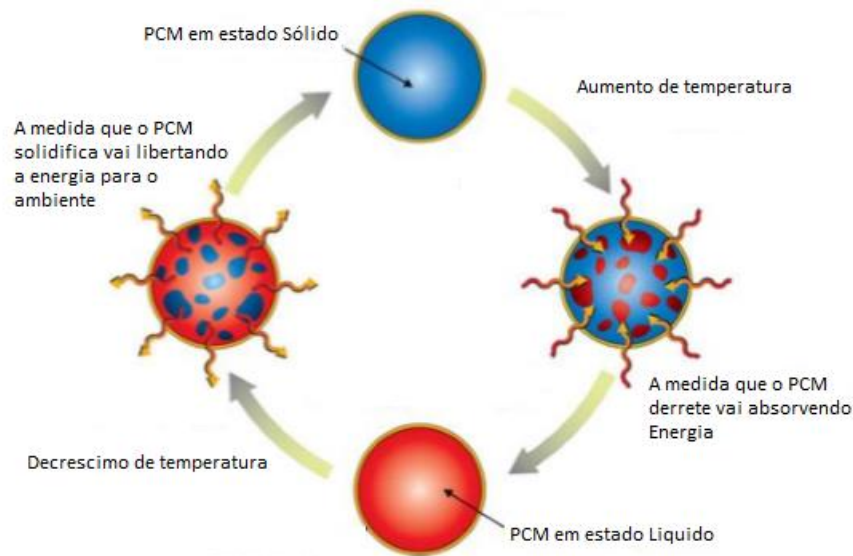


Figura 1 - Esquema explicativo do funcionamento dos PCM [4]

Quando lhe é fornecida energia o PCM funde de sólido para líquido e nesse processo absorve essa energia. Quando se retira energia calorífica ao PCM e ele atinge a temperatura de fusão solidifica e nesse processo liberta a energia que absorveu [4].

A Figura 2 demonstra o comportamento típico de um PCM, identificando-se um ciclo de aquecimento e arrefecimento. Quando um PCM é aquecido a um ritmo constante ele aumenta a sua temperatura à mesma medida que a temperatura aumenta. Quando atinge a sua temperatura de fusão o PCM inicia a mudança de fase sólida para a fase líquida e nesse processo o PCM tem capacidade para absorver energia mantendo assim a sua temperatura de fusão. Este processo pode ser observado no patamar que se obtém devido a essa permanência nas gamas de temperatura de fusão e, apesar de a temperatura aumentar, o PCM mantém a sua temperatura. Após a mudança de fase ter ocorrido totalmente o PCM aumenta de temperatura uniformemente até que o seu aquecimento pare.

Constata-se que ocorre o processo inverso quando acontece o arrefecimento do PCM, caracterizado pelo comportamento oposto em termos de evolução de temperaturas. Quando um PCM se encontra na forma líquida e submetido a um arrefecimento constante e quando este atinge a temperatura de fusão ocorre a sua solidificação. Este processo permite que seja libertada uma quantidade de energia e cria a segunda parte da plataforma onde a temperatura externa baixa e o PCM mantém uma temperatura constante, da mesma forma como no aquecimento quando termina o processo de solidificação o PCM decresce a temperatura constantemente.

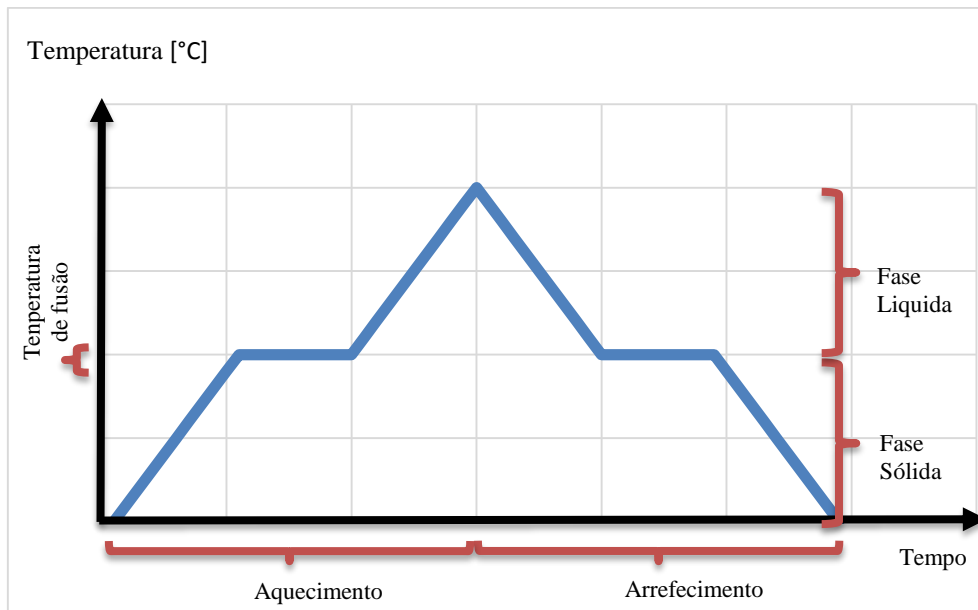


Figura 2 - Fase absorção e libertação de energia calorífica

Os PCM's podem ser classificados em duas categorias distintas os orgânicos e os inorgânicos [5].

Os PCM's **orgânicos** são divididos em ácidos gordos e em parafinas, sendo que estas últimas são as mais utilizadas. As parafinas podem ser classificadas em dois tipos, as puras e as ceras parafínicas. As parafinas exibem um comportamento não corrosivo e não tóxico, sendo quimicamente estáveis quando se encontram abaixo do 500°C, apresentando uma pequena alteração no volume devido à mudança de fase. Devido a sua estabilidade e devido a um custo relativamente baixo as parafinas são as mais utilizadas como PCM em sistemas de armazenamento de calor latente.

Por outro lado, nos ácidos gordos e misturas de ácidos gordos, comparativamente com as ceras parafínicas, o calor latente também apresenta um ponto de fusão e solidificação estável. Os PCM orgânicos, na sua maioria, apresentam baixa condutividade, o que origina uma taxa de transferência de calor baixa [3].

Nos PCM's **inorgânicos** ou sais hidratados são o grupo mais importante e que têm vindo a ser muito investigados para o armazenamento de energia térmica de calor latente. Exibem uma pequena variação do volume na fusão, condutividade térmica relativamente alta, elevado calor latente e um custo moderado quando comparados com as ceras parafínicas. Todavia, os sais hidratados sofrem problemas de segregação, onde se formam sais anídricos pesados. Estes PCM's apresentam uma ligeira toxicidade, não são corrosivos e são compatíveis com contentores de plástico. Devido ao facto do sal se encontrar no estado sólido e a densidade do sal ser superior à da água, este vai-se depositar no fundo dos reservatórios, ficando

indisponível para voltar a ser conjugado com a água no processo inverso de arrefecimento. Deste modo, o processo de fusão e solidificação do sal hidratado vai tornar-se cada vez mais irreversível, diminuindo cada vez mais em cada ciclo de armazenamento e libertação de energia.

## **2.2 – Formas de incorporação de PCM**

Os materiais de mudança de fase podem ser incorporados nos materiais ou sistemas construtivos por três métodos distintos: por impregnação, por imersão e por encapsulamento. A **impregnação** consiste na mistura do PCM com algum tipo argamassa diretamente, o que simplifica o processo embora seja associados a este método uma incompatibilidade a nível químico entre os PCM's e as argamassas. Na **imersão** faz-se uso dos materiais porosos de betão, cerâmica ou alvenarias, estes são imersos numa solução de PCM dissolvidos ou derretidos, entranhando-se assim por capilaridade nos poros, o processo lento e o desperdício são desvantagens deste método, embora a maior desvantagem seja a fuga de PCM durante os ciclos térmicos. Assim sendo o **encapsulamento** é a forma mais adequada de utilizar PCM's [5].

### **2.2.1 – Encapsulamento de PCM's**

Para a mais fácil aplicação dos PCM's na construção surge o encapsulamento. O PCM é envolto por um material sólido, geralmente um polímero designado de cápsula. Desta forma evita-se a interação entre o PCM e os materiais de construção, e facilita-se o manuseamento dos PCM's. Podem ser divididas em macroencapsulamento e microencapsulamento, sendo que a diferença esta no tamanho da cápsula [3].

#### **2.2.1.1 – Macroencapsulamento**

Macroencapsulamento, é o encapsulamento de PCM que consiste na incorporação de PCM em cápsulas geralmente maiores que 1 [cm] de diâmetro, em forma de tubos, esferas, painéis ou outras, da Figura 3 até Figura 6. Estes elementos podem ser aplicados diretamente em elementos construtivos, como revestimento, ou incorporados em materiais de construção [1].

Este tipo de macrocápsulas, podem ser produzidas através de materiais como folhas de alumínio ou polímeros, sendo que estas são produzidas individualmente e posteriormente

integradas nos materiais de construção. Podem também servir diretamente como permutadores de calor [3].



Figura 3 – Macrocápsulas PCM em folha de plástico [6]



Figura 4 - Macrocápsulas Esférica de polímero [3]

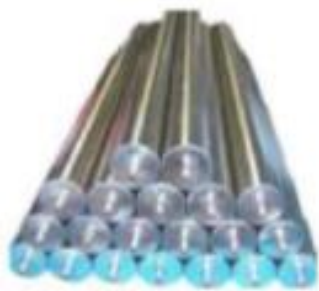


Figura 5 – Macrocápsulas de alumínio [7]



Figura 6 - Macrocápsulas de alumínio [7]

O macroencapsulamento com grande volume não é uma solução viável, devido à reduzida condutividade térmica da maior parte dos PCM's. Tendo em conta esta baixa condutividade, há uma maior propensão à cristalização junto às paredes da cápsula, impossibilitando assim a transferência de energia térmica armazenada pelo PCM. Também existe uma maior dificuldade de aplicar estas soluções de construções devido a sua grande dimensão. Por outro lado as suas dimensões facilitam o trabalho na conceção da capsula.

### 2.2.1.2 – Microencapsulamento

O microencapsulamento consiste no envolvimento de partículas de pequena dimensão, por microcápsulas com um tamanho entre 1 a 1000 [ $\mu\text{m}$ ], da Figura 7 até a Figura 9.

As microcápsulas são usualmente polímeros, sendo os mais aplicados o poliestireno, PVC, poliuretano e poliureia. Relativamente à cápsula, esta tem como função manter o material encapsulado de maneira a preservar as mesmas características, conservando uma interação entre o meio envolvente, não envolvendo troca de matéria, mas sim de energia [3].



Figura 7 – Aspeto de PCM Microencapsulados [3]

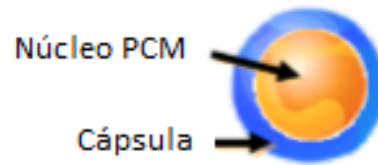


Figura 8 - Esquema do Microencapsulamento

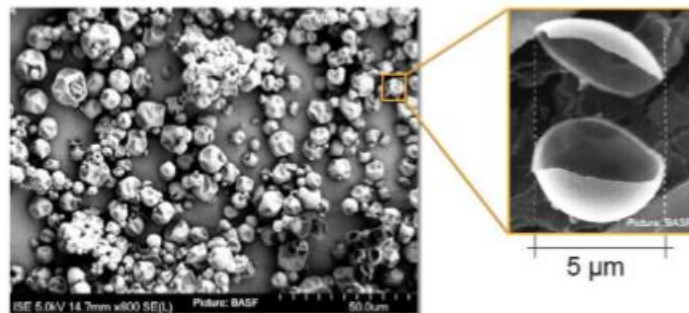


Figura 9 - Vista das microcápsulas amplificadas [8]

O microencapsulamento apresenta vantagens comparativamente ao macroencapsulamento no que diz respeito à incorporação nos materiais de construção. Possui uma aplicação mais fácil e não necessita de qualquer mudança no modo de construção dos edifícios já que se trata ao olho nu de um pó que pode ser incorporado nos materiais.

Uma das aplicações destas cápsulas é em betão ou argamassas onde pode ser simplesmente adicionado antes do processo de amassadura, onde levam a um decréscimo da condutividade térmica e a uma maior capacidade de armazenamento de calor. Uma das desvantagem de aplicar o PCM desta forma é a redução da resistência da argamassa, já que se diminui o rácio de ligante ao introduzir o PCM. Um aspeto também importante é a tolerância das capsulas ao processo de amassadura embora estudos indicam que a utilização de PCM microencapsulados, apesar de dispendiosos, são seguros e podem ser utilizados na mistura das argamassas [3].

### 2.3 – Aplicações práticas

O uso de matérias termo ativas vêm desde o século XIX onde era usado para conservar mercadorias que não podiam sofrer diferenças bruscas de temperaturas. Com o passar dos tempos foram sendo aplicados em diversas áreas e de diversas formas.

No setor do vestuário destaca-se a NASA, que incorporou nos seus fatos os PCM's, aproveitando a capacidade destes materiais para manter a temperatura do corpo, face às temperaturas negativas existentes no espaço. Da mesma forma alguns fabricantes de botas de ski também já incorporam este tipo de material. O princípio destes vestuários tem como base a temperatura do ponto de fusão ideal, ou seja próxima da temperatura de conforto, que permite quando existe um excesso de temperatura do corpo ou do ambiente arrefecermos-nos, e quando existem temperaturas baixas aquecermos-nos.

No ramo da saúde também já se aplicam PCM's seja em cobertores que têm a capacidade de absorver as temperaturas excessivas de pacientes febris, ou em recipientes para o transporte de órgãos onde mantem a temperatura constante.

Na área da construção estes materiais estão a ganhar cada vez mais popularidade, uma vez que permitem regular as temperaturas no interior das habitações e assim aumentar a eficiência energética. A empresa alemã BASF desenvolveu o seu produto Micronal®, com base em microcápsulas que contém uma cera de parafina no seu interior. Este sistema é especialmente adequado para aplicação em argamassas e rebocos, Figura 10, explorando a capacidade destes materiais armazenarem calor latente. A empresa alemã H+H Deutschland GmbH desenvolveu o CelBlockPlus®, tratando-se de blocos de alvenaria com Micronal® PCM já integrado, Figura 11.



Figura 10 – Painéis de argamassa com PCM [8]



Figura 11 - Blocos de alvenaria com PCM [8]

Também existem soluções que aplicam os PCM's macroencapsulados, maioritariamente em isolamentos para tetos falsos e uma outra solução é aplicar os PCM's em reservatórios de águas quentes sanitárias. A empresa BIOPCM desenvolveu umas mantas com PCM's macroencapsulados que têm o objetivo de absorver o excesso de temperaturas, e devolver esse calor quando a temperatura é mais baixa do que a pretendida.

O Produto vem em forma de manta plástica que pode ser aplicado na vertical ou na horizontal, sendo que a aplicação na horizontal é feita somente pousando esta manta por cima de um teto

falso ou laje estrutural. Na aplicação vertical deve ser aplicada antes de um revestimento final, da Figura 12 até a Figura 14.



Figura 12 - Rolo de biopcm [6]



Figura 13 – Aplicação da manta num teto falso na horizontal [6]



Figura 14 - Aplicação da manta na vertical [6]

Os sistemas descritos acima são sistemas que aumentam a inércia térmica e assim melhoram o comportamento do edifício, essa é uma das principais aplicações dos PCM's na construção. Os PCM's também podem ser aplicados para fazer um armazenamento de energia térmica, ou seja, é aplicada uma carga térmica ao PCM e após a sua saturação o PCM fica libertando essa carga quando for necessário.

Um sistema para o qual o PCM pode ser utilizado é num sistema de aquecimento de águas sanitárias, onde o PCM é aplicado dentro do sistema reservatório de água. Este sistema é constituído por um depósito de água com o PCM no seu interior. Utilizando a radiação solar durante o dia para aquecer a água é assim transferir parte desse calor para o PCM e durante a noite. Quando se gastar parte da água quente a água do depósito é substituída por água fria, como o PCM absorveu energia durante o dia tem energia armazenada suficiente para aquecer a água, da mesma forma que permite que a água do reservatório mantenha a temperatura durante um maior período de tempo. Neste sistema utilizam-se macrocápsulas já que são mais fáceis de aplicar no interior do reservatório, podem ser de plástico ou de alumínio de formas variadas, Figura 15 e Figura16.

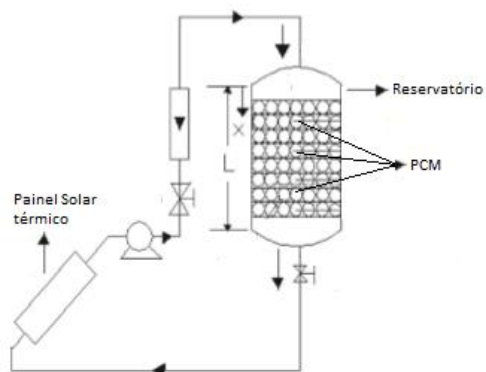


Figura 15 - Esquema do sistema de Reservatório



Figura16 - Macrocapsulas aplicadas em reservatórios [9]

A aplicação de materiais termo-ativos em reservatórios de água quente sanitária pode trazer várias vantagens, tal como nas argamassas aqui também desempenha dois papéis principais, o de manter a água quente durante um período mais longo de tempo funcionando como um isolante e o de aquecer água quando esta se arrefece sendo que desempenha uma função de libertar energia.

Um sistema onde se enquadra a utilização de PCM's é um sistema de aquecimento de águas solar térmico, uma vez que este sistema está exposto por longos períodos do dia a temperaturas altas que permitem ao PCM absorver energia durante o dia e depois libertar durante o período da noite quando não existe energia solar.

Como referido pode funcionar de duas formas, podendo funcionar como isolante o que permite manter a água que foi aquecida durante o dia quente, enquanto não existe energia solar, por outro lado também pode funcionar como um acumulador de energia durante o dia e depois à noite quando se gasta água quente e assim se arrefece o reservatório este recebe energia proveniente dos PCM's para compensar esta perda.

### 2.3 – Parede de trombe

Desde os tempos antigos que as paredes espessas de adobe ou pedra são utilizadas para armazenar o calor durante o dia e libertá-lo lentamente durante a noite, possibilitando assim o aquecimento dos edifícios. Atualmente, esta técnica milenar é por vezes melhorada, através da integração de outros elementos na envolvente dos edifícios, nomeadamente a parede de trombe, cujo sistema incorpora o armazenamento térmico e a devolução de calor ao interior do compartimento. Este sistema é basicamente constituído por um vão orientado no quadrante Sul, que corresponde à exposição solar que permite obter maior radiação solar, sendo colocada no interior uma parede maciça de espessura variável, cuja superfície exterior é

geralmente pintada de cor escura. No exterior é colocado um envidraçado, distanciado da parede acumuladora, formando uma caixa-de-ar entre os dois elementos. A ideia por trás desta solução é de criar um espaço onde a temperatura é muito alta devido a radiação e armazenar essa energia numa parede com grande inercia térmica para posteriormente libertar essa energia num período onde não exista radiação e o aquecimento seja necessário, nomeadamente à noite. A conceção clássica desta solução inclui a existência de um sistema de ventilação na parede acumuladora, tal como se ilustra na Figura 17, havendo também paredes de trombe não ventiladas, quando este sistema não for previsto como demonstrado na Figura 18 [10].

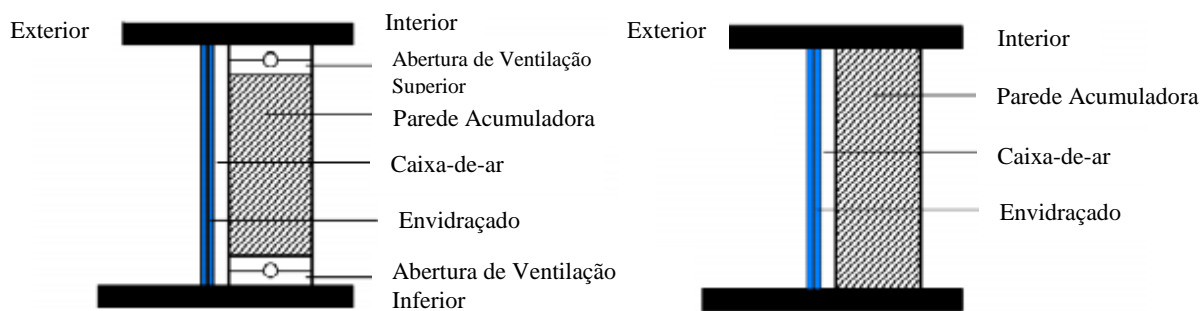


Figura 17 - Parede de trombe ventilada [10]

Figura 18 - Parede de trombe não ventilada [10]

A principal diferença entre os dois sistemas são as aberturas superiores e inferiores que na parede de trombe ventilada permite o aquecimento por convecção. As paredes ventiladas têm melhor comportamento já que aquecem o ambiente mais efetivamente embora o seu dimensionamento e construção seja mais difícil. Por outro lado, a construção de uma parede de trombe não ventilada torna-se mais simples embora não seja tão efetiva e podem ocorrer problemas de condensação, já que a caixa-de-ar não tem ventilação. Este tipo de solução funciona bem em climas temperados onde existam temperaturas altas durante o dia e depois a noite seja necessário um aquecimento.

Com a utilização dos PCM's nas paredes acumuladoras pretende-se maximizar a capacidade que estes elementos têm de absorver e libertar energia. Como uma das características chave dos PCM's é precisamente a absorção e libertação de energia calorífica, a junção desta solução construtiva com este elemento revela-se proveitoso. Também aplicando uma parede de trombe estamos a ir de encontro com a filosofia deste trabalho na aposta na eficiência energética.

## **2.4 – Particularização para o estudo desenvolvido**

Para a elaboração deste trabalho foram utilizados PCM's criados internamente no Instituto Politécnico de Bragança (IPB), por um aluno na sua dissertação para a obtenção do grau de mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética, o tema desse trabalho teve sobre título “Encapsulação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Aplicações no Armazenamento de Energia” [3].

Os PCM's utilizados foram de dois tipos sendo ambos orgânicos e microencapsulados. Tratam-se de produtos produzidos numa escala muito reduzida, visto que existia pouco material disponível, um PCM designa-se de Parafina e o outro de Octadecano.

Os PCM's foram aplicados em argamassas e em reservatórios. A aplicação nas argamassas foram executas por uma aluna na sua dissertação para o grau de Mestre em Engenharia da Construção, no entanto a monitorização através do sistema de aquisição de dados, foi de minha autoria e conta na presente análise. A aplicação e monitorização nos reservatórios foram desenvolvidas e analisadas no âmbito do presente trabalho.

## **Capítulo 3 – Estudo experimental**

No presente capítulo descrevem-se todos os elementos envolvidos no estudo experimental mais concretamente a descrição dos elementos de ensaio, os sistemas de aquisição de dados e os seus sensores e os ensaios utilizados. Fez-se três famílias de ensaios diferentes utilizando três sistemas construtivos diferentes a aplicação de argamassa com PCM, aplicação da argamassa em paredes do trombe e a aplicação dos PCM's em reservatórios de água.

### **3.1 – Descrição dos elementos de ensaio**

Após o estudo bibliográfico realizado no Capítulo 2, neste Capítulo descrevem-se os ensaios realizados ao longo da dissertação. Ensaios, estes realizados para o estudo de argamassas térmicas e reservatórios com sistemas passivos de aquecimento de águas, para tal, elaboraram-se elementos físicos para posterior monitorização através de um sistema de aquisição de dados. Para ambos os estudos usaram-se dois tipos de PCM's, Octadecano e Parafina.

Para realização dos ensaios, fez-se o estudar / aplicar de um sistema de monitorização de temperaturas que consistiu num sistema de aquisição de dados, com diversos canais de ligação de termopares, para medição da temperatura registada num dado ponto dos diversos elementos em estudo.

Para o estudo das argamassas executaram-se provetes cúbicos, em que se definiu a composição, mistura e através das monitorizações escolheu-se a percentagem ideal dos PCM's a usar nos estudos seguintes. De seguida executaram-se seis modelos de teste distintos para simulação de edifícios com e sem o sistema construtivo – parede de trombe. Fez-se a monitorização das temperaturas registadas em diversos pontos dos modelos para análises comparativas.

Quanto aos reservatórios (Termoacumuladores), criaram-se vários tipos, cada um com quantidades de água e de PCM – Parafina distintas. A água dos reservatórios colocou-se fria e aqueceu-se posteriormente em banho-maria ou em estufa dependendo do ensaio. Estes ensaios consistiram em estudos comparativos entre reservatórios distintos, colocados nas mesmas condições de ensaio.

### **3.1.1 – Sistema de aquisição de dados**

O sistema de aquisição de dados envolve diversas componentes mais concretamente uma unidade de registo e armazenamento de dados e sensores de vários tipos. Nos seguintes subcapítulos ira-se fazer uma descrição das unidades de aquisição e armazenamento de dados, dos termopares que são sensores de temperatura e dos restantes sensores utilizados para caracterizar os ensaios.

#### **3.1.1.1 – Unidades de aquisição e armazenamento de dados**

Para a monitorização dos modelos, usou-se um sistema de aquisição de dados que consistiu num data logger (caixa de medição) associado a termopares para medição de temperaturas superficiais, a sensores de medição de temperaturas ambientes e ainda a piranómetros de medição da radiação solar.

Para as monitorizações utilizaram-se dois modelos da marca Datataker. Uma caixa dt50 e outra dt515 sendo a sua principal diferença, o número de canais disponíveis para as ligações em simultâneo. Ambos os modelos continham um carregador AC, no entanto, também permitiram a alimentação através de baterias e pilhas de 6 e 9V.

O Datataker dt50 consiste num data logger, com cinco canais onde se pôde ligar até dez termopares em simultâneo, pois permitiu a ligação de dois termopares em cada canal. Nos ensaios utilizaram-se duas caixas deste tipo, Figura 19 e Figura 20.

O Datataker dt515 consiste num data logger com dez canais onde se pode ligar até vinte termopares em simultâneo, ligados do mesmo modo que no Datataker dt50. Utilizou-se para análises onde foram necessárias mais leituras e uma maior capacidade de armazenamento, Figura 21 e Figura 22.

Ambas as caixas foram mantidas em caixas de proteção que permitem que os sistemas de aquisição de dados não estejam expostos aos elementos envolventes, tais como as condições atmosféricas.



Figura 19 - Datataker dt50

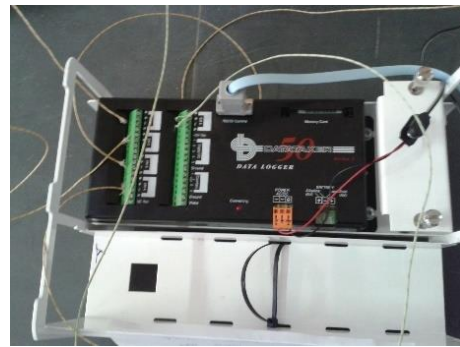


Figura 20 - Datataker dt50, com ligações



Figura 21 - Datataker dt515



Figura 22 - Datataker dt515, com ligações

### 3.1.1.2 – Termopares

Para monitorização das temperaturas superficiais utilizaram-se sensores de temperaturas, designados de termopares do tipo K. Cada termopar foi concebido por dois cabos de metais diferentes que foram ligados eletricamente numa das pontas, e soldados estaticamente, na outra extremidade. Estes elementos funcionaram fazendo passar pequenas voltagens, que medindo a diferença entre a voltagem enviada e a recebida pôde-se fazer uma relação e obter-se a temperatura em graus Celcius [°C] na ponta do termopar.

Os termopares do tipo K são constituídos por um cabo positivo composto por níquel e 10% de cromo (Ni, 10%Cr) e um negativo composto por níquel, 2% de manganês e ainda 2 % de alumínio (Ni, 2%Mn, 2%Al), este tipo de termopar pode suportar temperaturas entre os -200 e 1250°C o que será mais que suficiente tendo em conta as temperaturas esperadas nos ensaios.

Existem vários tipos de termopares, no entanto, neste trabalho apenas se utilizaram termopares do tipo K, em que a envolvente destes concebeu-se em dois isolamentos diferentes. Um termopar do tipo filamento único com isolamento de fibra de vidro, que permite maior facilidade no manuseamento e na aplicação, Figura 23 e o outro tipo de

termopar com multifilamento com isolamento de borracha, que permite fazer leituras em situações mais agressivas, Figura 24.



Figura 23 – Termopares do tipo I (T1)



Figura 24 – Termopares do tipo II (T2)

### 3.1.1.3 – Sensores

Para uma melhor perceção das condições atmosférica, utilizaram-se sensores, aplicados numa estação atmosférica para a medição da temperatura ambiente e da radiação solar.

Para a medição da temperatura ambiente utilizou-se um sensor de temperatura do Ar T351-TR da marca VECTOR INSTRUMENTS que regista valores de temperatura em graus Celcius [°C], Figura 25 e para medição da radiação utilizou-se um piranómetro ou sensor de radiação SP LITE da marca KIPP&ZONEN que regista valores de radiação em watt por metro quadrado [ $W/m^2$ ], Figura 26.



Figura 25 – Sensor de temperatura



Figura 26 - Piranómetro

### 3.1.2 – Argamassas

Neste subcapítulo vai-se abordar a aplicação de PCM's em argamassas cimentícia, sendo que o primeiro subcapítulo 3.1.2.1 se refere à aplicação de PCM's em argamassa e no segundo subcapítulo 3.1.2.2 se estuda a aplicação dessa argamassa na parede acumuladora de uma parede de tombe.

### 3.1.2.1 – Provetes cúbicos

Para o estudo dos provetes cúbicos começou-se por definir os materiais a usar: cimento Portland da Cimpor de cor cinzenta, água proveniente da rede de abastecimento do IPB, areia designada de rio em saco com a granulometria entre 2 e 16 [mm] e PCM – Octadecano / Parafina.

No estudo da composição das argamassas, elaboraram-se argamassas de base cimentícia ao traço 1:3, em que se fizeram dois tipos de argamassa, uma argamassa cimentícia e uma argamassa cimentícia com adição de PCM, em que o PCM a misturar será definido como sendo uma percentagem do ligante (cimento), que variaram entre 5% e 30%. O processo de mistura das argamassas foi minucioso, para a argamassa com PCM, pois pelo processo tradicional de mistura, o PCM em contacto direto com a água cristaliza e não se mistura com os restantes componentes. Assim começou-se por misturar bem o cimento e o PCM, de seguida adicionou-se e misturou-se a areia seca e só depois se adicionou água e misturou-se bem até obter uma textura homogénea.

Dado isto, executaram-se provetes cúbicos de dimensão  $4 \times 4 \times 4$  [cm<sup>3</sup>], uns em argamassa cimentícia e outros em argamassa cimentícia com adição de PCM, em que se fez variar a percentagem de PCM incorporado, assim como a natureza do PCM, podendo ser usado Octadecano ou Parafina. Inicialmente, usou-se o PCM - Octadecano em que se fizeram quatro provetes cúbicos, um em argamassa cimentícia e três em argamassa cimentícia com incorporação de PCM, com percentagens distintas de 10%, 20% e 30%, Figura 27. E para uma segunda análise usou-se o PCM - Parafina e fizeram-se seis provetes cúbicos, dois em argamassa cimentícia e quatro em argamassa cimentícia com incorporação de PCM, mais uma vez com percentagens distintas de 5%, 10%, 20% e 30%, Figura 28.



Figura 27 - Provetes com PCM-octadecano



Figura 28 - Provetes com PCM-parafina

No interior da argamassa, mais ao menos a meio do molde, foram colocados termopares para monitorização das temperaturas no interior dos provetes, registando as variações da

temperatura ao longo dos ensaios realizados. Com isto realizaram-se vários ensaios em condições distintas, inicialmente no Laboratório de Materiais de Construção da ESTIG, os provetes cúbicos foram colocados a aquecer em estufa, os provetes de Octadecano à temperatura de 90°C e os provetes de Parafina à temperatura de 105°C, ambos durante duas horas e posteriormente arrefeceu à temperatura ambiente, ou dentro de caixas de poliestireno expandido, dependendo do ensaio.

Seguidamente a monitorização foi ao ar livre, decorreu na Cobertura da ETIG e esteve sujeita, as condições atmosféricas dentro e fora das caixas de poliestireno expandido durante vários ciclos.

Posteriormente para a realização dos ensaios foram colocados também termopares em uma das faces de cada cubo e no interior das caixas de poliestireno expandido, Figura 29 até Figura 31. A fixação dos termopares nos cubos fez-se com fita-cola e ata cabos para garantir que o termopar ficasse em contacto com a argamassa e reduzir a influência da temperatura exterior. Os ensaios decorreram nos meses de fevereiro, março e abril de 2015.

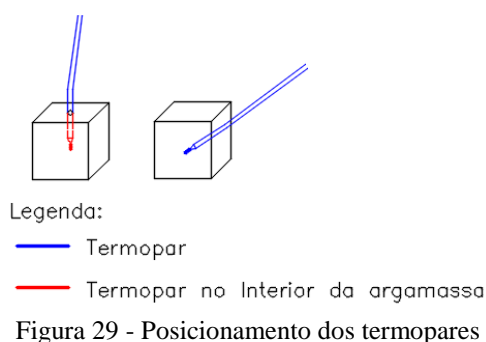


Figura 30 - Termopar – face









Figura 31 - Termopar - ar interior

### 3.1.2.2 – Modelos de teste

Após os estudos prévios, desenvolveram-se seis modelos de teste para simulação de edifícios, de dimensões 36×36×36 [cm<sup>3</sup>], desde o seu projeto, construção, instrumentação e monitorização. Dos seis modelos realizados, quatro são executados com o sistema construtivo

parede de trombe. Os dois primeiros modelos compostos por argamassa cimentícia e fachada em acrílico, respetivamente, substituindo a parede de trombe. Os restantes quatro modelos, usou-se num deles argamassa cimentícia ao traço 1:3 com 1.5 [cm] de espessura, outros dois em argamassa cimentícia com incorporação de 30% do PCM – Octadecano / Parafina, ambos com 1.5 [cm] de espessura e o último em Pedra granítica cinzenta com 2.0 [cm] de espessura. Os modelos permitirão a comparação e validação dos resultados, a Tabela 1 Tabela 1 - Modelos de teste apresenta os modelos de teste.

Tabela 1 - Modelos de teste

| Nome     | Foto  | Tipo   | Material da parede                  | Cor da parede     | Espessura | Nomenclatura |
|----------|---|--------|-------------------------------------|-------------------|-----------|--------------|
| Modelo 1 |    | Maciça | -                                   | -                 | 3 [cm]    | “Homo”       |
| Modelo 2 |   | Janela | -                                   | -                 | -         | “Acrilico”   |
| Modelo 3 |  | Trombe | Argamassa cimentícia                | Preto             | 1.5 [cm]  | “Simples”    |
| Modelo 4 |  | Trombe | Argamassa cimentícia com Octadecano | Preto             | 1.5 [cm]  | “Octa”       |
| Modelo 5 |  | Trombe | Argamassa cimentícia com Parafina   | Preto             | 1.5 [cm]  | “Para”       |
| Modelo 6 |  | Trombe | Pedra                               | Cinzen to / Preto | 2 [cm]    | “Pedra”      |

O estudo fez-se tendo em vista a análise comparativa entre os modelos, quanto ao seu comportamento térmico sujeito a condições climáticas reais. Os modelos de teste foram colocados na cobertura da ESTIG, monitorizados com termopares do tipo K - T1, ligados a um sistema de aquisição de dados que mediu as temperaturas de 10 em 10 minutos para cada ensaio.

Os termopares foram colocados no interior dos modelos ligados ao sistema de aquisição de dados e permitirão obter o valor das temperaturas do ar interior e da parede a Sul (parede de trombe e caixa-de-ar), Figura 32 até Figura 35. Os termopares foram fixados com recurso a silicone e fita-cola para garantir que existe contacto entre a ponta do termopar e a superfície, já que os termopares medem temperaturas superficiais.

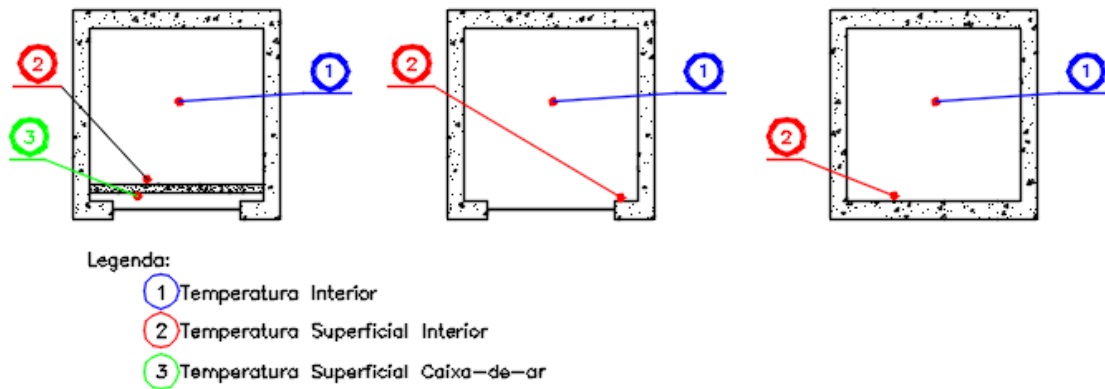


Figura 32 – Posicionamento dos termopares

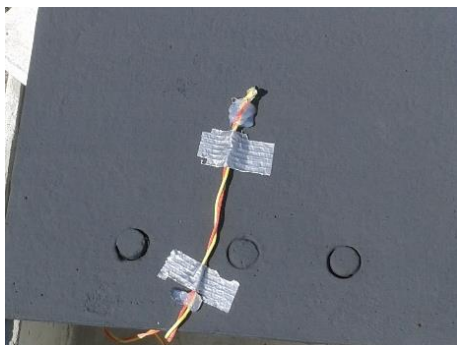


Figura 33 – Termopar - Superficial caixa-de-ar



Figura 34 – Termopar - Superficial interior



Figura 35 – Posicionamento dos 3 termopares

Nas monitorizações, os valores registados foram comparados com dados meteorológicos, que foram obtidos de duas fontes distintas.

Numa primeira análise utilizaram-se dados recolhidos na estação meteorológica existente na Escola Superior Agrária (ESA) - IPB onde existiam algumas lacunas de dados já que esta não

estava em funcionamento permanente, os sensores desta estação estavam afastados cerca de 500 [m] do local onde decorreram os ensaios, Figura 36.

Numa segunda análise, para se obter medições mais concretas, instalou-se junto aos modelos de teste um controlador das condições meteorológicas, com um sensor de medição de temperatura ambiente e de radiação solar. Esta estação montou-se no local a cerca de 2 [m] a norte dos modelos, Figura 37, o que permitiu medir com mais exatidão as condições atmosféricas no local dos ensaios.



Figura 36 – Estação meteorológica da ESA



Figura 37 – Estação meteorológica da ESTIG

Os ensaios decorreram nos meses de maio, junho e julho de 2015. Entre os ensaios alteraram-se alguns aspetos tais como: a localização dos modelos de teste, o número de termopares ligados e o local onde estavam a medir a temperatura, a cor da parede estrutural em granito, que foi pintada de preto e o modo de funcionamento do sistema construtivo - parede de trombe, pois inicialmente funcionou com o sistema não ventilado e depois funcionou com o sistema ventilado.

### 3.1.3 – Reservatórios (Termoacumuladores)

A aplicação de materiais termo-ativos em reservatórios de água quente sanitária, pode ter dois papéis principais, o de manter a água quente durante um período mais longo de tempo funcionando como um isolante e o de aquecer a água quando esta se arrefece desempenhando a função de libertar energia.

Um sistema onde se enquadra a utilização de PCM's é no sistema de aquecimento de águas solar térmico, uma vez que este sistema está exposto por longos períodos do dia a temperaturas altas que permitem ao PCM absorver energia durante o dia e depois libertar durante o período da noite quando não existe energia solar.

Nos ensaios existiram cinco variáveis: o tempo de aquecimento, o tipo de termopar, o tipo de recipiente, o tipo de capsula usada para o PCM e ainda a forma de aquecimento dos reservatórios.

### 3.1.3.1 - Termopares

Na primeira fase utilizaram-se termopares do tipo I (T1), Figura 38, que após a sua utilização foi notória uma falta de precisão em meio líquido uma vez que o isolamento não é impermeável. Passando-se a utilizar termopares do tipo II (T2), Figura 39, que têm um melhor isolamento garantindo assim dados corretos.

A fixação dos termopares fez-se de modo a que a ponta do termopar se encontrasse sensivelmente 1 [cm] abaixo da superfície da água do reservatório, pois foi o sítio onde existiram maiores alterações de temperatura já que o líquido quente tende em subir à superfície.



Figura 38 – Termopares T1



Figura 39 – Termopares T2

### 3.1.3.2 - Reservatórios

Usaram-se cinco tipos de reservatórios variando desde a capacidade em litros até à forma geométrica. Com o decorrer dos ensaios aperfeiçoou-se tudo, daí uma tão grande variedade de recipientes até se chegar ao que melhor se adequava ao ensaio. Assim temos:

O reservatório do tipo I (R1) é de vidro grosso com uma tampa em forma de cone com capacidade de 1 [l], Figura 40. O reservatório do tipo II (R2) é de vidro mais fino que o primeiro com capacidade de 1 [l] em forma de pêra e sem tampa em que se fez o fecho com um balão, Figura 41. O reservatório do tipo III (R3) é em vidro, com capacidade de 600 [ml], com tampa onde se fez um buraco para passagem dos termopares, este tipo de reservatório foi produzido sem controlo de qualidade, Figura 42. Os reservatórios do tipo IV (R4) e V (R5) são semelhantes ao R2 mudando apenas a sua capacidade para 500 [ml] e 300 [ml]

respetivamente, não têm tampa e o fecho fez-se com umas rolhas em poliestireno expandido, Figura 43 e Figura 44.



Figura 40 – Reservatório R1



Figura 41 – Reservatório R2



Figura 42 – Reservatório R3



Figura 43 – Reservatório R4



Figura 44 – Reservatório R5

### 3.1.3.3 - Cápsulas

Para o uso do PCM - Parafina microencapsulada nos modelos de termoacumuladores, foi necessário criar cápsulas (macroencapsulação) para a colocação dentro dos reservatórios. As cápsulas utilizadas foram de quatro tipos. Estas cápsulas deveriam ser o mais fino possível, impermeáveis e não oferecer grande resistência térmica. Uma das grandes preocupações foi a interface entre a capsula e a água do recipiente, assim para promover uma melhor transferência de energia, o interior da capsula foi preenchida com uma mistura água e PCM - Parafina microencapsulada para que a interface entre interior e o exterior da capsula seja semelhante e seja promova a troca de energia.

Utilizaram-se dois tipos em material flexível sendo um comum balão de ar (C1), Figura 45, e o outro um dedo de uma luva de latex (C2), Figura 46. Usaram-se também capsulas de vidro com tampa plástica (C3), Figura 47. Utilizaram-se em maior abundância as luvas de latex (C2), pois foi com as que se obteve melhores resultados.



Figura 45 – Capsula C1



Figura 46 – Capsula C2



Figura 47 – Capsula C3

#### 3.1.3.4 - Aquecimento

Utilizaram-se dois métodos diferentes, primeiramente o equipamento de banho de maria (A1), Figura 48, que permitiu aquecer água e submergir nessa água quente os recipientes com PCM, despejou-se a água quente e deixou-se arrefecer a temperatura ambiente. Após ser detetado um problema no aparelho optou-se por outra alternativa, em que se utilizou para o aquecimento dos reservatórios a estufa (A2), Figura 49.

No aparelho A1 obtiveram-se bons resultados no início embora depois surgiram vários problemas, tais como uma distribuição não uniforme de temperaturas no equipamento, provocadas por um problema com o termostato, que levou a temperaturas pouco estáveis. Para colmatar algumas desses problemas fez-se um banho-maria dentro de outro para se estabilizar as temperaturas. Estas imperfeições levaram a busca de um meio mais eficaz, para o aquecimento da água, assim fizeram-se alguns testes positivos em A2. Depois os ensaios passaram a ser feitos em A2 obtiveram-se resultados mais calibrados e com maior precisão.



Figura 48 – Aquecimento A1



Figura 49 – Aquecimento A2

### 3.2 – Ensaios de calibração

Apresentados no subcapítulo anterior os elementos a ensaiar, neste subcapítulo procedeu-se a uma calibração do layout do ensaio, uma vez se privilegia a abordagem experimental, na qual não existem normas para servir de guia, pois os métodos de ensaio necessitam de ser calibrados, ou seja, ir alterando o método de teste até serem identificados e removidos todos os possíveis erros de ensaio, para os provetes cúbicos, para os modelos de teste e para os reservatórios.

#### 3.2.1 – Provetes cúbicos

Para análise dos provetes cúbicos elaboraram-se onze ensaios, todos em condições distintas e em alguns deles variou-se também o tipo de PCM. A Tabela 2 apresenta um resumo dos ensaios realizados.

Tabela 2- Resumo de ensaios aos provetes cúbicos

| Ensaio | Nº de provetes | PCM adicionado na argamassa | Condições  | Tipo de ensaio |
|--------|----------------|-----------------------------|--|----------------|
| 1      | 4              | PCM - Octadecano            | No laboratório desprotegido                              | Arrefecimento  |
| 2      | 4              | PCM - Octadecano            | No laboratório com a base isolada                        | Arrefecimento  |
| 3      | 4              | PCM - Octadecano            | Experiência caseira                                      | Aquecimento    |
| 4      | 4              | PCM - Octadecano            | No laboratório no interior da estufa                     | Aquecimento    |
| 5      | 4              | PCM - Octadecano            | No laboratório dentro de caixas                          | Arrefecimento  |
| 6      | 4              | PCM - Octadecano            | No laboratório, isolados com monitorização da superfície | Arrefecimento  |
| EF1    | 4              | PCM - Octadecano            | Na cobertura dentro de caixas                            | Ciclos         |
| EF2    | 4              | PCM - Octadecano            | Na cobertura desprotegidos                               | Ciclos         |
| 7      | 5              | PCM - Parafina              | No laboratório, com a base isolada                       | Arrefecimento  |
| 8      | 5              | PCM - Parafina              | No laboratório no interior da estufa                     | Aquecimento    |
| EF3    | 5              | PCM - Parafina              | No laboratório dentro de caixas                          | Arrefecimento  |

### 3.2.1.1 – Provetes com octadecano

No 1º Ensaio, fevereiro, fez-se uma abordagem para testar o aparelho de aquisição de dados e a resposta dos provetes ao arrefecimento.

Para o ensaio, procedeu-se a um aquecimento de quatro provetes em estufa (A2) até uma temperatura de 90°C, de seguida os provetes foram ligados ao aparelho de monitorização e deixados arrefecer em cima da bancada no Laboratório de Materiais de Construção, Figura 50.



Figura 50 – Provetes Cúbicos

Esta análise permitiu avaliar o intervalo de tempo em que se deveria fazer a medição e qual o comportamento dos provetes. Os resultados obtidos no Figura 51, foram positivos, pois conseguiu-se identificar sem a menor dúvida uma diferença entre comportamento dos quatro provetes. Embora as temperaturas iniciais não sejam as mesmas para todos os provetes, já que o tempo de aquecimento foi reduzido  $\approx 30$  [min], podemos observar que os dois provetes com maior percentagem de PCM, 20% e 30%, apresentam um “ressalto” nas respetivas temperaturas de mudança de fase.

Pode-se concluir que a percentagem de PCM, influência a temperatura em que ocorre a mudança de fase já que sendo o mesmo PCM as temperaturas em que ocorre o “ressalto” são diferentes.

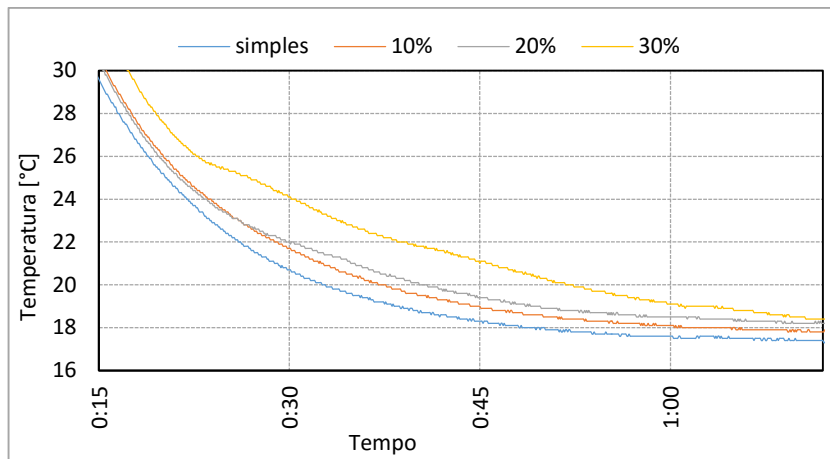


Figura 51 – Representação em zoom do 1º ensaio

No **2º ensaio**, fevereiro, de acordo com o registado no primeiro ensaio, identificou-se que grande parte do calor dos provetes foi perdido através do contacto com a bancada, logo neste ensaio repetiu-se o ensaio anterior isolando os provetes na base com uma caixa de poliestireno expandido, Figura 52 e Figura 53.



Figura 52 – 2º ensaio

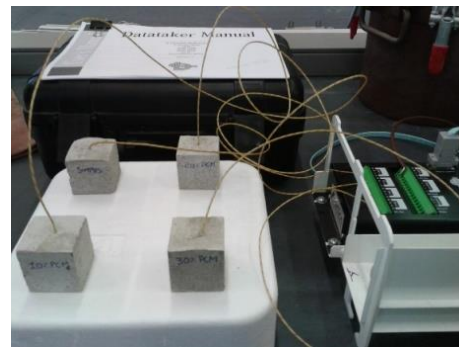


Figura 53 – Posicionamento 2º ensaio

Comparando os resultados obtidos no Figura 54, com os obtidos anteriormente identifica-se que os resultados são muito semelhantes, no entanto em ambos os casos é notório que a temperatura em que se iniciou o decréscimo de temperatura é diferente, assim sendo as linhas do gráfico começam de forma paralelo e só nas temperaturas de fusão é que existe variação. As linhas aparecem distorcidas uma vez que o tempo entre medições é muito reduzido, 2 em 2 [seg], produzindo este efeito.

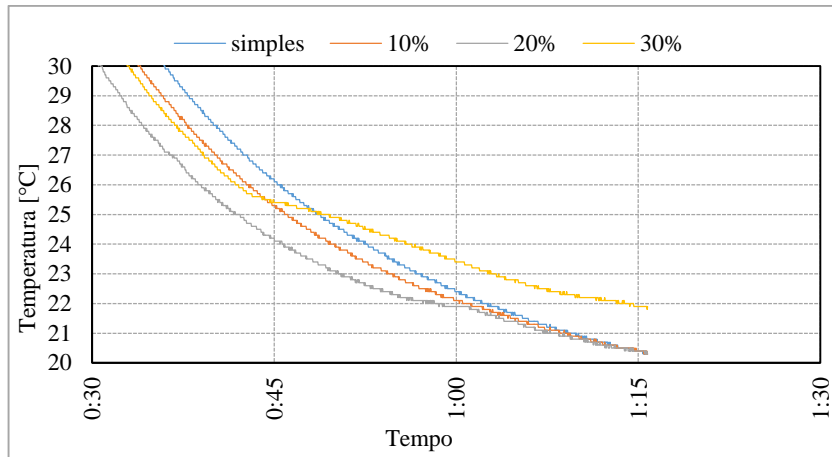


Figura 54 - Representação do 2º ensaio

O **3º Ensaio**, fevereiro, fez-se em casa onde se estudou o comportamento do equipamento de aquisição quanto ao registo de valores dependendo da posição em que se encontram os provetes, assim pôde-se fazer um ajuste no uso do equipamento e da colocação dos provetes em A2 para uma maior uniformização a nível de temperatura, Figura 55.



Figura 55 – Posicionamento 3º ensaio

No **4º ensaio**, fevereiro, após a execução dos três primeiro ensaio em que não se conseguiu ter as mesmas temperaturas no início do arrefecimento, procedeu-se à monitorização dos provetes na fase do aquecimento, para se determinar o tempo necessário para que os provetes atingissem a mesma temperatura interior. Colocaram-se em A2 à temperatura de 60°C, Figura 56 e Figura 57.



Figura 56 – 4º ensaio



Figura 57 – Posicionamento 4º ensaio

Através do Figura 58, conclui-se que os provetes estabilizam a temperatura após aproximadamente 1.30 [h], logo nos seguintes ensaios irá ser necessário aquecer os provetes durante pelo menos este tempo. Também se pode observar que foram anulados as distorções que existiam nos gráficos anteriores já que se alterou o timing em que se são monitorizados valores de temperaturas de 1 em 1 [min].

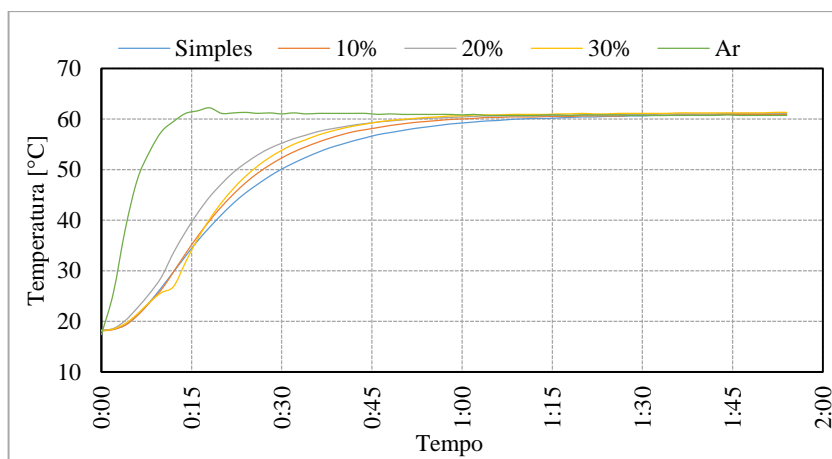


Figura 58 - Representação do 4ºensaio

No **5ºensaio**, março, fez-se a continuação do quarto ensaio, em que se aproveitou os provetes quente e colocaram-se a arrefecer. Colocaram-se os provetes dentro de caixas de poliestireno expandido para evitar perdas relacionadas com influências do meio ambiente ou do posicionamento. As caixas de poliestireno expandido têm dimensões de 20×20 [cm]. Para passagem dos termopares colocados nos provetes fizeram-se furos de dimensões reduzidas nas laterais das caixas. Colocou-se em simultâneo no ensaio uma das caixas vazia para a verificação do comportamento de uma caixa neutra, Figura 59 e Figura 60.

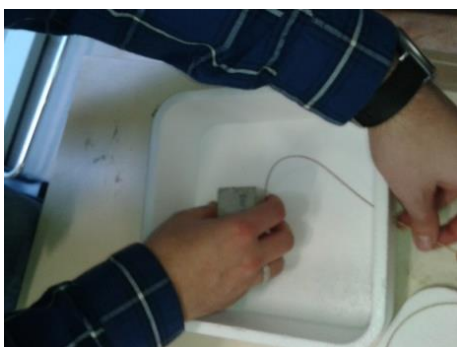


Figura 59 – colocação dos provetes



Figura 60 – Posicionamento das caixas

De acordo com o Figura 61, identificou-se que todos os provetes partem da mesma temperatura, resolvendo assim o problema existente anteriormente, por outro lado identifica-se algumas turbulências na zona onde se dá a mudança de fase.

Analisando a zona de mudança de fase, identificou-se claramente comportamentos diferentes nos provetes sendo que os provetes com maior percentagem de PCM apresentem um comportamento típico de um material de mudança de fase, libertando calor quando atingido o seu ponto de fusão.

O provete que contém 30% PCM – octadecano, apresenta um “ressalto” por volta dos 25°C, retardando assim o seu arrefecimento e demonstrando o efeito esperado. Por volta dos 22°C também o provete com 20% exibe um “ressalto”. O provete com 10% não apresenta qualquer efeito do PCM isso pode ser devido ao não atingir a temperatura de fusão, ou seja, a percentagem usada foi pequena e não apresenta qualquer efeito no provete.

Existe também uma alteração súbita da temperatura na caixa vazia, isto deve-se ao facto de este ensaio ter sido feito num período em que houveram alterações nas condições do laboratório e assim de alguma forma alteraram as temperaturas ambientes.

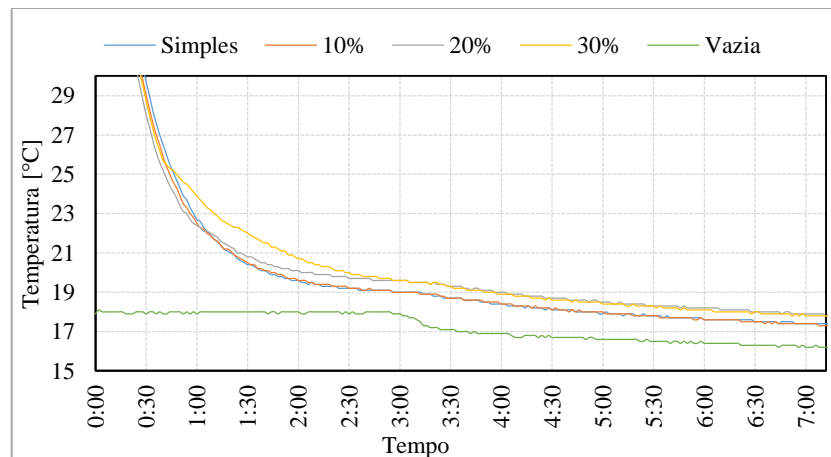


Figura 61 - Representação ampliada do 5º ensaio

No **6º ensaio**, março, colocaram-se os provetes em A2 a uma temperatura de 60°C durante aproximadamente 1:30 [h]. Retiraram-se os provetes da estufa e colocaram-se novamente nas caixas de poliestireno expandido para arrefecer. Para uma análise mais exata, neste ensaio colocaram-se para além dos termopares no interior do provete, termopares na superfície de cada provete e também termopares para medir a temperatura no interior das caixas de poliestireno expandido. Para avaliar a influência que o PCM tem na face do provete e se o provete consegue aquecer o interior das caixas, Figura 62 e Figura 63.



Figura 62 - Aquecimento dos Provetes



Figura 63 - Posicionamento no 6º ensaio

As temperaturas interiores registadas no arrefecimento dos provetes representadas na Figura 64 do gráfico foram muito semelhantes as obtidas no ensaio anterior.

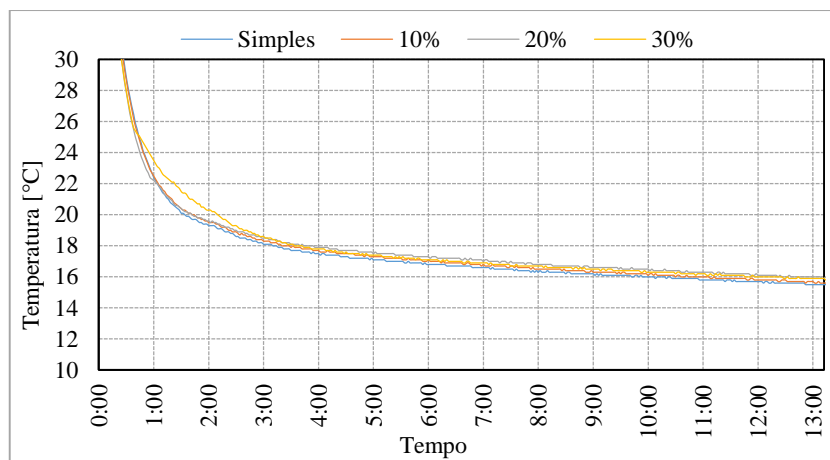


Figura 64 - Representação das temperaturas interiores no 6º ensaio

Nas medições de temperaturas, referentes as temperaturas na face dos provetes, gráfico da Figura 65, obtiveram-se dados muito semelhantes aos da temperatura interior e é notável uma redução nas diferenças de temperaturas embora as formas e princípios sejam muito semelhantes. As temperaturas no interior das caixas de poliestireno expandido não registaram alterações sendo que o provete não teve influência na temperatura ambiental no interior das caixas, o que pode dever-se ao reduzido tamanho dos provetes.

Assim sendo a fase de calibração dos ensaios dos provetes cúbicos em condições controladas de laboratório terminou-se, passando agora para um carregamento dos provetes às temperaturas reais, ou seja, fazer uma exposição aos agentes atmosféricos. Estas análises serão apresentadas nos ensaios finais e analisadas no próximo capítulo.

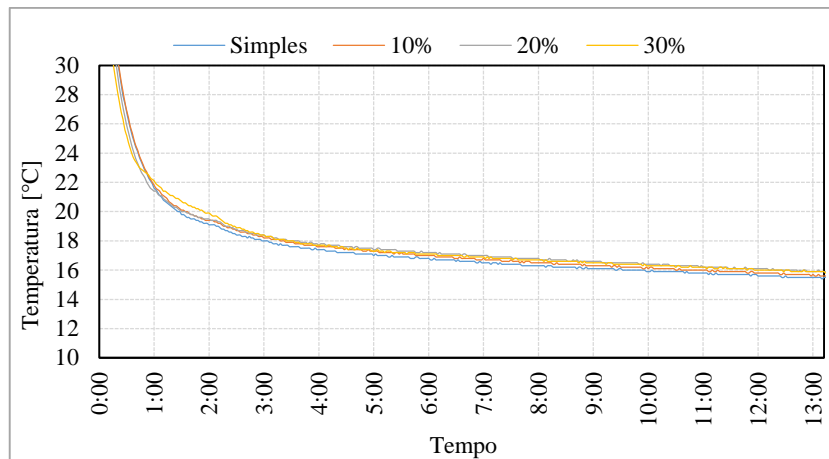


Figura 65 - Representação da temperatura na face do 6º ensaio

### 3.2.1.2 – Provetes com parafina

No **7º ensaio**, abril, sendo este o primeiro com os provetes de Parafina, aplicou-se uma metodologia muito semelhante à utilizada nos provetes com Octadecano, somente se aumentou a temperatura do forno já que a temperatura de fusão da Parafina é mais elevada, assim a A2 foi ligada com temperatura de 105°C durante 1.30 [h]. Neste primeiro contacto com estes provetes fez-se o aquecimento e analisou-se o arrefecimento, Figura 66 e Figura 67.



Figura 66 – 9º ensaio



Figura 67 – Posicionamento 9º ensaio

No Figura 68, pode verificar-se que o tempo de aquecimento usado não foi suficiente já que as temperaturas de partida não são uniformes em todos os provetes.

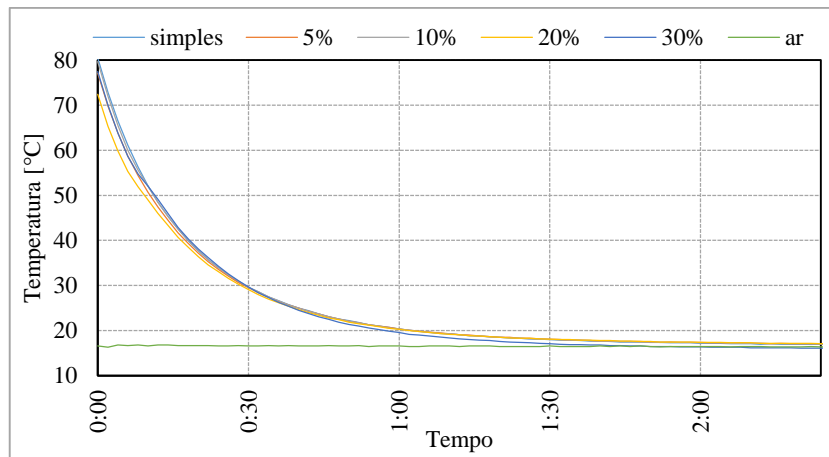


Figura 68 - Representação das temperaturas no 9ºensaio

No **8ºensaio**, abril, segundo dos provetes com Parafina, fez-se um teste de aquecimento em que se colocaram os provetes em A2 à temperatura de 105°C, monitorizando a temperatura desde o ligar da estufa até observar uma uniformização da temperatura dos provetes.

Observando o Figura 69, pode concluir-se que os provetes com Parafina necessitam de mais tempo que os de Octadecano para estabilizarem, cerca de 2.30 [h].

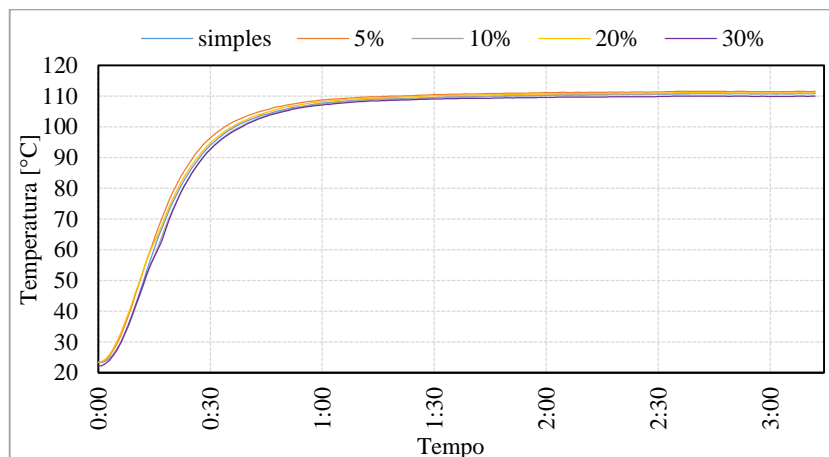


Figura 69 - Representação do aquecimento no 10ºensaio

### 3.2.2 – Modelos de teste

Para análise dos modelos de teste fizeram-se sete ensaios, apresentados resumidamente na Tabela 3 e Tabela 1.

Tabela 3 – Resumo dos ensaios aos modelos de teste

| Ensaio | Modelos de teste analisados | Dados Meteorologia | Funcionamento do sistema construtivo (Parede de trombe) | Cor da parede estrutural do Modelo 6 |
|--------|-----------------------------|--------------------|---|--------------------------------------|
| 1      | 1, 2, 6                     | Nenhum             | Não ventilado   | Cinzeno                              |
| 2      | 1, 2, 4, 5, 6               | Só temperatura     | Não ventilado   | Cinzeno                              |
| 3      | 1, 2, 3, 5, 6               | Só temperatura     | Não ventilado   | Cinzeno                              |
| 4      | 1, 2, 4, 5, 6               | Estação ESA        | Não ventilado   | Cinzeno                              |
| 5      | 1, 2, 3, 4, 5, 6            | Estação ESA        | Não ventilado   | Cinzeno                              |
| EF4    | 1, 2, 3, 4, 5, 6            | Estação ESTiG      | Não ventilado   | Preto                                |
| EF5    | 1, 2, 3, 4, 5, 6            | Estação ESTiG      | Ventilado   | Preto                                |

No **1ºensaio**, abril, utilizaram-se apenas três modelos teste, pois eram os únicos que estavam concluídos. Este ensaio serviu para a calibração / teste dos sistemas de aquisição de dados. No decorrer do ensaio não se obteve qualquer dado meteorológico e foi utilizada a caixa de aquisição de dados Datataker dt50.

Na Figura 70 e Figura 71, é possível ver quatro modelos de teste, embora o modelo 3 está a ser submetido a outros testes em simultâneo para outro trabalho experimental e tem uma orientação distintas.

Os modelos de teste foram devidamente posicionados, Figura 72, respeitando os sombreamentos, para não haver influência entre modelos. Na Figura 73, apresenta-se o esquema da ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 70 – 1º ensaio



Figura 71 – Posicionamento 1º ensaio

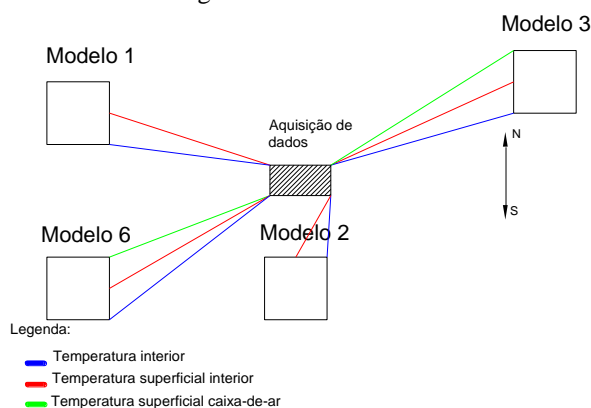


Figura 72 – Esquema do Posicionamento 1ºensaio

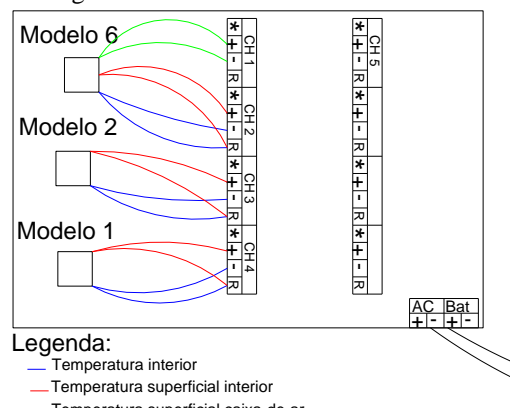


Figura 73 – Esquema de ligação 1ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 74, conseguiu-se identificar que o modelo 1 mantém a temperatura mais baixa nos picos de calor, por outro lado os modelos 2 e 3 obtiveram temperaturas muito semelhantes em que atingiram temperaturas mais altas que o modelo 1. O modelo 6 registou temperaturas intermédias já que funcionou com o sistema construtivo - parede de trombe, o que o fez aquecer mais do que o modelo 1, maciço, por outro lado a cor cinzenta fez com que não aquece-se tanto como a em argamassa cimentícia pintada de preto (simples).

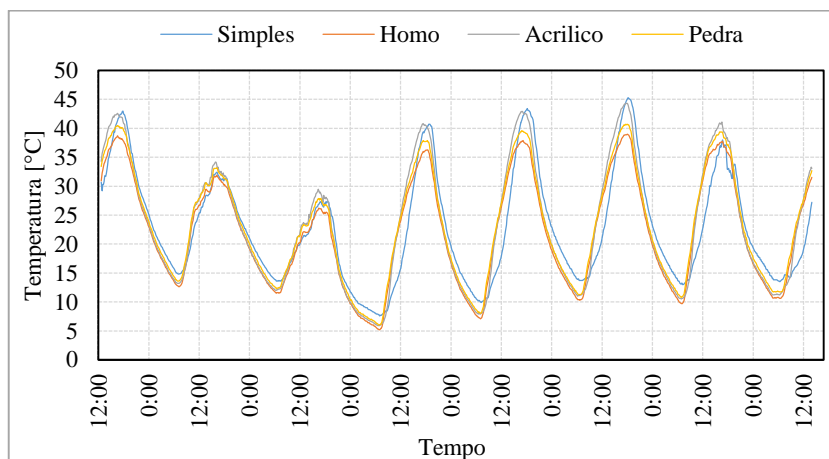


Figura 74 – Representação da temperatura interior do 1º ensaio

No **2º ensaio**, maio, utilizaram-se cinco modelos de teste, faltando apenas o modelo 3 que estava a ser utilizado para outros testes, Figura 75 e Figura 76. No ensaio utilizou-se um sensor de temperaturas exteriores que foi colocado no local do ensaio. A Figura 77 e Figura 78 representam o esquema na ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 75 – 2º teste



Figura 76 – Posicionamento 2º teste

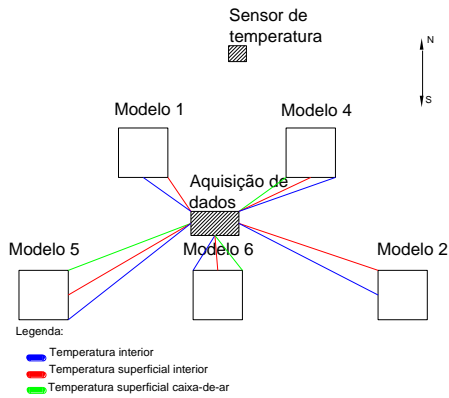


Figura 77 – Esquema do Posicionamento 2ºensaio

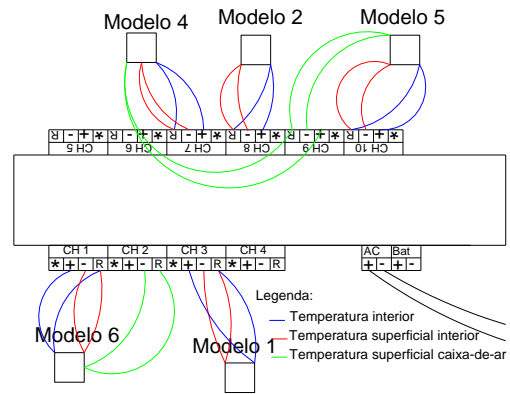


Figura 78 – Esquema de ligação 2ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 79, verificou-se novamente uma temperatura mais baixa no modelo 1 e no 6, devendo-se isto à maior capacidade de absorver energia e à cor neutra. O modelo 2 exibiu temperaturas elevadas estando acima da temperatura ambiente o que era de esperar já que a radiação faz com que a temperatura suba.

Os dois modelos com PCM's foram comparados diretamente, já se encontravam nas mesmas condições de ensaio. No entanto apresentaram resultados diferentes uma vez que o modelo 4 exibiu temperaturas muito superiores à do modelo 5, esta diferença pode dever-se aos diferentes pontos de fusão dos PCM's aplicados, já que as temperaturas atingidas foram na gama dos 45°C, valor próximo da temperatura de fusão da Parafina aplicada no modelo 5. O ponto de fusão do Octadecano aplicado no modelo 4 dá-se por volta dos 22°C, logo nesta gama de temperatura o efeito já não foi notável para o Octadecano. Por outro lado identificou-se um efeito de isolamento no modelo 5 já que este manteve temperaturas mais baixas do que o modelo 2, o que é possível perante a capacidade dos PCM's de absorver energia.

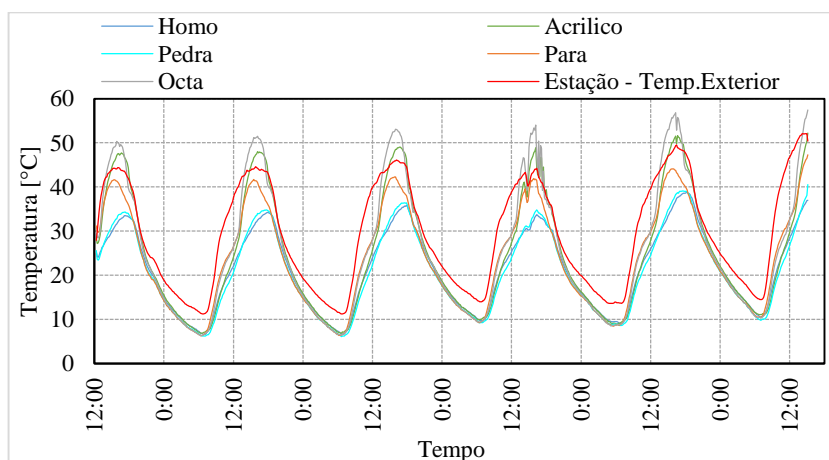


Figura 79 - Representação da temperatura interior no 2ºensaio

Observando o gráfico da Figura 80 com os valores das temperaturas atingidas em diversos pontos do modelo 6, pôde verificar-se que a temperatura na caixa-de-ar é mais baixa do que as restantes temperaturas, o que demonstra que o granito ao ser cinzento refletiu a maior parte da radiação o que levou à perda de eficiência da parede de trombe.

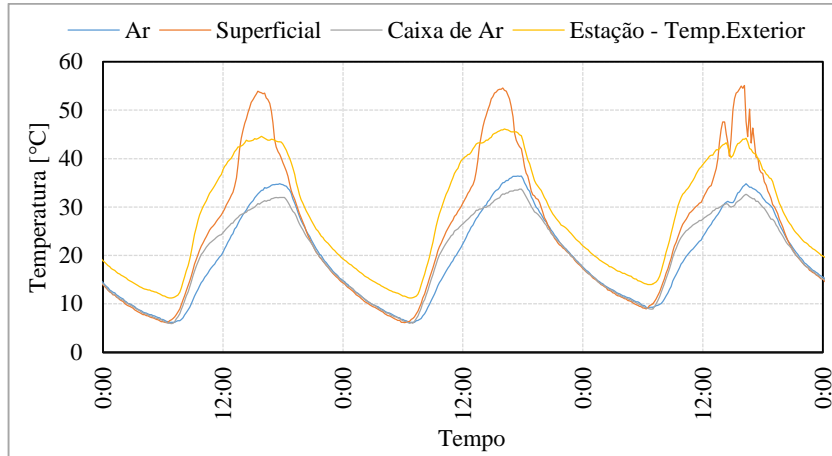


Figura 80 - Representação da temperatura interior do modelo 6, no 2º ensaio

No 3º ensaio, maio e junho, trocou-se o modelo 4 pelo modelo 3 e repetiu-se os procedimentos do ensaio anterior, Figura 81. A Figura 82 e Figura 83 representam o esquema na ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 81 – 3º ensaio

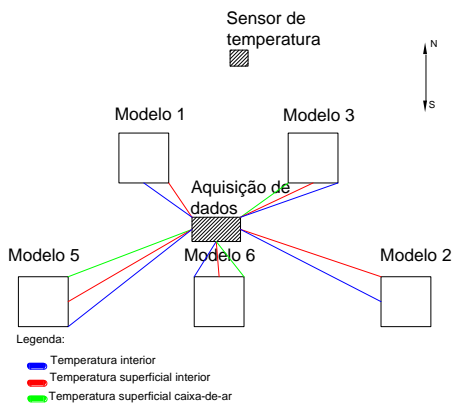


Figura 82 - Esquema do Posicionamento 3º ensaio

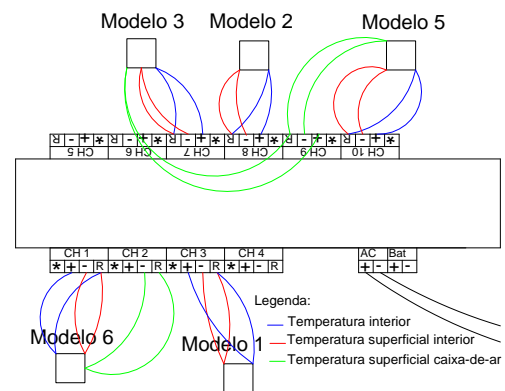


Figura 83 - Esquema de ligação 3º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 84 das temperaturas interiores dos modelos de teste, conseguiu-se observar dados bastantes consistentes, para melhoramento dos ensaios seguinte, concluiu-se também que devemos obter dados meteorológicos mais corretos.

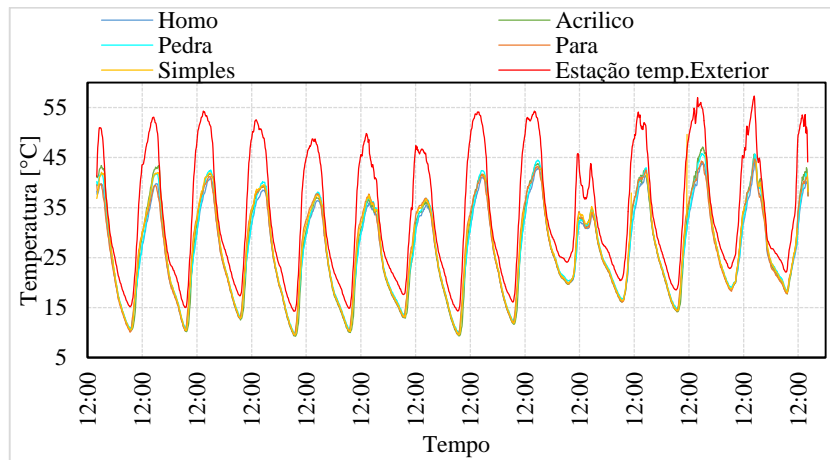


Figura 84 - Representação das temperaturas interiores no 3ºensaio

No 4ºensaio, junho, usaram-se os mesmos modelos do ensaio anterior, no entanto recorreu-se aos dados meteorológicos da estação meteorológica da ESA, Figura 85 e Figura 86. A Figura 87 e Figura 88 apresentam o esquema na ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 85 – 4º ensaio



Figura 86 – Caixa de aquisição de dados no 4ºensaio

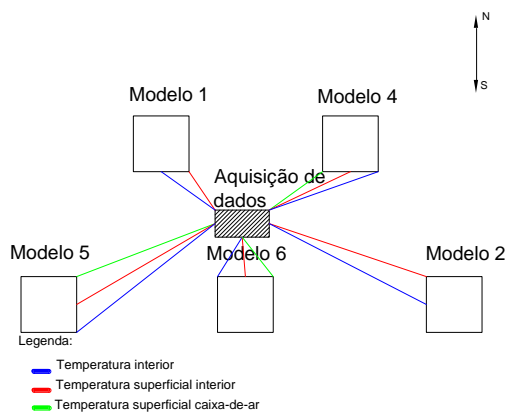


Figura 87 - Esquema do Posicionamento 4ºensaio

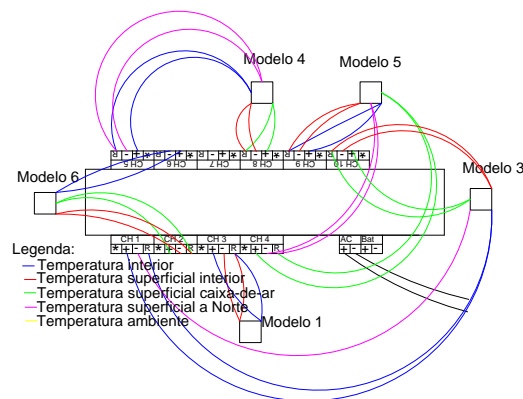


Figura 88 – Caixa de aquisição de dados no 4ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 89, verificou-se que este ensaio não é conclusivo, pois por um lado existiram lacunas nos valores dos dados de temperatura ambiente e por outro lado neste período de tempo as condições meteorológicas não foram as ideais para o estudo pretendido, uma vez que se tratou de um período muito nublado com períodos de chuva forte. O que influenciou o funcionamento das paredes de trombe, já que o seu aproveitamento apenas se verifica com o efeito da radiação solar.

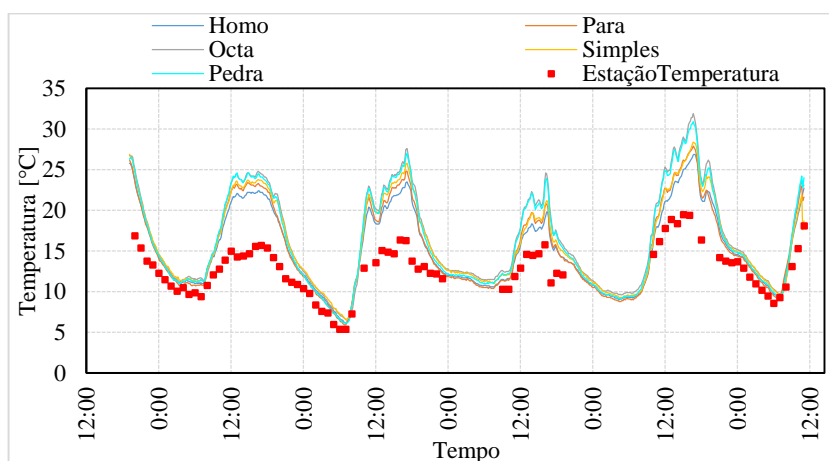


Figura 89 - Representação da temperatura interior no 4ºensaio

No **5ºensaio**, junho, usaram-se todos os modelos de teste concebidos, o que facilitou a análise comparativa, pois houve um acréscimo de dados para o aperfeiçoamento da análise, Figura 90 e Figura 91. No entanto houve uma lacuna nos dados meteorológicos que tornou a análise menos conclusiva e exata. A Figura 93 e Figura 94 representam o esquema na ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 90 – 5º ensaio



Figura 91 – Posicionamento no 5ºensaio

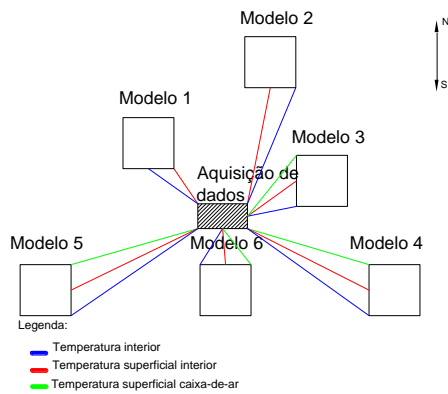


Figura 92 – Esquema do Posicionamento

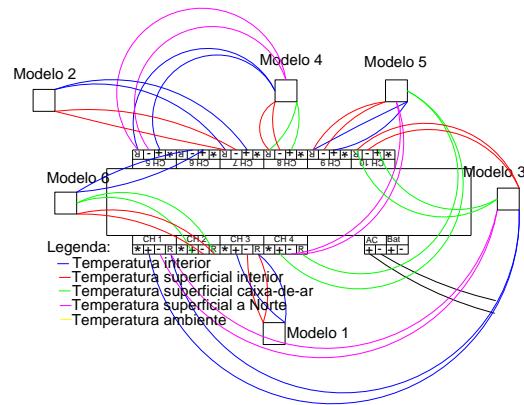


Figura 93 - Esquema de ligação

Na análise de acordo com o gráfico da Figura 94, podemos verificar que o modelo 1 continuou a ser o que apresentou a temperatura mais baixa. O modelo 5 revelou a influência do PCM, já que se obtiveram temperaturas mais baixas comparativamente outros modelos com o mesmo layout. No modelo 4 não se fez sentir a influência do PCM pois obteve-se valores de temperaturas semelhantes aos restantes modelos.

Comparando o modelo 5 com o 6 obteve-se alguma diferença, ou seja o modelo 6 com a superfície cinzenta em comparação com a superfície preta do modelo 5, ambas com espessuras distintas. O modelo 5 apresentou temperaturas inferiores nos picos de calor.

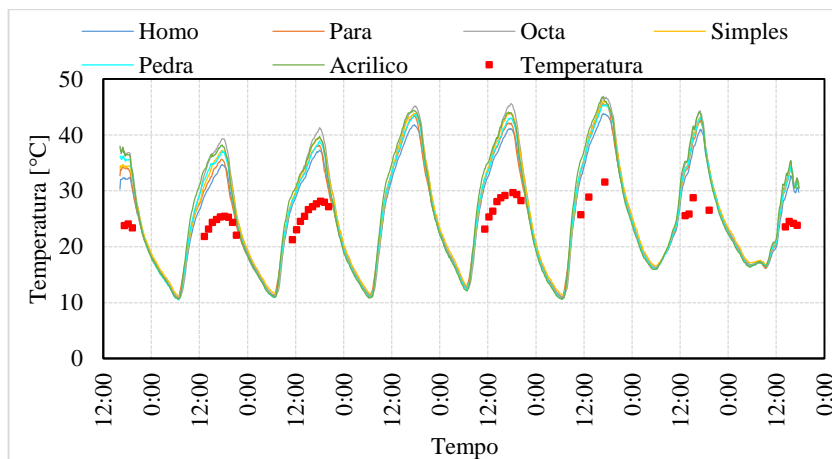


Figura 94 - Representação da temperatura interior no 5ºensaio

### 3.2.3 – Reservatórios (Termoacumuladores)

Para a análise dos reservatórios fizeram-se trinta e um ensaios apresentados resumidamente na Tabela 4.

Tabela 4 – Resumo dos ensaios dos reservatórios

| Nº ensaio | Material        | Quantidade de água   | Quantidade de elemento | Cápsula | Tipo termopar | Tipo de reservatório | Aquecimento               |
|-----------|-----------------|----------------------|------------------------|---------|---------------|----------------------|---------------------------|
| 1         | PCM             | 700 ml               | 15.08gr                | C1      | T2            | R1                   | A1                        |
| 2         | PCM             | 700 ml               | 15.08gr                | C1      | T2            | R1                   | A1                        |
| 3         | PCM             | 700 ml<br>trocar 20% | 15.08gr                | C1      | T2            | R1                   | A1                        |
| 4         | PCM             | 700 ml               | 3.44gr                 | C2      | T1            | R1                   | A1                        |
| 5         | PCM/Banha       | 1000 ml              | 3.44gr/mesmo<br>volume | C2      | T1            | R2                   | A1                        |
| 6         | PCM/Banha       | 1000 ml              | 3.44gr/mesmo<br>volume | C2      | T1            | R2                   | A1                        |
| 7         | PCM/Banha       | 600 ml               | 3.44gr/mesmo<br>volume | C2      | T1            | R2                   | A1                        |
| 8         | PCM/Banha       | 400 ml               | 3.44gr/8.90gr          | C2      | T1            | R3                   | A1                        |
| 9         | PCM/Banha       | 400 ml               | 3.00gr/8.90gr          | C2      | T1            | R3                   | A1                        |
| 10        | PCM/Banha       | 400 ml               | 3.00gr/8.90gr          | C2      | T1            | R3                   | A1                        |
| 11        | PCM/Banha       | Teste                | Teste                  | C2      | T1            | R3                   | A1                        |
| 12        | PCM/Banha       | 400 ml               | 15.52gr/33.67<br>gr    | C1      | T1            | R3                   | A1                        |
| 13        | PCM/Banha       | 400 ml               | 15.5gr/31.7gr          | C1      | T1            | R3                   | A1                        |
| 14        | PCM/Banha       | 400 ml               | 5.6gr/15.53gr          | C3      | T1            | R3                   | A1                        |
| 15        | PCM/Banha       | 200 ml               | 5.6gr/15.53gr          | C3      | T1            | R3                   | A1                        |
| 16        | PCM/Banha       | 200 ml               | 5.6gr/15.53gr          | C3      | T1            | R3                   | A1                        |
| 17        | PCM/Banha       | 200 ml               | 15.21gr/31.30<br>gr    | C1      | T1            | R3                   | A1                        |
| 18        | PCM/Banha       | 200 ml               | 15.21gr/31.30<br>gr    | C1      | T1            | R3                   | A1                        |
| 19        | PCM/Banha       | 400 ml               | 12gr/15gr              | C2      | T2            | R3                   | A1                        |
| 20        | PCM/Banha       | 200 ml               | 12gr/15gr              | C2      | T2            | R3                   | A1, com 2º                |
| 21        | PCM/Banha       | 200 ml               | -/-                    | C1      | T2            | R3                   | A1, com 2º                |
| 22        | PCM/Banha       | 200 ml               | -/-                    | C2      | T2            | R3                   | A2                        |
| 23        | PCM/Banha       | 600 ml               | -/-                    | C2 e C3 | T2            | R1, R2 e R3          | A2                        |
| 24        | PCM/Banha       | 500 ml e<br>600 ml   | 3.45gr                 | C2 e C3 | T2            | R1 e R5              | A2                        |
| 25        | PCM/Banha       | 500 ml e<br>600 ml   | 3.45gr                 | C2 e C3 | T2            | R2 e R4              | A2                        |
| 26        | PCM/Banha       | 500 ml e<br>600 ml   | 3.45gr                 | C2 e C3 | T2            | R2 e R4              | A2, durante<br>mais tempo |
| 27        | PCM/Banha       | 200 ml e<br>300 ml   | 3.45gr                 | C2 e C3 | T2            | R4 e R5              | A2                        |
| 28        | PCM/Banha       | 200 ml e<br>300 ml   | 3.45gr e<br>6.9gr      | C2      | T2            | R4 e R5              | A2                        |
| EF6       | PCM/Banha       | 200 ml               | 30 ml                  | C2      | T2            | R5                   | A2                        |
| EF7       | PCM's/<br>Banha | 10 ml                | 9 ml                   | C3      | T2            | R5                   | A2                        |
| EF8       | PCM/Banha       | 10 ml                | 10 ml                  | C3      | T2            | R5                   | A2                        |

No **1ºensaio**, abril, colocou-se o PCM - Parafina no interior de um balão (C1) que se introduziu num reservatório do tipo R1, colocou-se ainda nas mesmas condições um reservatório só com água, ambos os reservatórios continham um peso para fixação de elementos. Os dois reservatórios serviram para se fazer uma comparação entre um reservatório com água e PCM e outro somente com água.

O ensaio consistiu num aquecimento, com recurso ao banho-maria e a um arrefecimento fora do banho-maria as condições ambientes do Laboratório. Utilizou-se um volume de 700 [ml]

de água com 15,08 [gr] de PCM - Parafina. A monitorização fez-se com termopares situados no topo da água, pois foi o ponto onde se registou uma maior temperatura, Figura 95 e Figura 96.



Figura 95 – 1º ensaio aquecimento

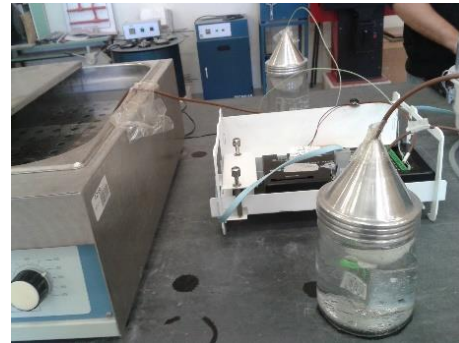


Figura 96 – 1º ensaio arrefecimento

Através do gráfico da Figura 97 pode verificar-se que o reservatório com PCM – Parafina demonstra temperaturas superiores às registadas no reservatório que apenas tem água, durante um grande período de tempo. No decorrer do ensaio o peso que segurou o PCM - Parafina não foi suficiente o que levou com que o PCM não ficou totalmente submerso, não podendo ser totalmente considerado este ensaio.

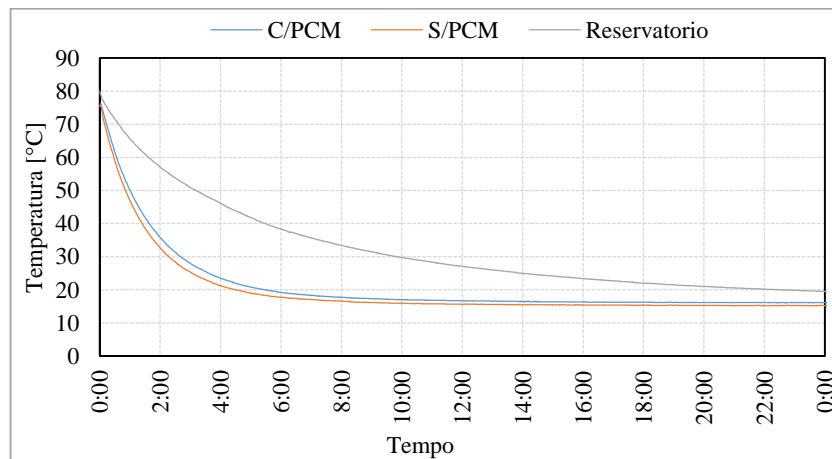


Figura 97 - Representação da temperatura interior para o 1º ensaio

O **2º ensaio**, abril, fez-se com as mesmas condições do ensaio anterior, apenas se alterou o tipo de peso para manter o PCM-Parafina submerso, Figura 98 e Figura 99.



Figura 98 – Cápsula no 2º ensaio



Figura 99 – 2º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 100, verificou-se um resultado muito semelhante ao anterior embora desta vez a cápsula encontrava-se totalmente submersa e foi notável uma rápida descida de temperatura.

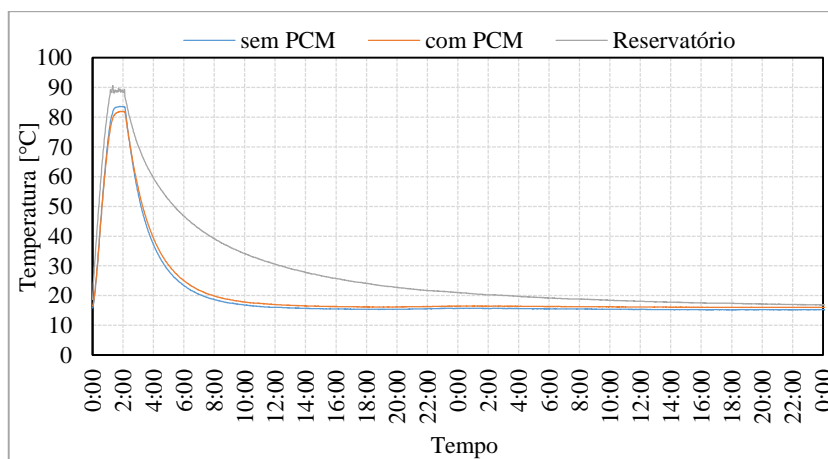


Figura 100 - Representação das temperaturas interiores para o 2º ensaio

No **3º ensaio**, abril, para evitar um arrefecimento repentino isolou-se a base dos reservatórios, para que estes não estivessem em contacto direto com a bancada para assim não perderem temperatura tão rapidamente. Os restantes componentes mantiveram-se relativamente ao segundo ensaio. Para perceber se existe alguma acumulação de energia calorífica passado aproximadamente 30 minutos do período de arrefecimento efetuou-se uma troca de 20% da água quente para água fria. Para se verificar se existe algum efeito de um reaquecimento da água, Figura 101.

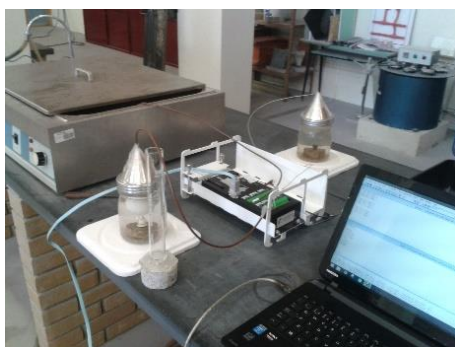


Figura 101 – 3º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 102, o terceiro ensaio revelou-se inconclusivo já que no momento em que se trocou a água, não surgiu qualquer efeito do PCM – Parafina. Obtendo-se um arrefecimento uniforme nos dois reservatórios.

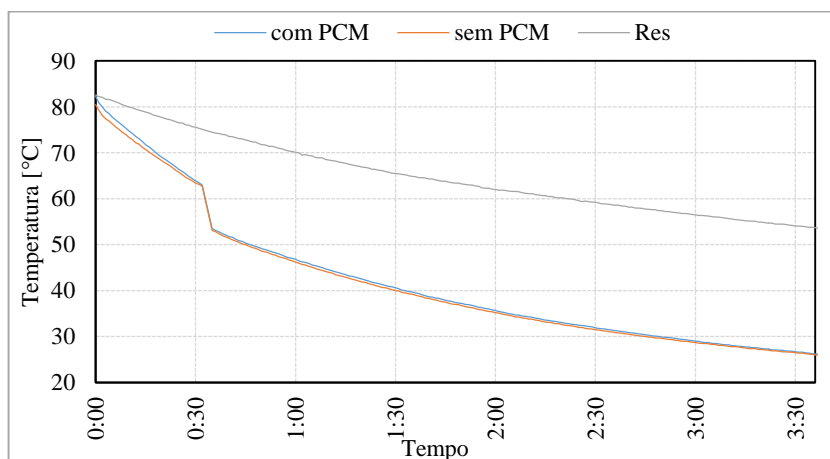


Figura 102 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 3º ensaio

No **4º ensaio**, maio, utilizaram-se novos tipos de termopar (T2), alterou-se também o tipo da cápsula, passando a ser C2 que tendo as paredes mais finas do que o balão, isto com o objetivo de melhorar a transferência de calor entre o PCM e a água do reservatório. Reduziu-se a quantidade de PCM para 3.44 [gr] já que o objetivo é chegar a um rácio entre PCM e volume de água. Colocou-se um termopar no interior da capsula para tentar obter as temperaturas diretamente no PCM. Neste ensaio retiraram-se as tampas dos reservatórios já que estas não permitiram a fixação dos termopares, Figura 103, Figura 104 e Figura 105.

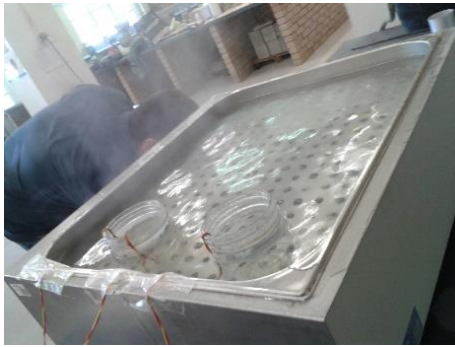


Figura 103 – 4º ensaio aquecimento

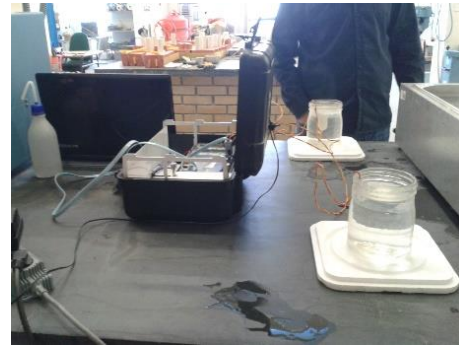


Figura 104 - 4º ensaio

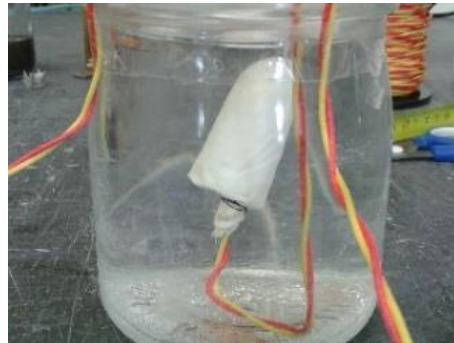


Figura 105 – Capsula no 4º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 106, na fase em que ocorreu a mudança de fase foi notável uma alteração no interior do PCM, embora esse efeito tenha desaparecido passado algum tempo, o único efeito positivo é que mesmo após algumas horas tanto o reservatório com PCM como o PCM exibem temperaturas ligeiramente mais elevadas do que as registadas no reservatório apenas com água.

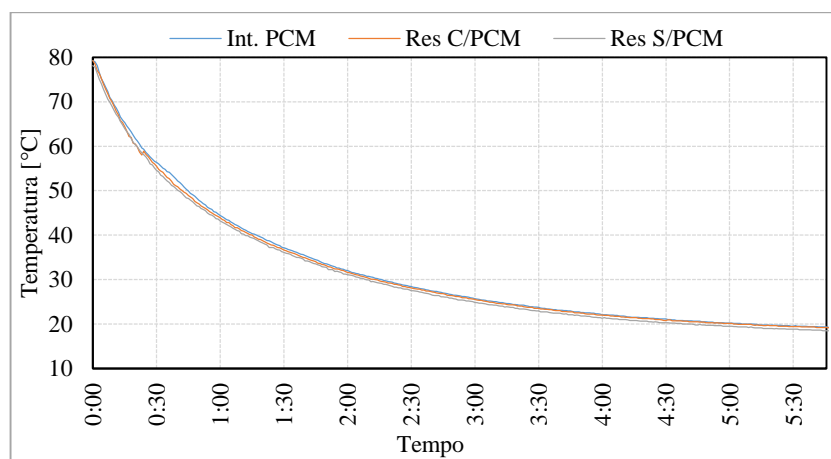


Figura 106 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior para o 4º ensaio

No **5º ensaio**, maio, introduziu-se no ensaio a banha de porco nas mesmas condições que se usou até agora o PCM, já que de acordo com estudos a banha promete ser um PCM fácil de obter e mais barato. Assim sendo comparou-se ao PCM, a banha e um reservatório apenas com água. A banha foi colocada identicamente ao PCM dentro de uma capsula do tipo C2.

Para o ensaio foi necessário mudar o tipo de reservatórios já que só existiam dois exemplares dos utilizados inicialmente, logo utilizaram-se reservatórios do tipo R2, Figura 107 e Figura 108.



Figura 107 – Aspeto da banha



Figura 108 – 5º ensaio

Com os resultados obtidos no gráfico da Figura 109 é notável uma boa influência da parte da banha mantendo-se mais quente do que o reservatório somente com água e ainda mais quente do que o PCM, embora seja uma diferença mínima.

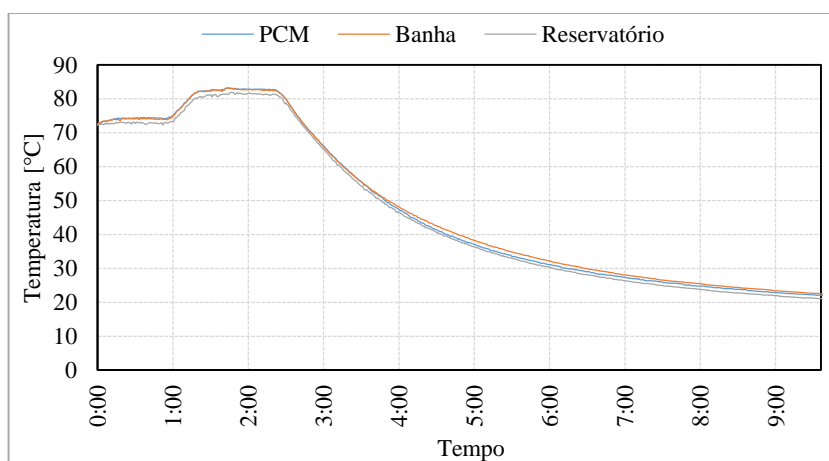


Figura 109 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior do 5º ensaio

No **6º ensaio**, maio, alterou-se a metodologia, deixando os reservatórios dentro do banho-maria em vez de os retirar para fora, minimizando assim o movimento dos reservatórios e possíveis alterações introduzidas pela movimentação destes. Para retirar a água do banho-maria abriu-se uma válvula que retirou a água quente lentamente. Utilizou-se um volume de 1 [l] de água, Figura 110 e Figura 111.



Figura 110 – 6º ensaio



Figura 111 – Despejo da água

No gráfico da Figura 112 conseguiu-se identificar alguma influência tanto do PCM como da banha, sendo que mantiveram a água dos reservatórios ligeiramente mais quente ao longo do tempo, embora essa diferença seja muito pequena.

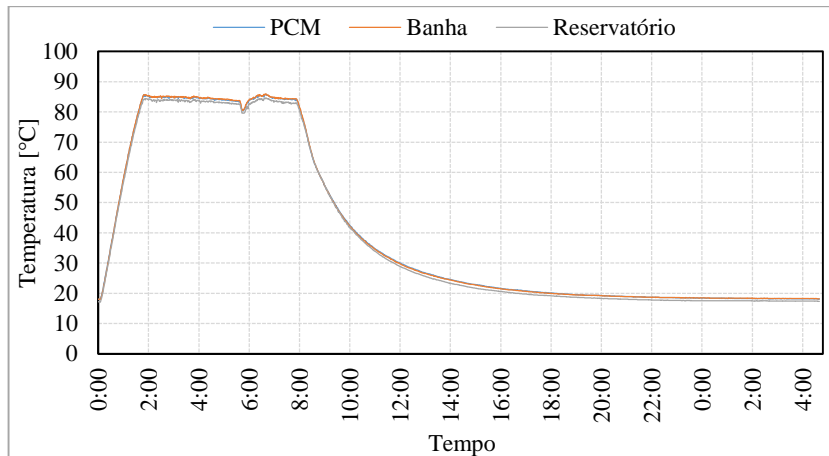


Figura 112 - Representação da temperatura interior no 6º ensaio

No **7º ensaio**, maio, alterou-se a quantidade de água no reservatório passando a ser 600 [ml], para se obter o melhor rácio possível entre o PCM /banha usados e a quantidade de água dos reservatórios. Mantiveram-se em relação ao ensaio anterior, as restantes características do ensaio, Figura 113 e Figura 114.



Figura 113 – Posicionamento no 7º ensaio



Figura 114 – 7º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 115, este ensaio comparativamente ao anterior o efeito observado é maior, logo pensamos estar a proceder corretamente no ensaio ao retirar o volume de água.

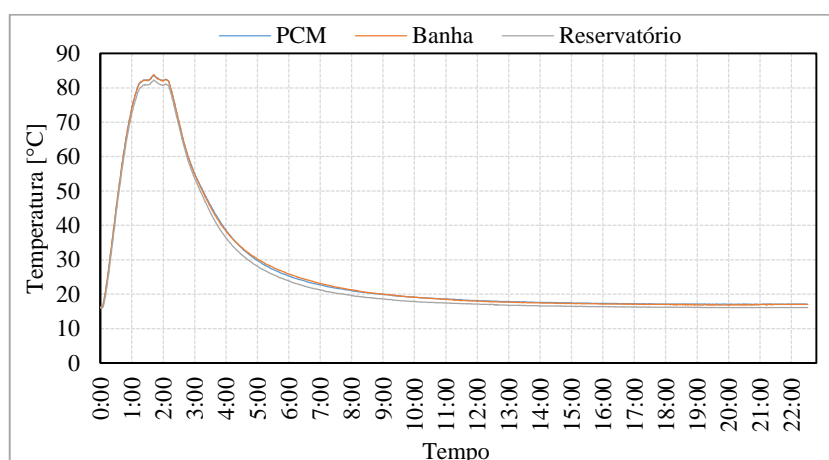


Figura 115 - Representação da temperatura interior no 7º ensaio

No **8º ensaio**, maio, mudaram-se os tipos de reservatórios já que nos anteriores o fecho era difícil e não dava para reduzir a quantidade de água de modo a que o PCM / banha ficassem submersos. Passou-se a utilizar reservatórios do tipo R3. Reduziu-se a quantidade de água para 400 [ml] mantendo-se o tipo de capsula e quantidade de PCM / banha, Figura 116 e Figura 117.

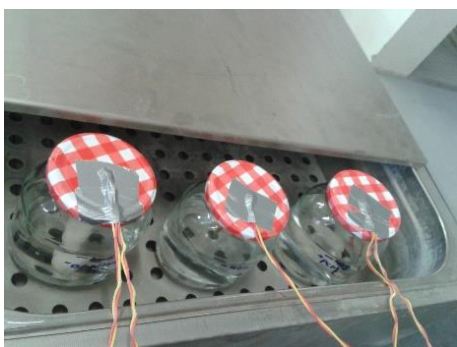


Figura 116 – Posicionamento no 8º ensaio



Figura 117 – 8º ensaio

No gráfico da Figura 118 não se conseguiu distinguir qualquer diferença entre os diferentes tipos de reservatórios não se enquadrando nos resultados obtidos anteriormente.

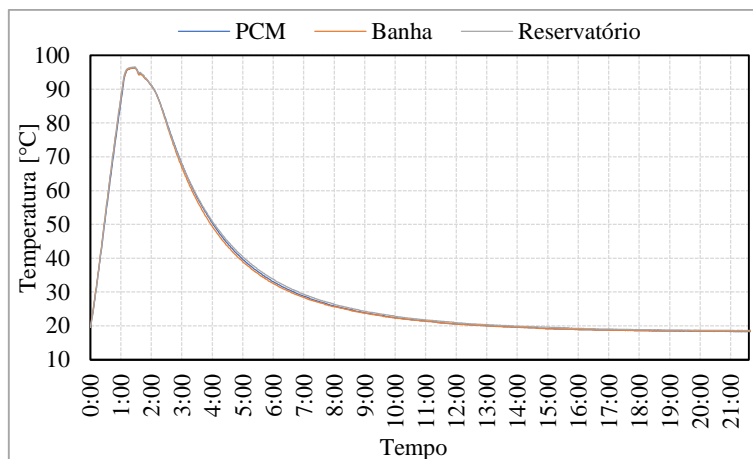


Figura 118 - Representação da temperatura interior no 8ºensaio

No **9ºensaio**, maio, devido aos valores inconclusivos obtidos no ensaio anterior repetiu-se o ensaio com as mesmas condições do oitavo ensaio.

De acordo com o gráfico da Figura 119 existiu uma pequena alteração em relação ao ensaio anterior, onde o reservatório vazio demonstrou uma temperatura mais alta, o que não era de esperar. Por outro lado notaram-se algumas irregularidades no período de aquecimento. Monitorizou-se também a água no interior do banho-maria para verificação de possíveis irregularidades, que não ocorreram.

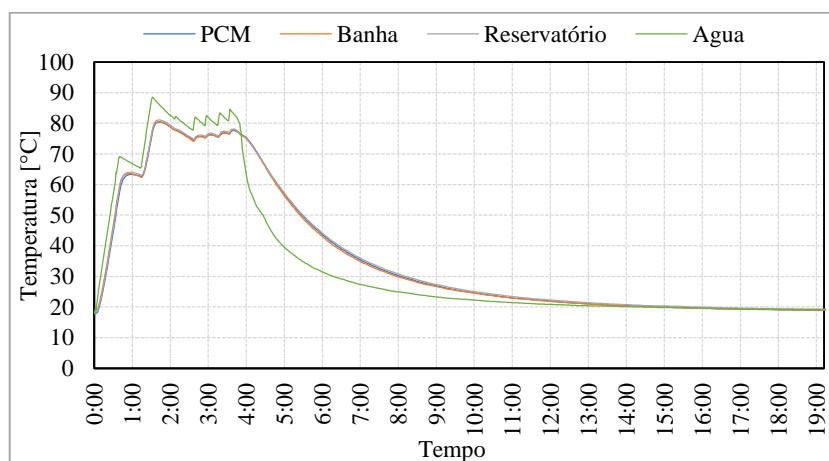


Figura 119 - Representação da temperatura interior no 9ºensaio

No **10ºensaio**, maio, para se fazer um despiste dos dados anormais obtidos nos dois últimos trocou-se a posição dos reservatórios, para se descobrir se o posicionamento influenciou as temperaturas obtidas.

Como apresentado no gráfico da Figura 120 com a troca identificou-se que o PCM apresenta uma temperatura ligeiramente superior, daí pôde-se concluir que o posicionamento dos reservatórios no interior do banho-maria tem influência nos resultados obtidos.

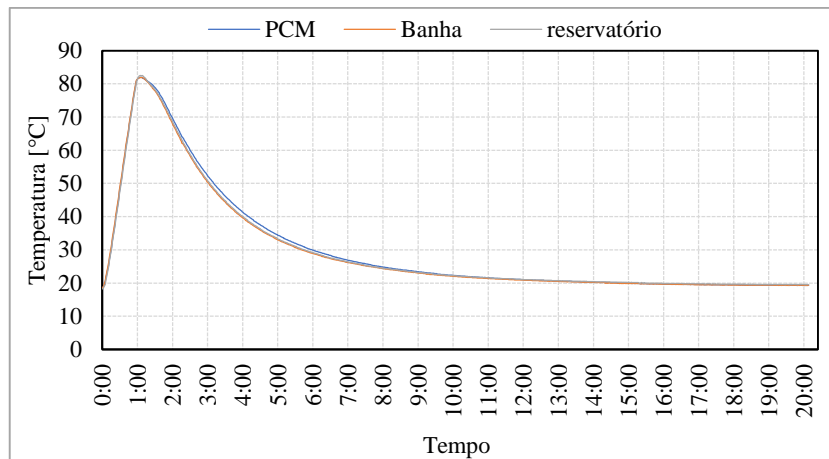


Figura 120 – Representação da temperatura interior do 10º ensaio

No **11º ensaio**, junho, como no ensaio anterior se observou que a posição influencia os resultados obtidos. Fez-se um teste do posicionamento com ajuda de termômetros e termopares identificando-se as posições em que a temperatura era a mesma, Figura 121 e Figura 122.



Figura 121 – Posição desfavorável

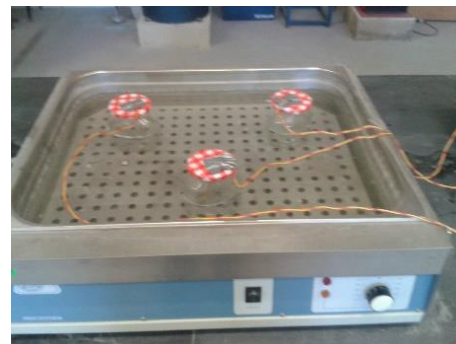


Figura 122 – Posição favorável

Na Figura 123 está representado o posicionamento original e depois algumas experiências efetuadas até encontrar a melhor solução para se obter temperaturas uniformes. Ficando então daqui em diante definido a utilização da melhor solução uma vez que foi a que demonstrou temperaturas mais constantes.

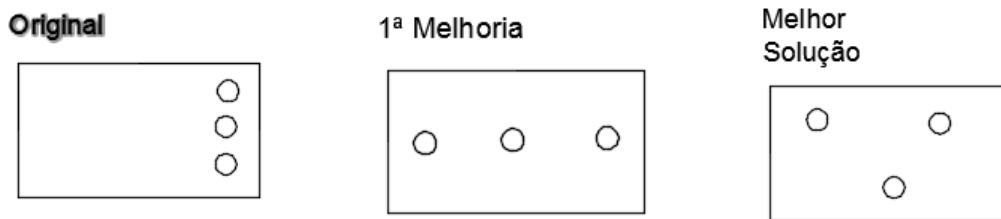


Figura 123 - Representação do posicionamento dos reservatórios no 11ºensaio

No **12ºensaio**, junho, fez-se de acordo com o novo posicionamento definido no ensaio anterior. O teste fez-se com os balões (C1) de PCM e de banha fazendo uns “ganchos” para se poder manter os balões submersos. Utilizou-se 400 [ml] de água nos reservatórios, Figura 124 e Figura 125.



Figura 124 - Capsula



Figura 125 – 12º ensaio

Durante a utilização do banho-maria observou-se algumas anomalias, sendo que o termostato não estava a funcionar na perfeição, mesmo assim obteve-se dados, que de acordo com o gráfico da Figura 126 demonstraram algum efeito da banha mantendo-se mais quente durante algum tempo, embora esse efeito fosse muito pequeno. No final do ensaio a capsula que continha a banha rompeu o que levou a mistura da banha com a água do reservatório.

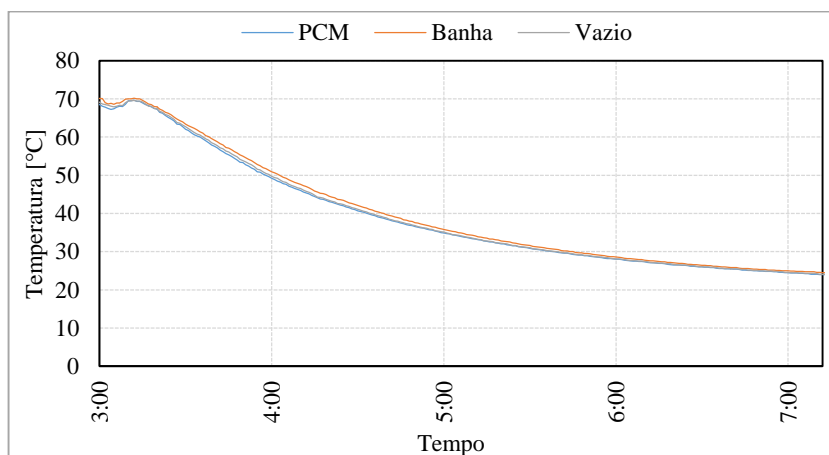


Figura 126 - Representação da ampliação da variação das temperaturas no 12ºensaio

No **13º ensaio**, junho, repetiu-se o ensaio anterior, pois o balão que continha a banha corroe, repetiu-se o ensaio com um balão novo.

Os valores de temperatura registados devem ser retificados, pois como já se havia observado em ensaios anteriores existiram algumas falhas no aquecimento, como por exemplo mudanças repentinas de temperaturas. Na preparação do ensaio o banho-maria apresentou problemas o que levou a uma manutenção forçada e que fez com que o termostato não ficasse a funcionar corretamente, logo os dados recolhidos a partir deste momento vem com variações de temperaturas mais acentuadas devido a falta de precisão do termostato, Figura 127.



Figura 127 – 13º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 128 as temperaturas registadas exibem algumas irregularidades que eram de esperar, os resultados não são muito conclusivos embora no gráfico identifique um pequeno ressalto na banha por volta dos 25°C o que pode ser indício do seu ponto de fusão.

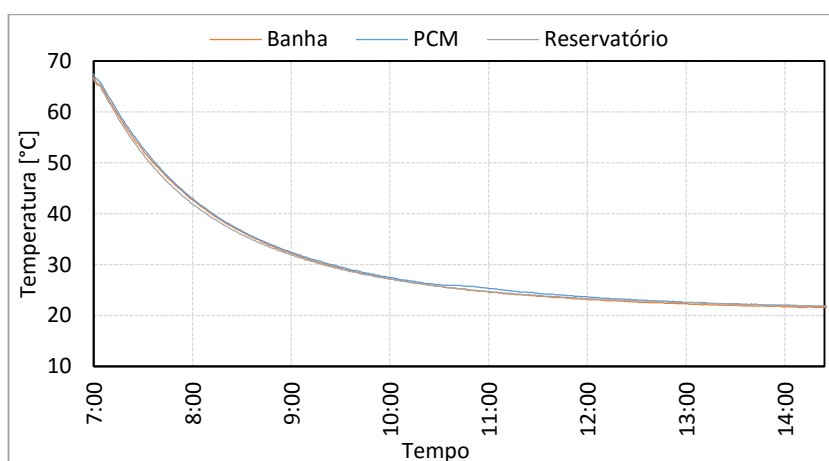


Figura 128 - Representação da ampliação da variação de temperatura no 13º ensaio

No **14º ensaio**, junho, como se analisou em ensaios anteriores o modo como a banha corroe as capsulas tentou-se fazer uma capsula em vidro, isto trouxe outras vantagens como a transferência de calor já que o vidro é um bom transmissor de calor e é pesado evitando o uso de pesos ou ganchos para segurar as capsulas. Os frascos continham cerca de 15 [ml] e

utilizou-se 400 [ml] de volume de água nos reservatórios, Figura 129, Figura 130 e Figura 131.



Figura 129 – Capsula usada no 14º ensaio



Figura 130 – Reservatório 14º ensaio

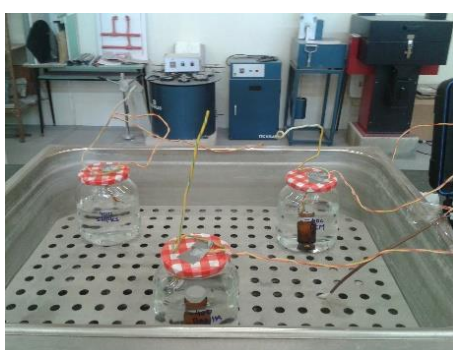


Figura 131 – 14º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 132, observou-se que com estas capsulas não apresentaram qualquer vantagem na utilização dos PCM / banha. Isto pode dever-se a vários fatores, tais como: a insuficiência de PCM para a quantidade de água ou a falta de transmissividade da capsula de vidro.

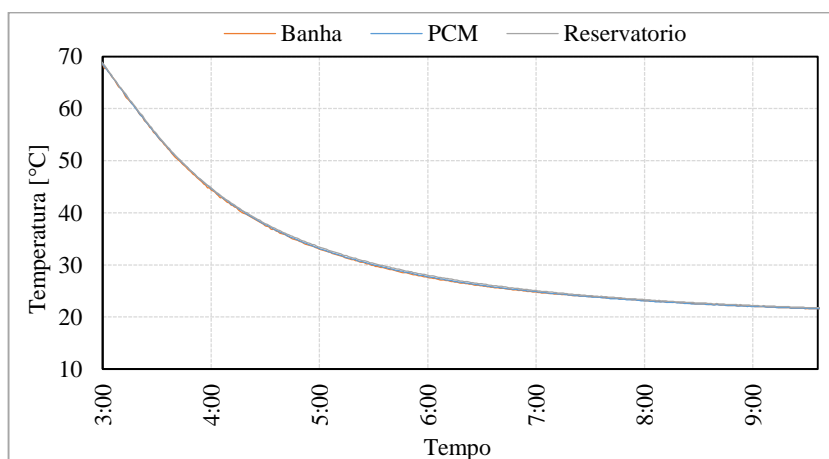


Figura 132 - Representação da ampliação da variação da temperatura no 14º ensaio

No **15º ensaio**, junho, o objetivo foi o de encontrar um rácio entre quantidade de água e PCM / banha reduziu-se o volume de água do reservatório para 200 [ml], com o objetivo de se obter melhores resultados, Figura 133 e Figura 134.

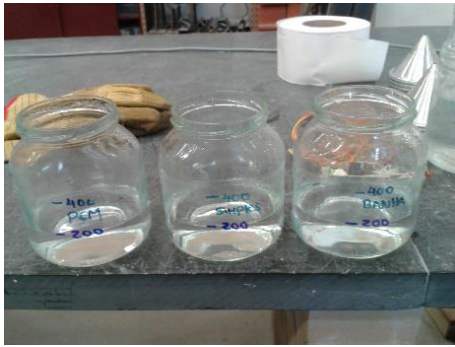


Figura 133 – Reservatório 15ºensaio

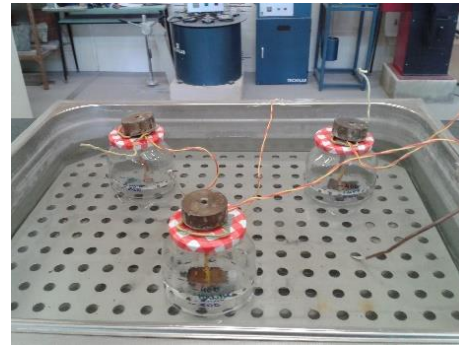


Figura 134 – 15º ensaio

Com a representação ilustrada no gráfico da Figura 135 pôde ver-se que houve a falta de resultados positivos, concluindo que se deve aumentar período de aquecimento dos reservatórios.

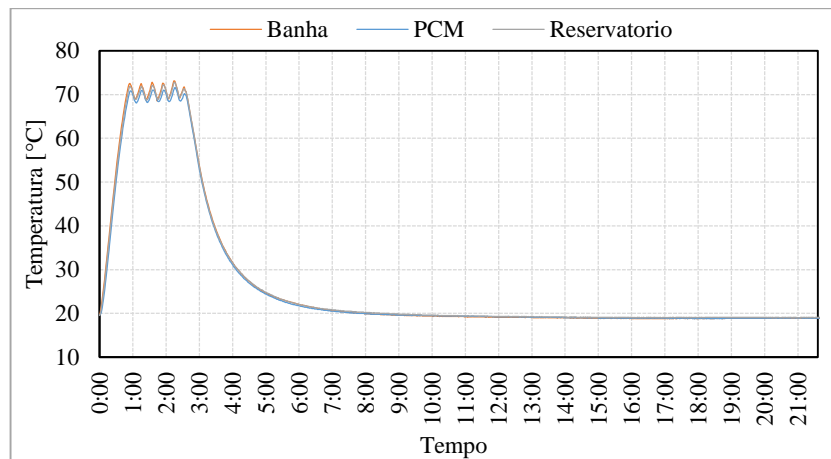


Figura 135 - Representação da temperatura interior no 15ºensaio

O 16ºensaio, junho, foi a última tentativa de obter resultados com as capsulas do tipo C3 sujeitando-se os provetes as mesmas condições do ensaio anterior, no entanto, a um tempo mais longo de aquecimento de sensivelmente 8 [h]. De acordo com o gráfico da Figura 136, faltam novamente resultados positivos.

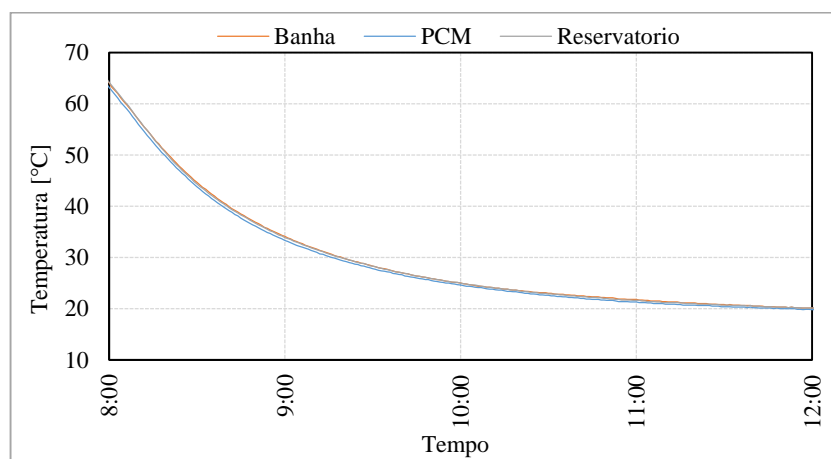


Figura 136 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 16ºensaio

No **17ºensaio**, junho, uma vez que não se obteve qualquer resultado com as capsulas do tipo C3 passou-se outra vez a utilizar as capsulas do tipo C1 mantendo os 200 [ml] de água, Figura 137.

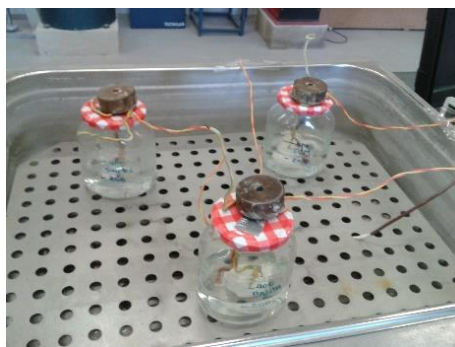


Figura 137 – 17ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 138 neste ensaio foram inequívocos os dados já que apresentavam o PCM como sendo o componente que mais frio se encontrava, teoricamente estes resultados eram contraditórios o que levou a repensar o conceito e a duvidar nos dados obtidos até esta fase.

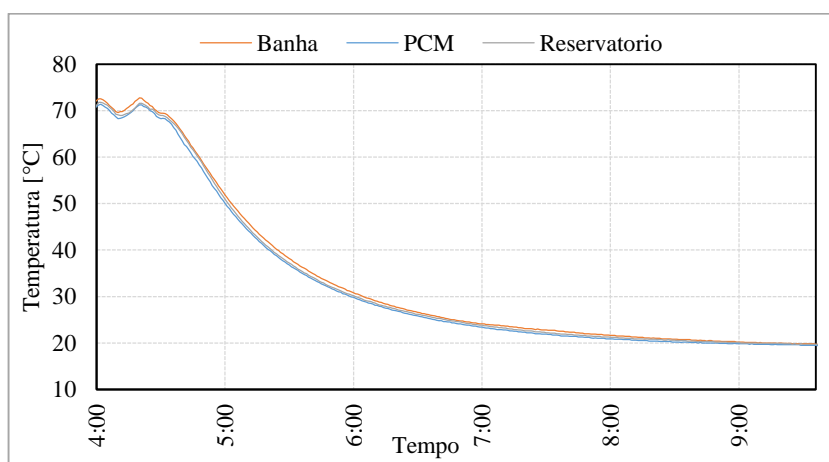


Figura 138 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 17ºensaio

No **18ºensaio**, junho, depois de se procurarem explicações para o que levava a dados no mínimo duvidosos chegou-se à conclusão que os termopares não são adequados para a utilização em meio aquoso, já que o seu isolamento permitiu a infiltração de água e assim alterou as características do termopar fazendo com que os valores sejam duvidosos. Com isto, repetiu-se o ensaio anterior com termopares do tipo T2, já que estes continham uma camada de isolamento impermeável, para se observar se assim os valores são mais fidedignos, Figura 139.



Figura 139 – 18ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 140 foi-se ao encontro do esperado teoricamente, embora as diferenças sejam mínimas, ou seja a banha esta mais quente que o PCM que por sua vez esta mais quente que o reservatório apenas com água

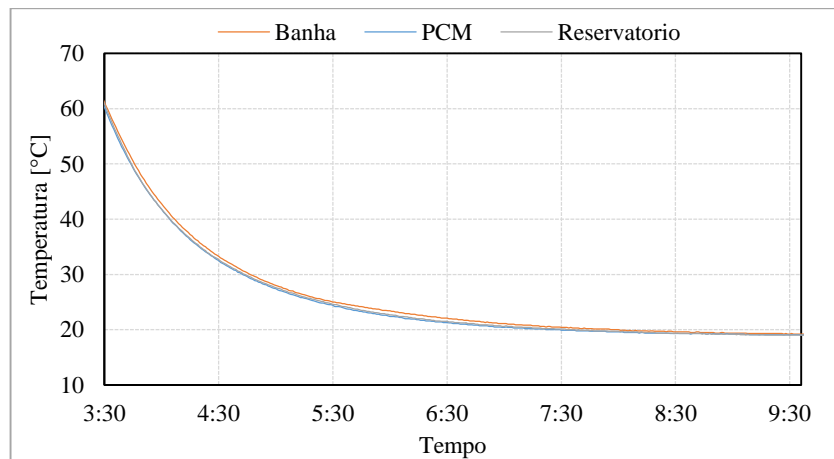


Figura 140 - Representação da ampliação da variação da temperatura no interior do 18ºensaio

No **19ºensaio**, junho, após de concluir no ensaio anterior que os termopares estão a funcionar corretamente, fez-se o ensaio com o tipo T2. A capsula trocou-se novamente para o tipo C2 já que as razões que levaram a abandonar o seu uso podem ter sido influenciadas pelo uso dos termopares com leituras incorretas, Figura 141 e Figura 142.

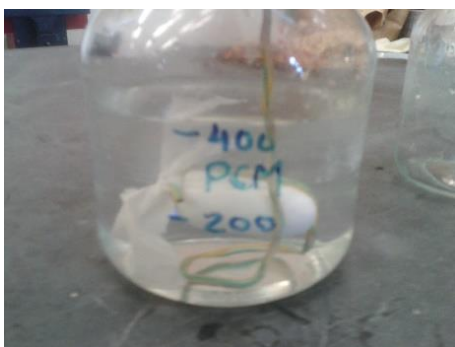


Figura 141 – Capsula 19ºensaio

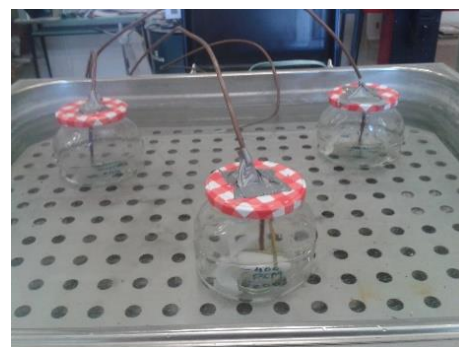


Figura 142 – 19ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 143 os dados continuavam tal como no último ensaio a demonstrar alguma estranheza principalmente nos patamares superiores, ou seja no aquecimento, já que as temperaturas não eram iguais em todos os componentes antes de iniciar o arrefecimento. A explicação para isto foi que o posicionamento não foi o ideal e que com a avaria do banho-maria as diferentes zonas deste apresentavam temperaturas diferentes.

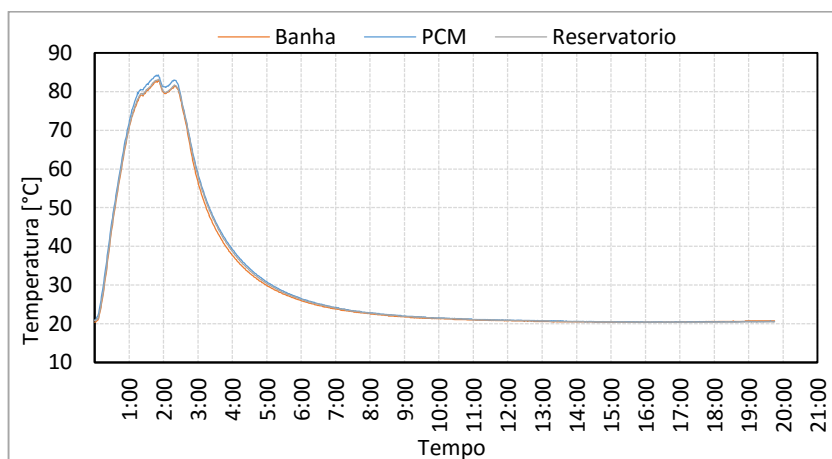


Figura 143 - Representação da temperatura interior no 19º ensaio

No **20º ensaio**, junho, como os dados dos ensaios anteriores continuavam influenciados pelo posicionamento no banho-maria, fez-se um segundo banho-maria dentro do primeiro para tentar estabilizar a temperatura em toda a área. Para tal utilizou-se um recipiente em ferro zincado que se encheu com água e depois colocou-se dentro do banho-maria. Para o arrefecimento os reservatórios foram retirados do banho-maria e colocados numa plataforma, deixados a arrefecer à temperatura ambiente do laboratório, Figura 144 e Figura 145.



Figura 144 – Aquecimento no 20º ensaio



Figura 145 – Arrefecimento no 20º ensaio

Com esta metodologia de ensaio obteve-se, de acordo com o gráfico da Figura 146, dados interessantes já que com este banho-maria duplo foi possível manter as temperaturas muito semelhantes no aquecimento. Assim sendo na fase de arrefecimento todos os componentes apresentaram dados muito semelhantes ou até mesmo iguais. Não foi notória qualquer alteração tanto no componente com PCM como no da banha.

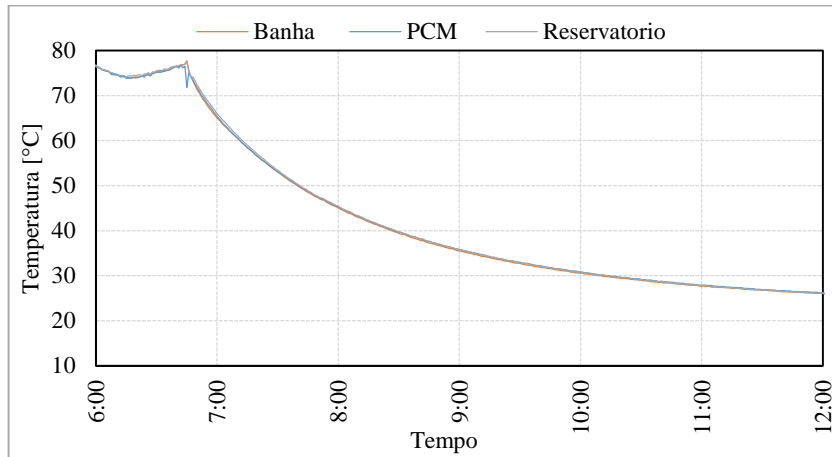


Figura 146 - Representação da ampliação da variação da temperatura interior no 20ºensaio

No **21ºensaio**, junho e julho, para confirmação da metodologia do ensaio repetiu-se o ensaio anterior nas mesmas condições para confirmação da fiabilidade do método, Figura 147.



Figura 147 – 21ºensaio

Os resultados neste ensaio, gráfico da Figura 148, foram muito semelhantes aos obtidos no anterior. Isto permite concluir que a metodologia produz resultados comparáveis embora os resultados não apresentem quaisquer dados uteis para o estudo pretendido. Parte destes resultados devem-se ao facto de o banho-maria não conseguir manter a temperatura constante.

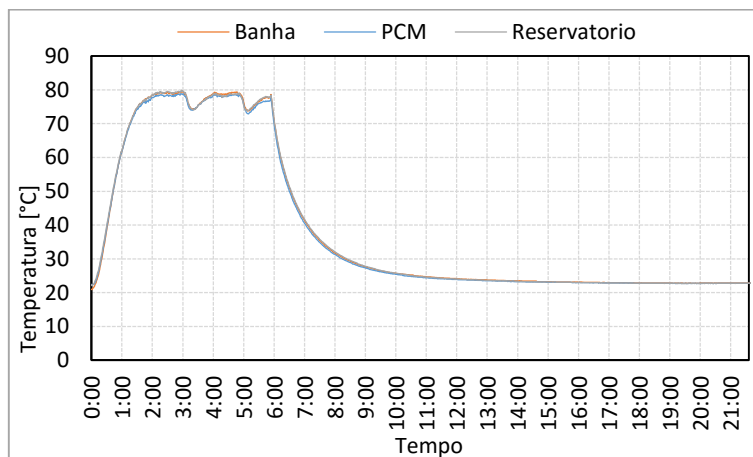


Figura 148 - Representação da temperatura interior no 21ºensaio

No **22ºensaio**, julho, como os métodos anteriores não se revelaram fiáveis, uma vez que o termostato não conseguia manter uma temperatura constante optou-se por outra alternativa que recaiu pelo forno/estufa (A2) que permitiu manter uma temperatura constante durante um grande período de tempo. Logo passou-se toda a operação de ensaios para o aquecimento do tipo A2.

Este primeiro ensaio sobre estas condições efetuou-se em reservatórios do tipo R3, com a capsula do tipo C2 com 12 [gr] de PCM e 15 [gr] de banha. O volume de água utilizado foi de 200 [ml]. Foram introduzidas delimitações para impedir a influência entre os diferentes reservatórios, Figura 149.



Figura 149 – 22ºensaio

Utilizando esta nova forma de aquecimento verificou-se no gráfico da Figura 150, que o aquecimento se fez de forma muito mais continua e mantendo a temperatura pretendida durante algum tempo sem quebras. Embora no arrefecimento as temperaturas não foram as que se esperavam, já que o PCM demonstrou a temperatura mais baixa dos três reservatórios, o que não se esperava.

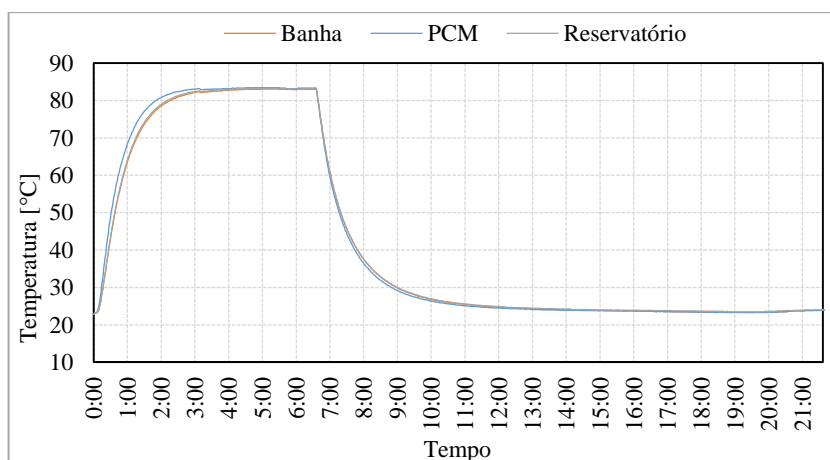


Figura 150 - Representação da temperatura interior no 22ºensaio

No **23ºensaio**, julho, como os dados obtido no ensaio anterior continuavam a não apresentar um comportamento lógico, fez-se um despiste com todos os reservatórios de uma só vez para analisar qualquer variação devido aos vários tipos de reservatórios. Para tal fez-se o ensaio com os três tipos de reservatórios e dois tipos de capsulas, Figura 151 e Figura 152.

Os reservatórios do tipo R1 com capsulas do tipo C3 e reservatórios dos tipos R2 e R3 com capsulas do tipo C2.



Figura 151 – 23ºensaio



Figura 152 – 23ºensaio

No gráfico da Figura 153 verificou-se que o processo de aquecimento não é regular o que indicou a existência de diferenças entre os reservatórios. Identificou-se que os reservatórios do tipo R3 apresentavam comportamentos diferentes, isto talvez devido à espessura do vidro que cada reservatório constituía, viciando assim os dados obtidos anteriormente.

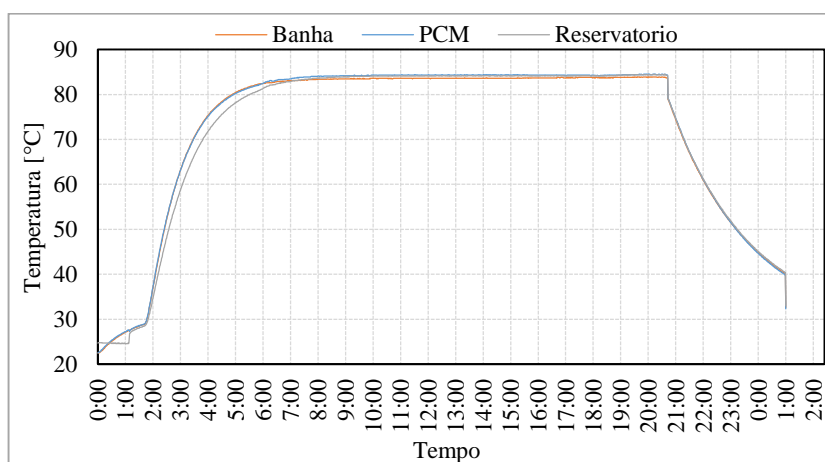


Figura 153 - Representação da temperatura dos reservatórios do tipo III no 23ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 154, nos reservatórios do tipo R2 observou-se um aquecimento muito mais uniforme do que o observado nos reservatórios do tipo R3, embora houvesse um rompimento da capsula que continha o PCM o que levou a uma perturbação nos dados apresentados para o PCM.

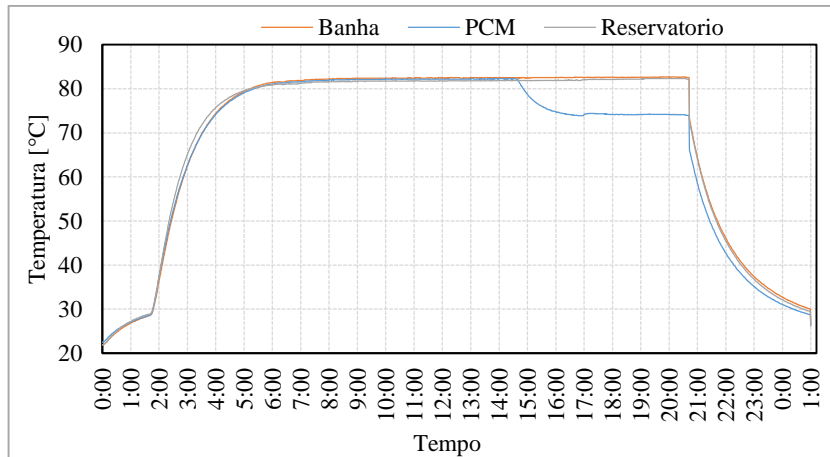


Figura 154 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo II no 23º ensaio

De acordo com o gráfico da Figura 155, os reservatórios do tipo R1 demonstraram um comportamento muito bom no aquecimento uniforme, não se podendo comparar com um reservatório simples já que só existiram dois reservatórios deste tipo.

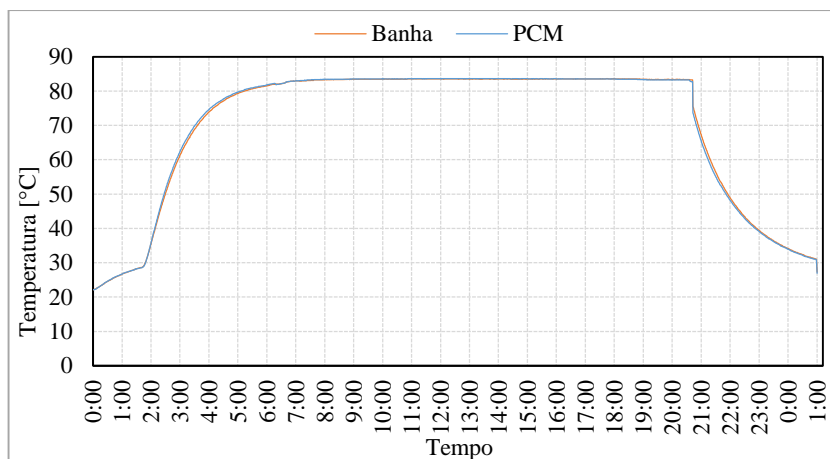


Figura 155 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo I no 23º ensaio

No **24º ensaio**, julho, chegamos à conclusão com o ensaio anterior que os frascos vermelhos não eram iguais, ou seja existiam frascos mais grossos, estes foram excluídos e prosseguiram-se os ensaios com os restantes reservatórios.

Utilizando-se os reservatórios do tipo R1 com capsula do tipo C2 e os reservatórios do R2 com o mesmo tipo de capsula. Acrescentou-se também reservatórios do tipo R4 com capsulas do tipo C3, Figura 156 e Figura 157.



Figura 156 – 24ºensaio



Figura 157 – Arrefecimento 24ºensaio

De acordo com o gráfico da Figura 158 pôde-se analisar todos os reservatórios ao mesmo tempo, identificando-se que existiram temperaturas muito diferentes nos diferentes modelos o que não era de esperar, o que levou a interrupção do ensaio não continuando com o arrefecimento.

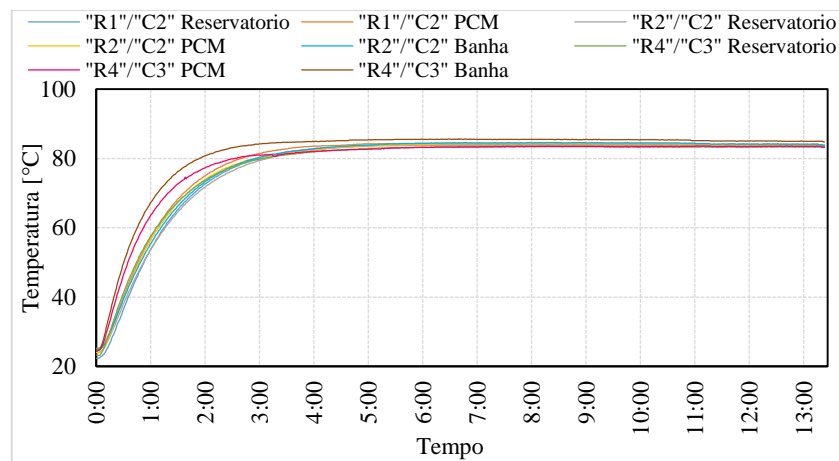


Figura 158 - Representação das temperaturas exteriores do 24ºensaio

No **25ºensaio**, julho, repetiu-se o ensaio anterior retirando os reservatórios do tipo R1 e acrescentando-se mais reservatórios do tipo R4 com as capsulas do tipo C3. Sendo assim ficou-se então com três reservatórios de cada combinação perfazendo então um total de nove reservatórios. Sendo três reservatórios do tipo R2, com 1 [l] de água, com capsula do tipo C2, três reservatórios do tipo R4, com 500 [ml] de água, com capsula do tipo C2 e três reservatórios do tipo R4 com 500 [ml] de água, com capsula do tipo C3, Figura 159, Figura 160 e Figura 161.



Figura 159 – Monitorização no 25ºensaio

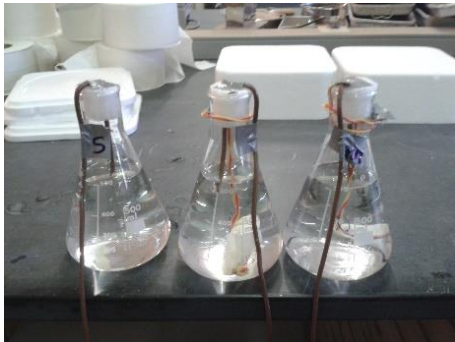


Figura 160 – Reservatórios do 25ºensaio



Figura 161 – Posicionamento no 25ºensaio

Nos três ensaios obtiveram-se dados muito semelhantes entre os diferentes componentes. Com apresentado no gráfico da Figura 162, referente aos reservatórios do tipo R4, a variação entre os diferentes tipos de configurações foram muito baixas, o que revelou a falta de influência dos PCM / banha na temperatura da água.

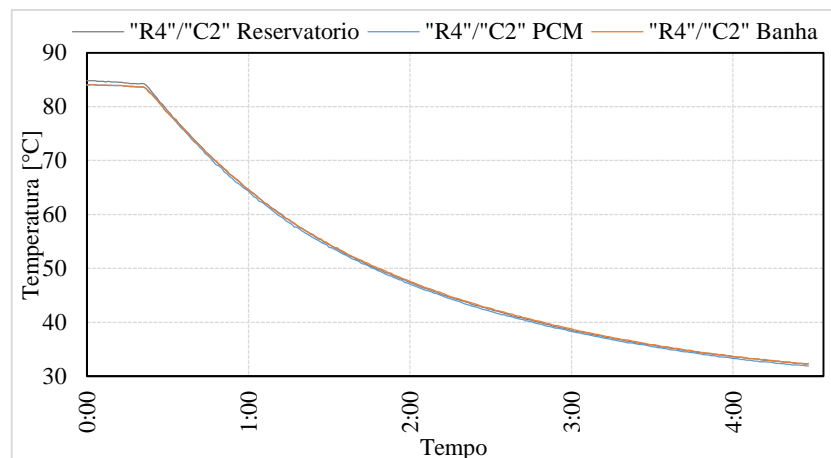


Figura 162 - Representação da temperatura interior nos reservatórios do tipo R4 24ºensaio

No **26ºensaio**, julho, repetiu-se o ensaio anterior. Verificando-se no gráfico da Figura 163 que nesta análise repetiram-se os resultados anteriores sendo que existiu uma pequena diferença entre os mesmos tipos de reservatórios, seguindo essas diferenças um padrão. Este comportamento leva a identificação que o forno tem um gradiente contrário ao posicionamento dos reservatórios o que levou a uma alteração nas medições.

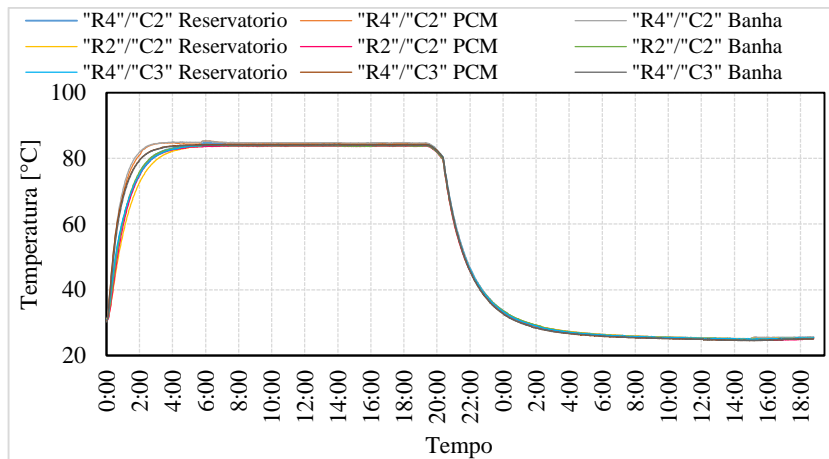


Figura 163 - Representação da temperatura interior no 26º ensaio

O **27º ensaio**, julho, consistiu num reposicionamento dos reservatórios para evitar problemas com o gradiente da estufa. Também foram retirados os reservatórios do R2 e substituídos por reservatórios do tipo R4, com 500 [ml] de água e do tipo R5 com 200 [ml] de água, já que o comportamento demonstrado foi o mesmo e o rácio pretendido necessitará da redução de água e foi mais pratico e fácil fazer isso em reservatórios com menor volume. Assim sendo neste ensaio usaram-se seis reservatórios do tipo R4, com 500 [ml] de água em que três possuem capsulas do tipo C2 e os restantes tinham capsulas do tipo C3. Os reservatórios do tipo R5 com 200 [ml] de água contenham capsulas do tipo C2 Figura 164 e Figura 165.



Figura 164 – 27º ensaio



Figura 165 – Arrefecimento 27º ensaio

Como se pode observar no gráfico da Figura 166 não existem diferenças significativas entre os diferentes ensaios. Sendo que no ciclo de arrefecimento não se apresentam diferenças entre os diferentes componentes, não existindo a influência dos PCM / banha. Assim sendo daqui em diante irá se usar reservatórios dos tipos R4 e R5 com volumes de água menores de 200 [ml] e capsulas do tipo C2.

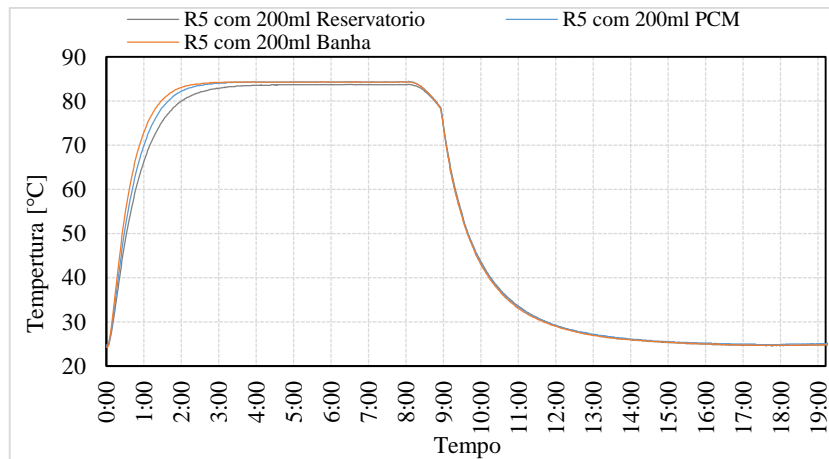


Figura 166 - Representação da temperatura interior em reservatórios do tipo R5 no 27º ensaio

No **28º ensaio**, julho, como no ensaio anterior se concluiu que o melhor funcionamento se obteve pelos reservatórios do tipo R4 com 500 [ml] e tipo R5 com 300 [ml] com a capsula do tipo C2, apenas se usaram estes reservatórios. Procedeu-se à determinação do rácio ótimo entre água e PCM, assim sendo fez se um ensaio com as mesmas condições do anterior apenas se alterou o volume de água usado, em que um reservatório continha 300 [ml] de água e outro 200 [ml], Figura 167.



Figura 167 – 28º ensaio

Analisando o gráfico da Figura 168, referente aos reservatórios com 200 [ml] de água notou-se uma ligeira alteração de temperatura na mudança de fase embora isto fosse registado no reservatório vazio. Este comportamento não pode ser explicado teoricamente e não tem qualquer interesse para este estudo. Nos restantes momentos não foram visíveis quaisquer influências do PCM / banha.

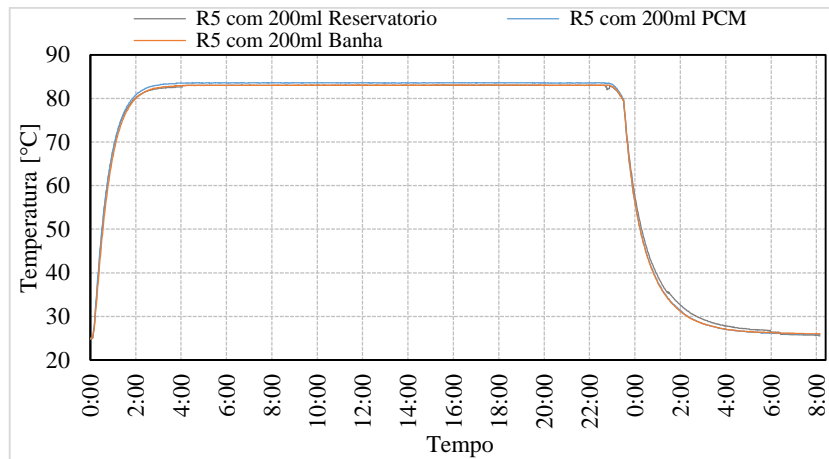


Figura 168 - Representação da temperatura interior em reservatórios com 200ml no 28ºensaio

### 3.3 – Ensaios finais

Os ensaios finais fizeram-se com base nos ensaios de calibração, ou seja, após os resultados obtidos nos ensaios e calibração fizeram-se outros ensaios para verificação / validação dos resultados até agora obtidos. Estes ensaios foram devidamente elaborados e monitorizados para posterior análise aprofundada.

### 3.3.1 – Provetes cúbicos

#### 3.3.1.1 – Provetes com octadecano

O **Ensaio final 1**, março, com este tipo de provetes, foi realizado no exterior na cobertura da ESTIG - IPB, onde se colocaram os provetes no interior dentro de caixas de poliestireno expandido tampadas, sujeitos à temperatura ambiente, ou seja, sujeitos ao calor durante o dia e ao frio durante a noite, para assim se obter o comportamento, quando sujeitos a ciclos de aquecimento e arrefecimento reais, Figura 169 e Figura 170.

Para obtenção dos dados fez-se uma monitorização com leituras de 10 em 10 [min]. Esta análise foi complementada por dados meteorológicos fornecidos, por membros do IPB, através da estação meteorológica instalada na proximidade dos provetes ensaiados. Foram colocadas caixas de poliestireno expandido vazias nas extremidades das caixas que continham os provetes cúbicos, para não haver diferenças a nível de sombreamento. Todo o aparato foi fixado a um estrado de madeira para os provetes ficarem imóveis e estáveis durante o ensaio.



Figura 169 – 7º ensaio



Figura 170 – Posicionamento 7º ensaio

No **Ensaio final 2**, março, com estes provetes, repetiu-se a metodologia usada no teste anterior, embora fossem retiradas as caixas protetoras de poliestireno expandido, ficando assim os provetes expostos diretamente as intempéries. Para tal os provetes foram presos ao estrado diretamente e assim permaneceram durante todo o ensaio, Figura 171 e Figura 172.



Figura 171 – 8º ensaio



Figura 172 – Posicionamento 8º ensaio

### 3.3.1.2 – Provetes com parafina

No **Ensaio final 3**, abril, dos provetes cúbicos com Parafina, aqueceram-se os provetes na estufa durante 2.30 [h], foram retirados e postos a temperatura ambiente do Laboratório dentro de caixas de poliestireno expandido, Figura 173 e Figura 174.



Figura 173 – 11º ensaio



Figura 174 – Posicionamento 11º ensaio

### 3.3.2 – Modelos de teste

No **Ensaio final 4**, junho, dos modelos de teste, comparativamente com o anterior alterou-se a fonte dos dados meteorológicos, passando a ser recolhidos dados no local dos ensaios. Para tal recorreu-se a um sensor de temperatura e um sensor de radiação, o que permitiu ter dados mais localizados e completos. Outra diferença significativa foi a pintura do modelo 6 de preto, uma vez que este apresentava temperaturas mais baixas na superfície da caixa-de-ar, Figura 175, Figura 176 e Figura 177. A Figura 178 e Figura 179 representam o esquema da ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 175 – Preparação para o 6º ensaio



Figura 176 – 6º ensaio



Figura 177 – estação meteorológica

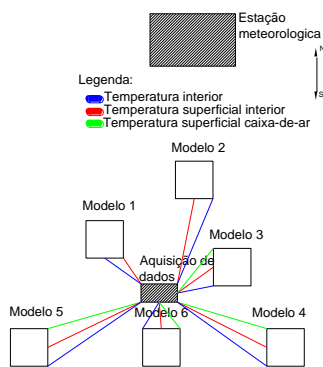


Figura 178 - Esquema do Posicionamento

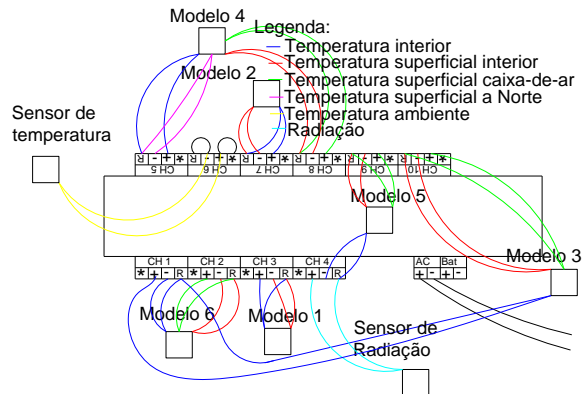


Figura 179 - Esquema de ligação

**Ensaio final 5**, junho e julho, dos modelos de teste consistiu na repetição do ensaio anterior onde apenas se alterou o modo de funcionamento dos modelos, passando a ser o sistema ventilado nos modelos 3, 4 e 5, ara tal abriram-se os orifícios existentes nos painéis de argamassa, Figura 180 e Figura 181. A Figura 182 e Figura 183 representam o esquema da ligação dos termopares entre os modelos e o sistema de aquisição de dados.



Figura 180 – Aberturas de ventilação



Figura 181 – 7º ensaio

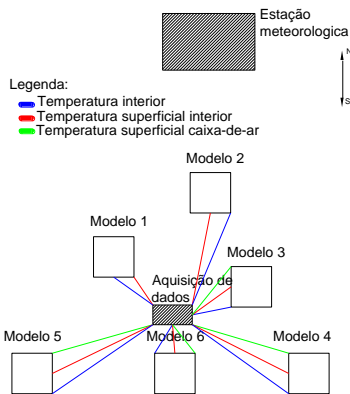


Figura 182 – Esquema do Posicionamento

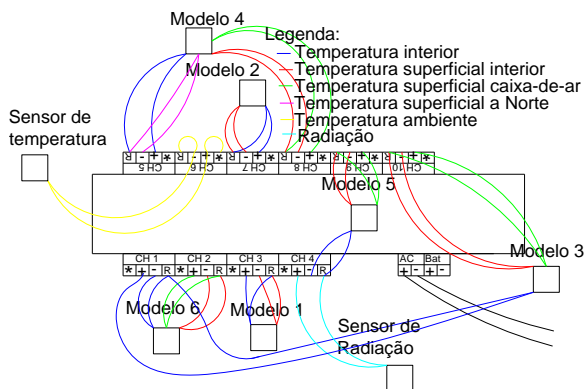


Figura 183 - Esquema de ligação

### 3.3.3 – Reservatórios (Termoacumuladores)

No **Ensaio final 6**, julho, dos reservatórios, após a análise aprofundada realizada nos ensaios anteriores decidiu-se fazer um teste com uma grande percentagem de PCM em relação a água, sendo que desta vez também se utilizou o PCM - Octadecano. Para o ensaio utilizou-se somente 200 [ml] de água e cerca de 30 gr de PCM de ambos os tipos, Figura 184 e Figura 185.



Figura 184 – 29ºensaio



Figura 185 – Arrefecimento 29ºensaio

No **Ensaio final 7**, julho, dos reservatórios, como não foi notória diferença nos ensaios anteriores tentou-se descobrir se as características do PCM / banha podem ser medidas com o sistema utilizado neste trabalho. Para tal fez-se uma medição em frascos contendo apenas uma mistura de PCM com água para tentar medir a influência do PCM. Foram aquecidos quatro frascos contendo um com água, outro PCM - Parafina misturada com água, outro com PCM - Octadecano misturada com água e outro com banha. Fez-se a medição com recurso a termopar no interior do frasco. Este ensaio também teve um período de aquecimento muito grande cerca de 17 [h], Figura 186, Figura 187 e Figura 188.



Figura 186 – Reservatório 30ºensaio



Figura 187 – Aquecimento 30ºensaio



Figura 188 – Arrefecimento 30ºensaio

No **Ensaio final 8**, julho, dos reservatórios, para acabar com todas as dúvidas em relação do funcionamento dos PCM's repetiu-se o ensaio anterior com os PCM em seco e devidamente compactado. Utilizaram-se novamente quatro frascos, um apenas com água, outro com PCM - Parafina, outro com PCM - Octadecano e outro com a banha, Figura 189 e Figura 190.



Figura 189 – Arrefecimento 31ºensaio



Figura 190 – 31ºensaio

## Capítulo 4 – Análise de resultados

Este capítulo tem como objetivo a análise dos dados obtidos nos ensaios apresentados no final do capítulo anterior, pois foram os ensaios que demonstraram comportamentos mais estáveis. Nas tabelas seguintes apresenta-se uma descrição dos ensaios selecionados para uma análise aprofundada. Na Tabela 5 apresentam-se os ensaios referentes aos provetes cúbicos, na Tabela 6 aos ensaios referentes aos modelos de teste e na Tabela 7 os ensaios referentes aos reservatórios.

Tabela 5 - Ensaios finais dos provetes cúbicos

| Nº ensaio | Nº de provetes | PCM adicionado na argamassa | Condições   | Tipo de ensaio                        |
|-----------|----------------|-----------------------------|---|---------------------------------------|
| EF1       | 4              | PCM - Octadecano            | Na cobertura dentro de caixas de Poliestireno expandido   | Ciclos de aquecimento e arrefecimento |
| EF2       | 4              | PCM - Octadecano            | Na cobertura desprotegidos                                | Ciclos de aquecimento e arrefecimento |
| EF3       | 5              | PCM – Parafina              | No laboratório dentro de caixas de Poliestireno expandido | Arrefecimento                         |

Tabela 6 – Ensaios finais dos modelos de teste

| Nº ensaio | Modelos de teste analisados | Dados meteorológicos | Funcionamento do sistema construtivo (parede de trombe) | Cor da parede estrutural do modelo 6 |
|-----------|-----------------------------|----------------------|---|--------------------------------------|
| EF4       | 1, 2, 3, 4, 5, 6            | Estação ESTiG        | Não ventilado   | Preto                                |
| EF5       | 1, 2, 3, 4, 5, 6            | Estação ESTiG        | Ventilado   | Preto                                |

Tabela 7 – Ensaios Finais dos reservatórios

| Nº ensaio | Elementos     | Quantidade de água | Quantidade de elemento | Cápsula | Tipo termopar | Tipo de reservatório | Aquecimento |
|-----------|---------------|--------------------|------------------------|---------|---------------|----------------------|-------------|
| EF6       | PCM/<br>Banha | 200 ml             | 30 ml                  | C2      | T2            | R5                   | A2          |
| EF7       | PCM/<br>Banha | 10 ml              | 9 ml                   | Frascos | T2            | Frascos              | A2          |
| EF8       | PCM/<br>Banha | 10 ml              | 10 ml                  | Frascos | T2            | Frascos              | A2          |

### 4.1 – Provetes cúbicos

#### 4.1.1 – Provetes com octadecano

O gráfico da Figura 191, correspondente ao **Ensaio final 1**, março, dos provetes cúbicos, permitiu identificar o aumento da temperatura durante o dia e o súbito decréscimo dessas temperaturas durante a noite, verificando-se que a temperatura no interior dos provetes esteve mais elevada do que a temperatura ambiente no período da tarde. Esta diferença pode ser

justificada pela radiação solar incidente nas caixas protetoras (poliestireno expandido) dos provetes que faz com que a temperatura seja mais elevada.

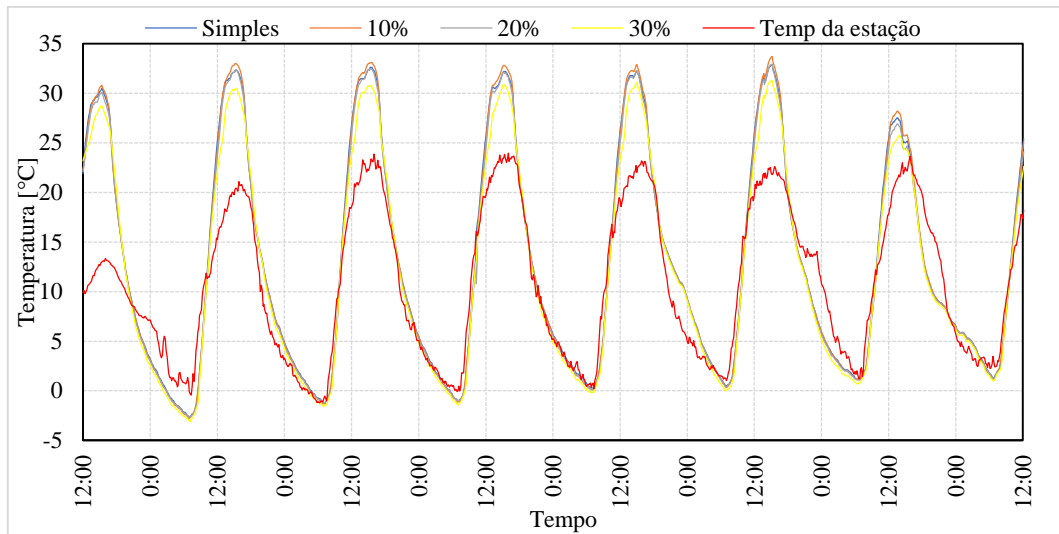


Figura191 - Representação da temperatura interior do 7º ensaio

No gráfico da Figura192 representa-se, de forma destacada, um dos picos de temperatura do ensaio final 1 que permitiu identificar melhor o comportamento dos diferentes cubos/componentes. A curva que diz respeito ao provete com 30% de PCM exhibe claramente um comportamento típico de um componente com as características de um PCM, já que quando a temperatura ultrapassa o ponto de fusão, o provete começa a armazenar energia. No processo de armazenamento o provete com elevado teor de PCM apresenta temperaturas inferiores às temperaturas registadas pelos restantes provetes, estando a funcionar como um isolante nos picos de temperatura, atingindo uma diferença de temperatura na ordem dos 3°C. Quando se inicia a fase de arrefecimento o provete exhibe um decréscimo de temperatura mais lento, chegando até a apresentar temperaturas maiores do que os restantes provetes, embora sejam diferenças mínimas.

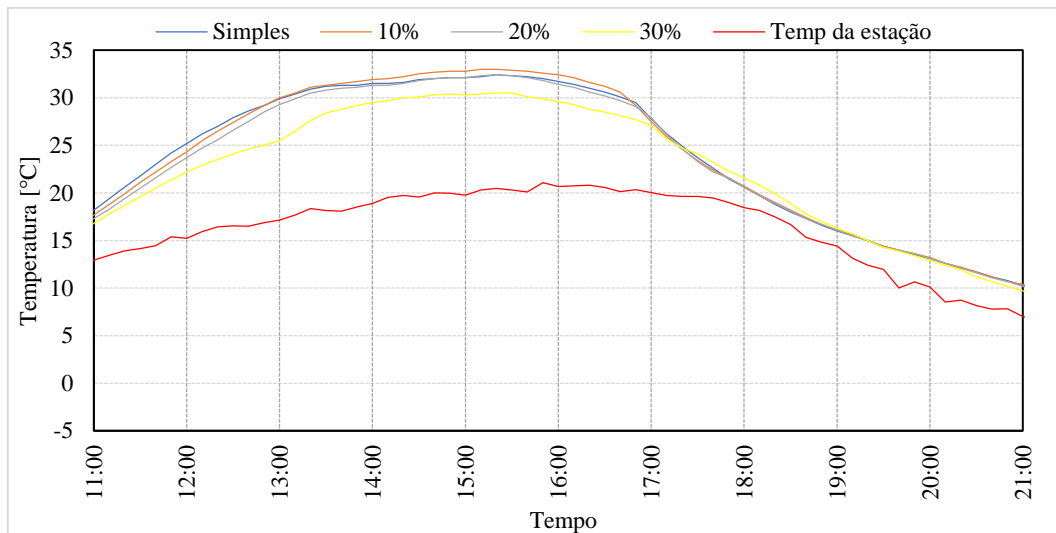


Figura192 - Aproximação do um ciclo do 7º ensaio

No gráfico da Figura 193, correspondente ao **Ensaio final 2**, março, dos provetes cúbicos, pode observar-se uma semelhança ao ensaio anterior, o que era de esperar já que as variáveis são muito semelhantes a única diferença significativa é a maior perturbação dos dados devido a falta de proteção dos provetes cúbicos.

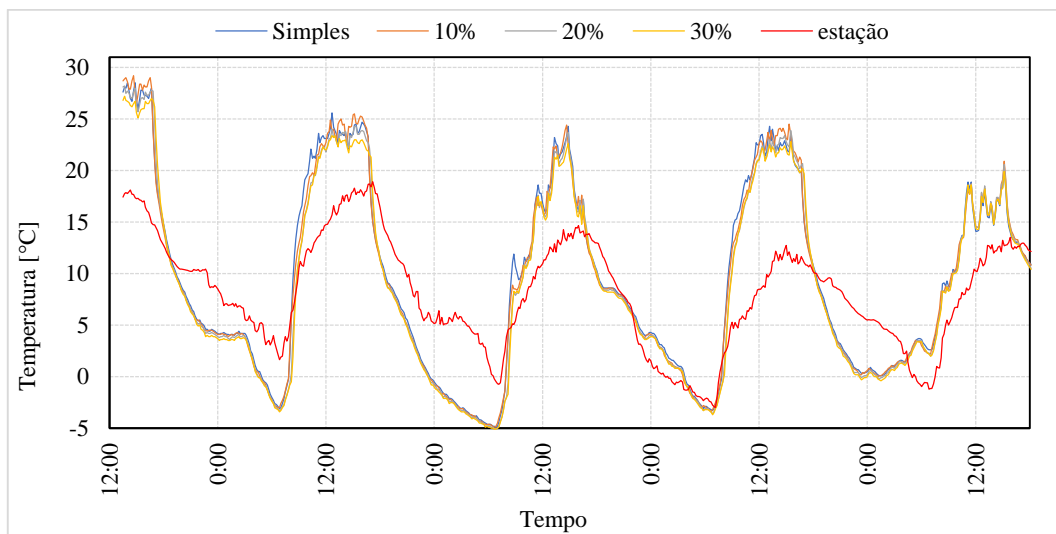


Figura 193 - Representação da temperatura interior 8ºensaio

No gráfico da Figura 194 pode-se verificar um comportamento semelhante ao demonstrado na representação do ensaio final 1, embora o efeito não seja tão claro. O efeito do PCM esteve presente da mesma maneira, revelando nos picos de calor um efeito isolador e mantendo a temperatura por maior período do que os restantes componentes.

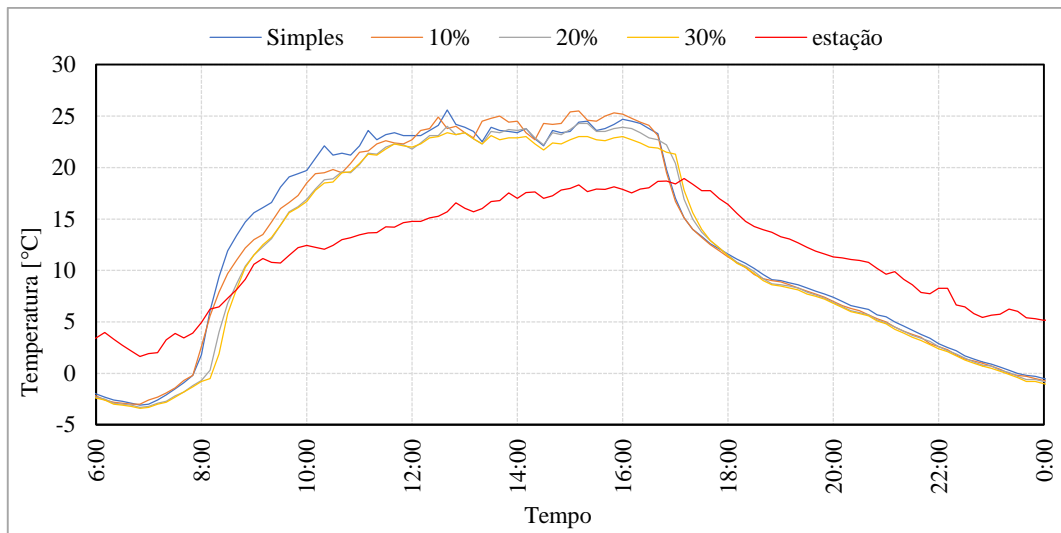


Figura 194 – Aproximação de um ciclo do 8º ensaio

#### 4.1.2 – Provetes com parafina

Os resultados do **Ensaio final 3**, abril, usando provetes cúbicos, são apresentados no gráfico da Figura 195, conseguindo-se observar que a parafina, nas condições em que se fizeram os testes, não apresenta efeitos significativos.

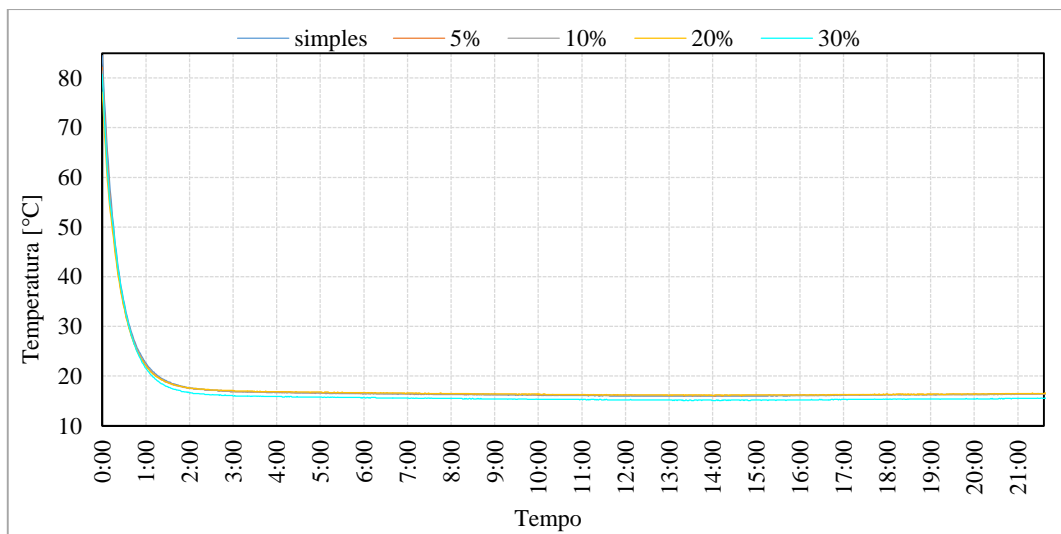


Figura 195 - Representação de temperaturas no 11º ensaio

No gráfico da Figura 196, observou-se mais detalhadamente o arrefecimento dos provetes, constatando-se que, apesar de existir uma alteração no provete com PCM perto dos 55°C, este não é o suficiente para demonstrar efeitos prolongados. Como a temperatura de fusão deste PCM é bastante elevada, este PCM não é aconselhado para as gamas de temperaturas de conforto.

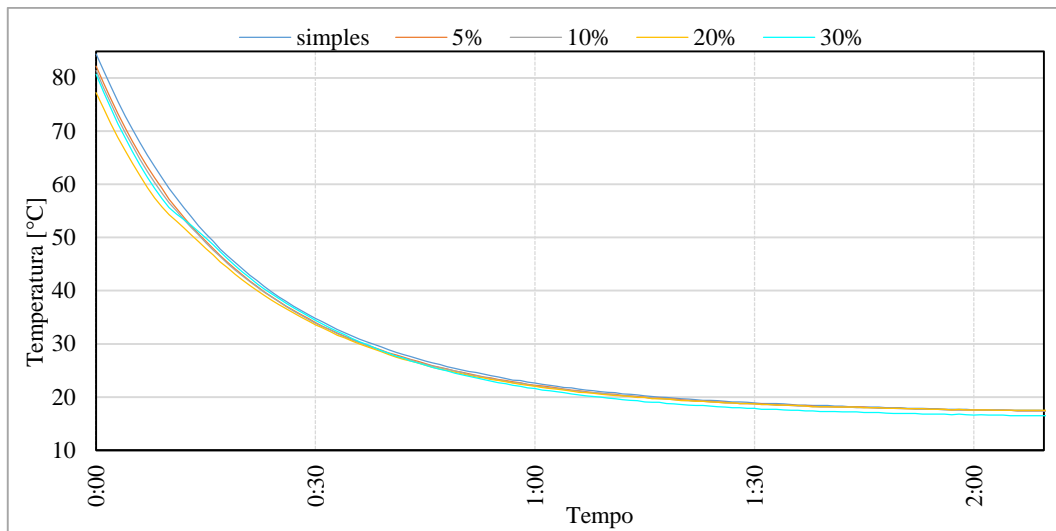


Figura 196 - Aproximação do 11º ensaio

## 4.2 – Modelos de teste

Os resultados do **Ensaio final 4**, realizado em junho, com os modelos de teste, são apresentados no gráfico da Figura 197, podendo-se observar condições meteorológicas constantes, com ciclos muito semelhantes entre si.

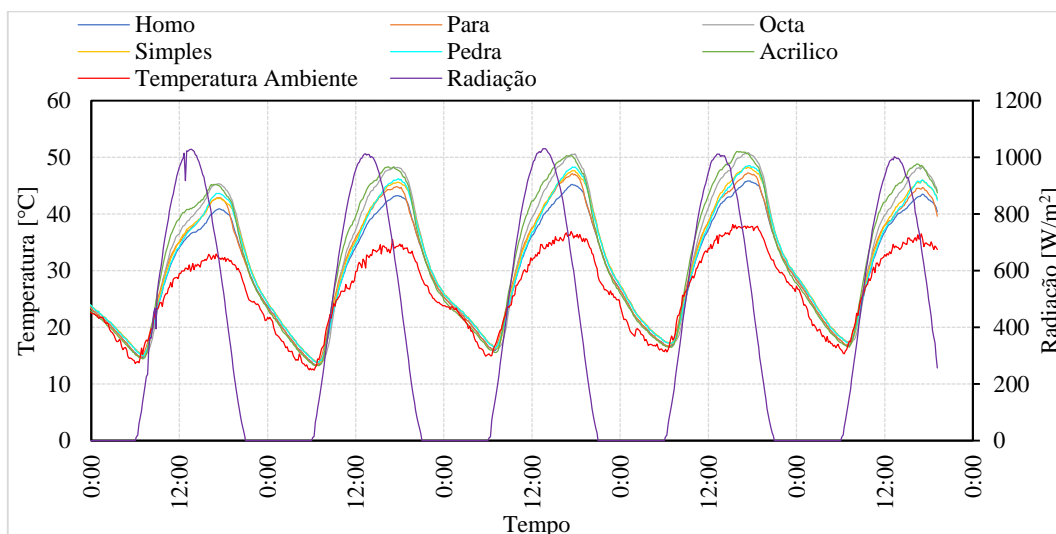


Figura 197 - Representação da temperatura do ar interior no 6º ensaio

Destacando um dos ciclos do gráfico da Figura 197 e apresentando-o no gráfico da Figura 198, constata-se que o modelo maciço apresentou temperaturas mais baixas no período de maior calor, sendo este seguido pelo modelo com PCM - Parafina, o qual apresenta um comportamento semelhante ao observado nos provetes cúbicos. Como se atingiram temperaturas altas na ordem dos 50°C, inverte-se o papel dos PCM a usar, apresentando melhor comportamento o PCM - Parafina.

O sistema construtivo “parede de trombe”, devido ao efeito da caixa-de-ar e da superfície negra, atinge temperaturas próximas da temperatura de fusão do PCM – Parafina. Assim este demonstrou os mesmos efeitos que demonstrou o PCM - Octadecano em gamas de temperaturas mais baixas.

Neste ensaio constatou-se um comportamento favorável do PCM, mostrando que na fase de maior calor funcionou como um isolante nos picos máximos e apresentou temperaturas semelhantes aos outros componentes na fase em que se deu a libertação de energia. Pôde-se observar que uma parede de 1.5 [cm] de argamassa com PCM - Parafina teve um comportamento melhor quando aplicado em parede de tombe, do que 1.5 [cm] de argamassa cimentícia tradicional e ainda melhor do que uma parede de 2 [cm] em granito. Esta constatação é interessante pelo facto de o granito se tratar de um material muito usado em paredes de tombe. Embora o efeito do PCM esteja presente nestes resultados eles apresentam diferenças muito pequenas entre os vários modelos.

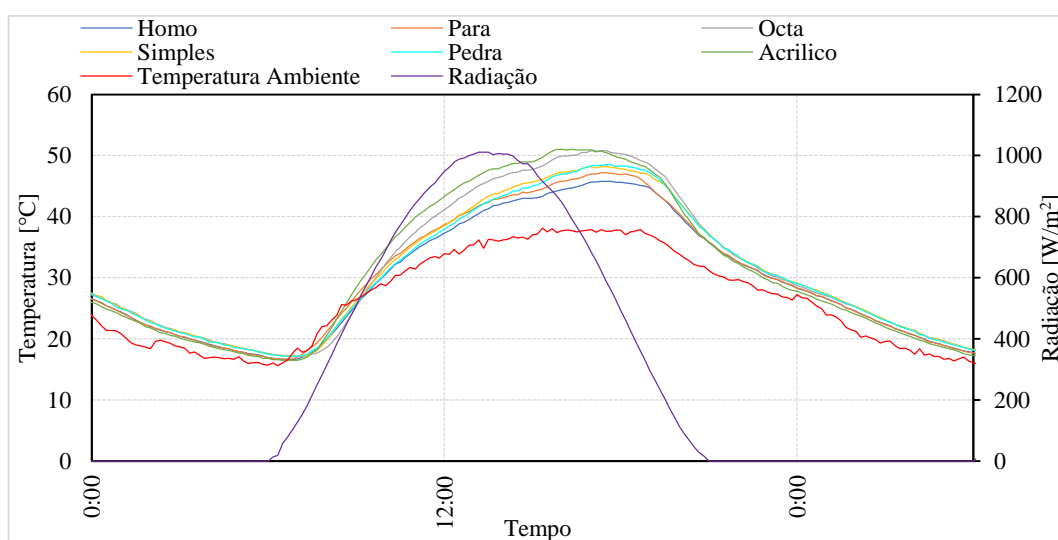


Figura 198 - Representação ampliada da temperatura interior em um pico, no 6ºensaio

No **Ensaio final 5**, julho, usando modelos de teste, de acordo com o gráfico da Figura 199 pôde verificar-se que as curvas obtidas foram semelhantes as obtidas no ensaio anterior, no entanto neste período as condições meteorológicas foram mais instáveis, revelando maiores flutuações de radiação e temperaturas mais baixas comparativamente ao ensaio anterior, no entanto as temperaturas variaram na mesma proporção.

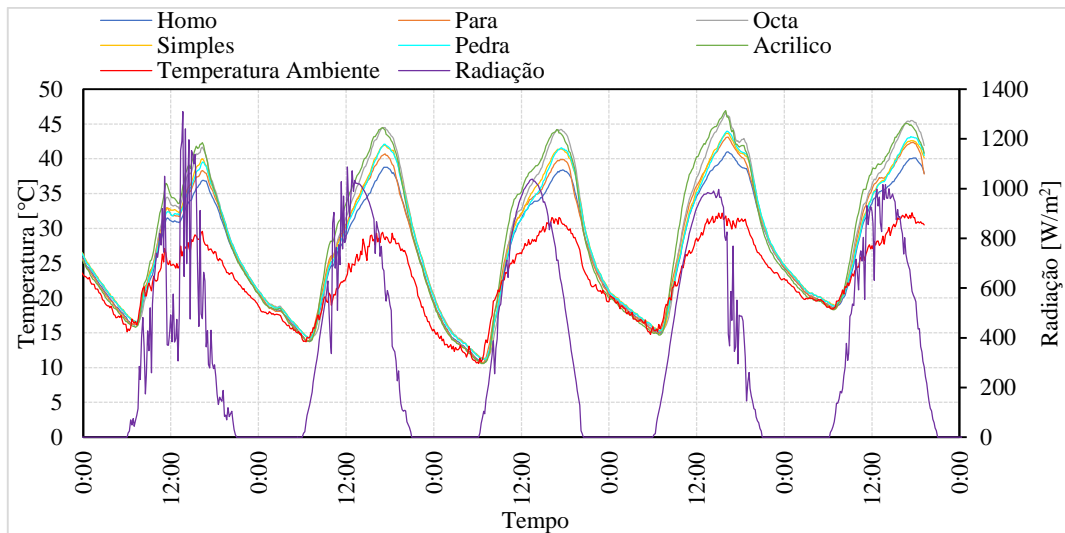


Figura 199 - Representação da temperatura interior no 7ºensaio

No gráfico da Figura 200 apresenta-se uma ampliação de um dos ciclos do gráfico da Figura 199, constatando-se uma repetição do que aconteceu no ensaio anterior, não havendo influência pelo facto de estarem abertos os orifícios de ventilação ou seja as conclusões a cerca dos modelos mantiveram-se. Pelo facto e a introdução da ventilação não apresentar influência nos resultados, isto pôde dever-se a vários fatores, tais como: o tamanho reduzido dos modelos de teste que pode não permitir uma circulação eficaz do ar ou um posicionamento incorreto das aberturas de ventilação.

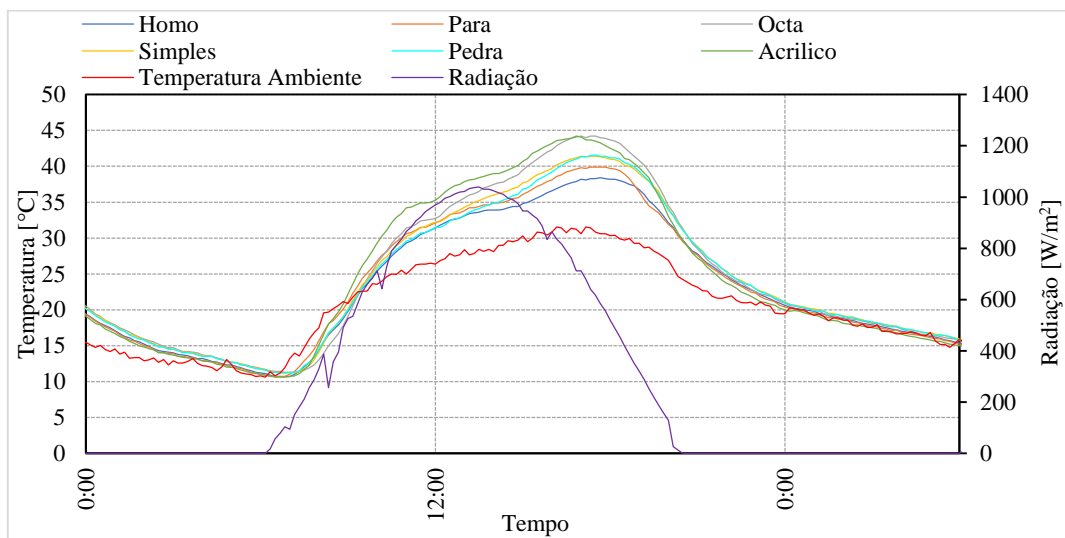


Figura 200 - Representação ampliada da temperatura interior no 7ºensaio

### 4.3 – Reservatórios (Termoacumuladores)

No **Ensaio final 6**, julho, usando a simulação de reservatórios, de acordo com o representado no gráfico da Figura 201, existiu um momento em que a tampa do reservatório que continha PCM-Parafina soltou-se, permitindo assim que o calor saísse para a estufa e por isso existiu uma falha durante deste ensaio. Para corrigir esta situação foi repostada a tampa e aqueceu-se outra vez a estufa até todos os componentes ficarem com a mesma temperatura. Depois de existir outra vez temperaturas estáveis foi iniciado o ciclo de arrefecimento.

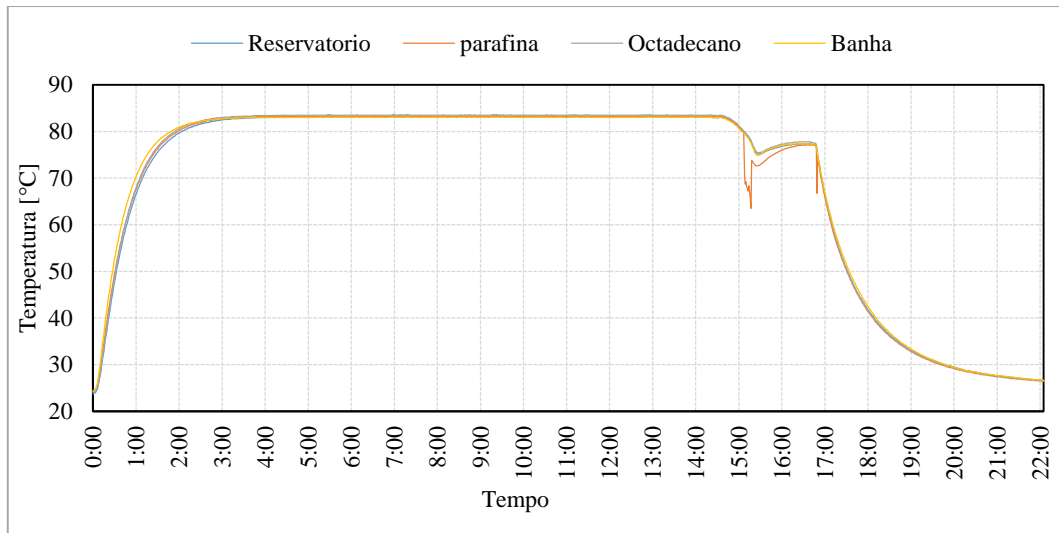


Figura 201 - Representação da temperatura interior no 29º ensaio

O gráfico da Figura 202, apresenta o período de arrefecimento, no qual existiu uma semelhança grande entre todos os componentes, ou seja nenhum dos reservatórios com adição de PCM's demonstra comportamentos positivos.

Estes resultados, nas condições em que foram realizados, demonstraram que os PCM's e a banha quando aplicados em termo - acumuladores não proporcionam vantagens quanto ao regime térmico de água no seu interior. Todos os reservatórios apresentaram comportamentos muito semelhantes ao comportamento do reservatório que apenas continha água.

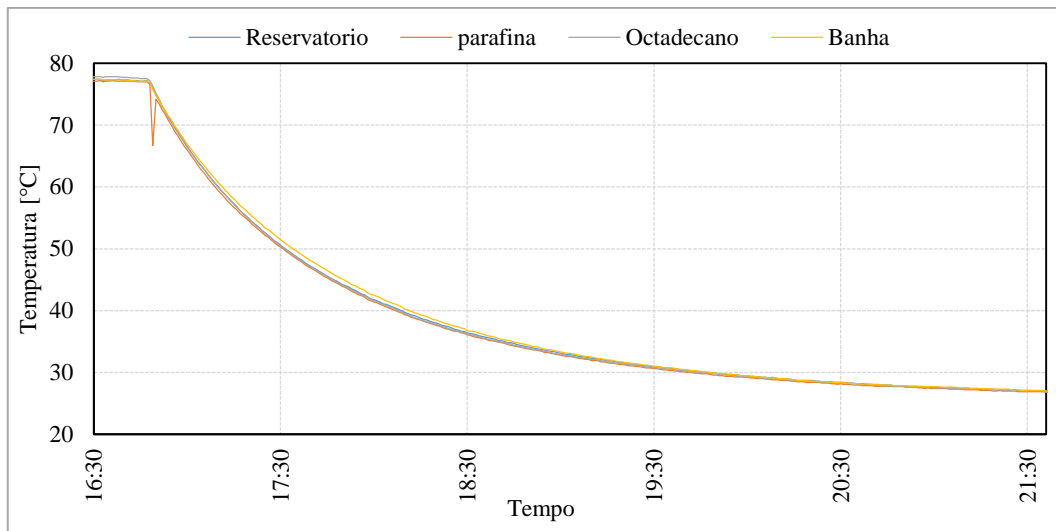


Figura 202 - Representação ampliada da temperatura interior no 29ºensaio

No **Ensaio final 7**, julho, de acordo com o gráfico da Figura 203 verificou-se que o período de aquecimento foi de quase uniforme, havendo apenas diferenças nas temperaturas dos reservatórios vazio e do que continha a banha. Estas diferenças anulam-se ao fim de sensivelmente 10 [h], mantendo-se estáveis até se iniciar o ciclo de arrefecimento.

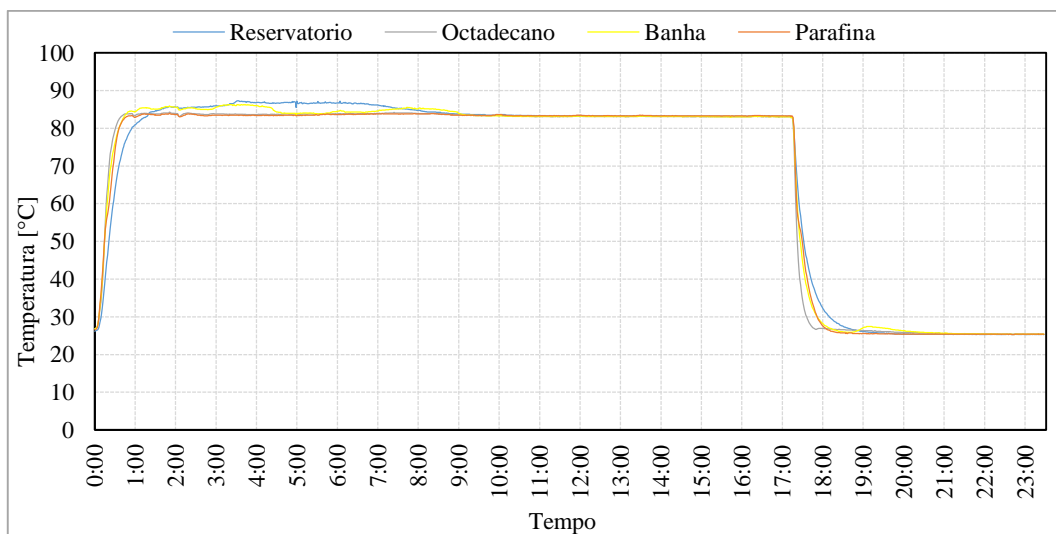


Figura 203 - Representação da temperatura interior do 30ºensaio

Observando o gráfico da Figura 204 correspondente à ampliação do ciclo de arrefecimento, identificou-se uma serie de comportamentos próprios dos PCM, como o “ressalto” no PCM-Parafina. Embora estes comportamentos estejam associados a ganhos térmicos esses ganhos não foram observados, já que o reservatório contendo apenas água demonstrou o melhor comportamento. No decréscimo de temperaturas o reservatório que continha somente água apresentou um decréscimo de temperatura mais lento do que os outros componentes, assim sendo os componentes como os PCM’s e a banha não contribuem para um aumento da

temperatura da água nos reservatórios, não sendo proveitoso aplicar estes componentes nesta situação.

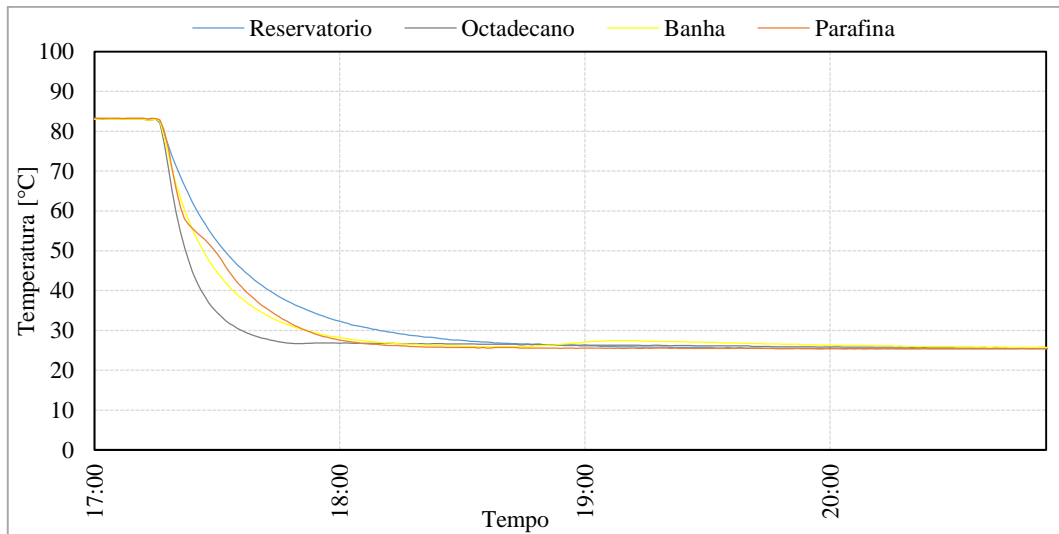


Figura 204 - Ampliação da variação da temperatura interior no 30ºensaio

No **Ensaio final 8**, julho, os resultados de acordo com o gráfico da Figura 205, foram muito semelhantes aos obtidos no ensaio anterior principalmente no arrefecimento.

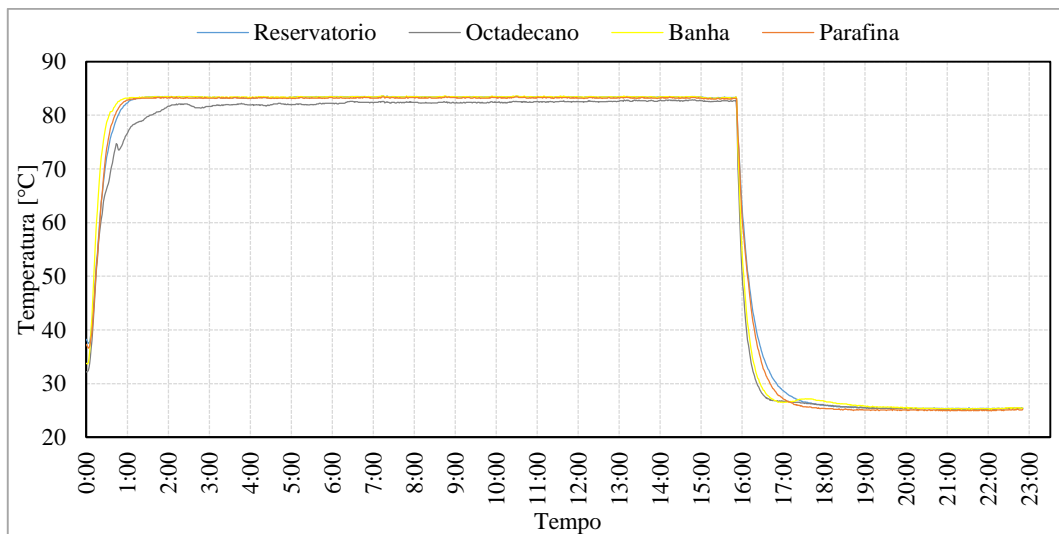


Figura 205 - Representação da temperatura interior no 31ºensaio

No gráfico da Figura 206 observou-se um comportamento mais linear do que o demonstrado no ensaio em que o PCM estava misturado com água. E mais uma vez o reservatório simplesmente com água teve um comportamento mais vantajoso do que os restantes. Este comportamento não era espectável já que em testes realizados na dissertação [3] elaborada para a criação destes PCM's eles apresentaram resultados positivos.

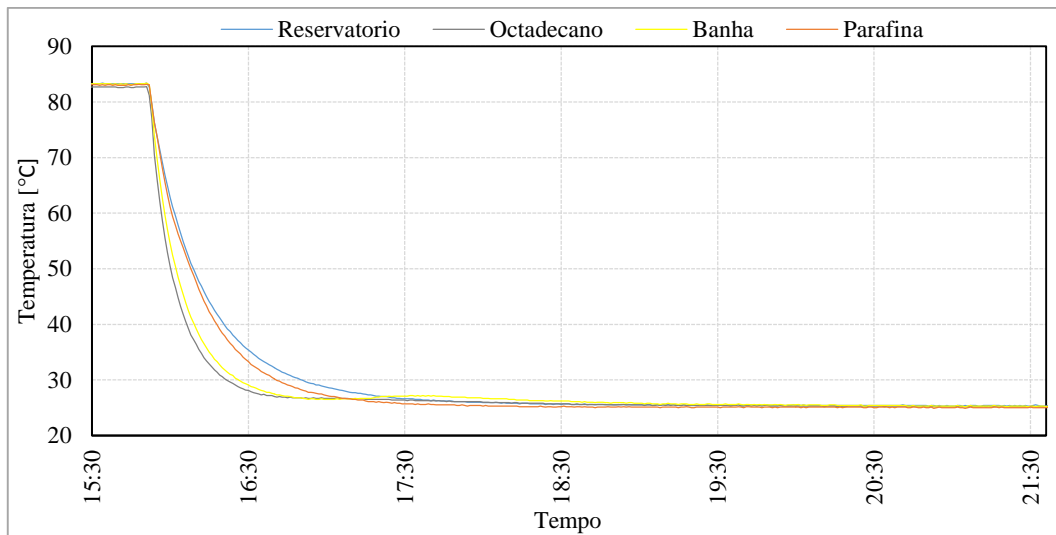


Figura 206 - Ampliação da variação da temperatura interior no 31ºensaio

## Capítulo 5 – Conclusões e trabalhos futuros

### 5.1 – Conclusões gerais

Neste trabalho abordou-se a utilização de materiais termo-ativos em diferentes soluções construtivas. Fez-se uso da capacidade que os PCM's têm de conservar as temperaturas por volta da sua temperatura de fusão, para aumentar a eficiência energética atenuando os picos de temperatura e assim reduzir a energia necessária para manter as habitações em condições de conforto.

Como este trabalho tem uma vertente muito prática tentou-se perceber quais as áreas em que a aplicação dos PCM's poderia trazer vantagens no dia-a-dia das habitações. Para tal aplicou-se os PCM's em três sistemas construtivos distintos, PCM's aplicados em argamassas cimentícia, PCM's aplicados em argamassas numa parede acumuladora - parede de trombe e ainda a aplicação dos PCM's em reservatórios termoacumuladores.

Na aplicação dos PCM's em **argamassas**, fez-se uma monitorização de provetes cúbicos em escala reduzida, em que se registaram resultados bastante positivos, já que o comportamento que se esperava teoricamente foi registado na prática. Obtiveram-se duas características chave num PCM, a conservação de energia e o isolamento. Usando o PCM com menor temperatura de fusão (Octadecano) os provetes apresentaram um decréscimo de temperatura mais lento do que uma amostra de argamassa simples, mostrando aí a libertação de energia previamente acumulada. Por outro lado o PCM com temperatura de fusão superior (Parafina) apresentou vantagens quando exposto a temperaturas superiores, funcionando como um isolante, evitando picos de calor e acumulando energia excessiva. Em ambas as situações os PCM's demonstraram a sua capacidade de manter as habitações dentro das temperaturas de conforto promovendo assim a eficiência energética. Embora os resultados fossem muito positivos a amplitude dos resultados não foi muito significativa, já que os ganhos dos PCM's em comparação com o seu preço pode não ser uma opção viável.

Na aplicação dos PCM's em **paredes de trombe**, observaram-se as temperaturas no interior de modelos de teste que são modelos pretendem o estudo de uma parede de trombe à escala reduzida. Existiram seis modelos de teste diferentes dos quais quatro utilizam paredes de trombe, que diferem na constituição da parede acumuladora, os outros dois modelos são modelos de uma janela comum e um modelo maciço. Nos ciclos de aquecimento e arrefecimento aos quais os modelos foram expostos observou-se que a parede de trombe com o PCM - Parafina apresentou um efeito isolante, já que comparativamente com os restantes modelos este apresentou temperaturas inferiores nos picos de calor. Assim sendo esta

aplicação do PCM traz vantagens já que evita um sobreaquecimento durante o período de maior calor apresentando temperaturas iguais as restantes no período onde é necessário o calor da parede de tombe. Também apresentou melhor resultado que uma parede de tombe em granito, que é tradicionalmente um elemento bastante utilizado neste sistema construtivo. A parede acumuladora com 1.5 [cm] de argamassa com adição de PCM teve melhores comportamento do que uma parede de 2 [cm] de granito. Como no sistema anterior a influência do PCM foi visível embora as diferenças sejam reduzidas.

Na aplicação de PCM's em **reservatórios** tentou-se fazer com que o poder de acumulação de energia dos PCM's fosse aproveitado para manter a água no interior dos termoacumuladores quente durante mais tempo. Para tal os PCM's foram colocados dentro de modelos de escala reduzida de termoacumuladores, onde foram aquecidos e arrefecidos. Nestes ensaios introduziu-se um PCM novo, designado de banha. Após um longo período de aperfeiçoamento do layout do ensaio, obteve-se resultados que não correspondiam ao que se esperava teoricamente. Os valores registados não apresentam qualquer melhoria com a aplicação dos PCM's, os valores registados são muito semelhantes entre todos os reservatórios tenham eles a adição de PCM's ou contendo simplesmente água. Assim sendo a aplicação dos PCM's em reservatórios com esta metodologia não é aconselhada, já que não traz qualquer vantagem. A única característica positiva retirada nestes ensaios foi a utilização da banha animal, destacando-se em comparação com os PCM's sintéticos, já que este material é mais barato, existe em abundancia, é ecológico e apresenta resultados semelhantes aos restantes PCM's. Também as gamas de temperaturas em que opera este PCM são muito próximas das temperaturas de conforto.

## **5.2 – Trabalhos futuros**

Com intenção de melhoramento e continuação deste trabalho são sugeridos os seguintes trabalhos futuros:

- Exposição dos modelos a temperaturas mais elevadas e mais baixas;
- Aplicação em maior escala;
- Desenvolvimento de um modelo numérico;
- Encapsulamento de materiais mais sustentáveis e económicos (Ex. banha);
- Desenvolvimento de uma capsula e respetivo PCM apropriado para o uso nos reservatórios (termoacumuladores);

## Referências bibliográficas

- [1] D. d. S. Oliveira, “Identificação do tipo e quantidade de PCM adequado ao clima Português,” Tese de Mestrado Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao Grau de Mestre em Engenharia Civil, Universidade do Minho - Escola de Engenharia, 2012.
- [2] P. d. J. S. P. d. S. Grade, “Materiais de Mudança de Fase em Revestimentos,” Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de Especialização em Edificações , ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Dezembro 2013.
- [3] P. J. S. Tristão, “Encapsulação de Materiais de Mudança de Fase (PCM) para Aplicações no Armazenamento de Energia,” Para obtenção do grau de Mestre em Energias Renováveis e Eficiência Energética , Escola Superior de Tecnologia e Gestão - Instituto Politécnico de Bragança , 2014.
- [4] T. Pacson, “Introduction to Phase Change Materials: Building Applications,” 2011.
- [5] A. M. V. D. O. e. Sá, “Comportamento térmico de edifícios em,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, FEUP, 2012.
- [6] P. C. E. Solutions, “Phase Change Energy Solutions,” [Online]. Available: <http://www.phasechange.com/index.php/en/>. [Acedido em Dezembro 2014].
- [7] B. Stephens, “Brent Stephens - Academic Homepage,” [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/stephensbrent/blog-2>.
- [8] BASF, “Micronal PCM,” [Online]. Available: <http://www.micronal.de/portal/streamer?fid=402744>.
- [9] P. Product, “PCM,” [Online]. Available: [http://www.pcmproducts.net/Encapsulated\\_PCMS.htm](http://www.pcmproducts.net/Encapsulated_PCMS.htm).
- [10] A. C. B. d. Sá, “Parede de Trombe: Análise Experimental e,” UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR, Covilhã, 2011.
- [11] A. C. N. d. Santos, “Estudo da Eficiência Energética de um Sistema de Arrefecimento com Materiais de Mudança de Fase,” Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica , FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- [12] Datataker, “Datataker,” [Online]. Available: <http://www.datataker.com/>.