



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

Tânia **Desenvolvimento de argamassas com PCM em matriz de**
Machado **argila expandida**
Salgueiro



Universidade de Aveiro
2014

Departamento de Ambiente e Ordenamento

Tânia Machado **Desenvolvimento de argamassas com PCM em matriz de**
Salgueiro **argila expandida**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

O Júri

Presidente	Professora Doutora Maria Isabel Aparício Paulo Fernandes Capela, Professora Associada, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro
Arguente	Professor Doutor João António Labrincha Batista, Professor Associado C/ Agregação, Departamento de Engenharia dos Materiais e Cerâmica, Universidade de Aveiro
Orientador	Professor Doutor António José Barbosa Samagaio, Professor Associado, Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Agradecimentos

Ao Professor Doutor António Samagaio, orientador da minha dissertação, por toda a disponibilidade para me auxiliar no meu trabalho, pelos incentivos constantes, conselhos e confiança, principalmente nas horas mais problemáticas.

A todo o apoio prestado pela empresa Saint-Gobain Weber, principalmente ao Eng.º Luís Silva e Eng.º Nuno Vieira, pela disponibilidade, dedicação e apoio ao longo de todo trabalho experimental.

Ao Doutor Vitor Amaral, João Amaral e especialmente ao Licínio Ferreira pela realização dos ensaios de condutividade térmica no Laboratório Térmico da Universidade de Aveiro (CICFANO), por todo o apoio e ajuda prestados.

Às minhas amigas, Ana Sousa, Ana Luísa Ferreira, Carla Monteiro, Cátia Cardoso, Maria Cordeiro, Marisa Cardoso e Paula Santos que tanto me ouviram e sempre me apoiaram, não só nesta dissertação, mas em grande parte do curso.

À Andreia Fonseca tenho a agradecer todo o apoio que me prestou em grande parte da dissertação e do curso, a agradecer as horas a ouvir-me, acalmar-me e ainda segurar lágrimas.

À Cátia Frederico, pelo apoio que me deu nos últimos momentos da dissertação, ouvindo-me e acalmando-me.

A todos os meus colegas e a todas as pessoas que, de alguma forma, fizeram parte deste trabalho.

A toda a minha família, dedicando este trabalho à minha tia Bárbara, que não estando mais entre nós, sei que ficaria orgulhosa de mim com todo o coração.

Aos meus pais, Fernando Salgueiro e Filomena Machado, a quem também dedico este trabalho, uma vez que, sem eles, este curso não seria possível, por toda a dedicação, esforço e fé que tiveram em mim.

Palavras-chave

PCM, materiais de mudança de fase, matriz de argila expandida, desenvolvimento e avaliação de desempenho de uma argamassa, propriedades mecânicas e térmicas, *MDSC*.

Resumo

As argamassas tradicionais apresentam problemas com a incorporação de PCMs, como a trabalhabilidade e manuseamento. Neste contexto, surge o presente trabalho com o objetivo de desenvolver e caracterizar um novo material compósito, consistindo na incorporação de materiais de mudança de fase microencapsulados numa matriz de cimento e argila expandida.

A revisão bibliográfica serviu para conhecer os vários tipos de PCMs existentes, as suas vantagens e desvantagens e, por último, as aplicações destes, nomeadamente em edifícios. Realizou-se, de seguida, a avaliação de duas novas argamassas com diferentes granulometrias de argila expandida com e sem PCM, a fim de determinar o desempenho a nível mecânico e térmico de cada uma. Realizaram-se ensaios a fim de determinar as propriedades físicas como a densidade e capilaridade, mecânicas como as resistências à flexão e compressão, módulo de elasticidade e de retração e, por último, térmicas como a condutividade e difusividade térmicas, calor específico e entalpia. Por último, comparou-se este novo material com uma “argamassa corrente” com PCM, utilizada noutros trabalhos.

Os resultados revelam que mecânica e fisicamente o PCM não prejudica a argamassa, principalmente argamassa de argila expandida com menor granulação. Pelo contrário obtêm-se bons resultados. Relativamente às propriedades térmicas, verificou-se que o PCM ajudou o desempenho térmico da argamassa, mas a sua própria performance pode ser prejudicada nas matrizes desenvolvidas de Leca®.

Keywords

PCM, phase change materials, matrix of expanded clay, development and performance evaluation of a mortar, mechanical and thermal properties, MDSC.

Abstract

The traditional mortars experience problems with the incorporation of PCMs, as workability and handling. This work comes with the aim of developing and characterize a new composite material, consisting in the incorporation of microencapsulated phase change materials in a cement and expanded clay matrix.

The bibliographic review has served to help us know the different types found in PCMs, its advantages and disadvantages and, finally, their application, particularly in buildings. This was followed by an evaluation of two new mortars with different particle sizes of expanded clay with or without PCM, in order to determine the mechanical and thermal performance of each one. Tests were performed to determine the physical properties such as density and capillarity, the mechanical behavior such as compressive and flexural strength, modulus of elasticity and retraction and, finally, thermal as thermal conductivity and diffusivity, specific heat and enthalpy. Lastly, this new material was compared to a “current mortar” with PCM, used in other works.

The results show that PCM does not interfere mechanically and physically with mortar, particularly mortar of expanded clay with less granulation. In fact, it is the opposite. It leads to good results. As regards the thermal properties, it was found that PCM helped the thermal performance of mortar, but its own performance can be damaged in the developed matrices of Leca®.

Índice

Índice	i
Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	v
Lista de abreviaturas	vii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Metodologia	2
1.4 Estrutura do trabalho	2
2 Materiais de Mudança de Fase	5
2.1 Propriedades dos PCMs	7
2.2 Classificação dos PCMs	8
2.2.1 PCMs Orgânicos	9
2.2.2 PCMs Inorgânicos	10
2.2.3 PCMs Eutéticos	11
2.3 Incorporação em materiais	13
2.3.1 Incorporação Direta	13
2.3.2 Imersão	13
2.3.3 Macroencapsulamento	14
2.3.4 Microencapsulamento	15
2.3.5 PCMs em nanopartículas	16
2.3.6 Impregnação de matrizes porosas	16
2.3.7 PCMs encapsulados em esferas	17
3 Normas e metodologias de ensaio	19
3.1 Norma Europeia EN 998-1	19
3.1.1 Grupos e classes	19
3.1.2 Requisitos	20
3.2 Formulação da argamassa	21
3.3 Caracterização da argamassa	21
3.3.1 Avaliação de desempenho	21
3.3.1.1 Propriedades físicas e mecânicas	22
3.3.1.1.1 Amassado de uma argamassa	22
3.3.1.1.2 Densidade de um amassado	22
3.3.1.1.3 Preparação e conservação de provetes	23
3.3.1.1.4 Determinação das variações dimensionais e de massa de uma argamassa endurecida	23
3.3.1.1.5 Determinação da resistência à flexão e compressão de uma argamassa	25
3.3.1.1.6 Determinação do módulo de elasticidade de uma argamassa	27
3.3.1.1.7 Determinação da absorção de água por capilaridade	28
3.3.1.2 Propriedades Térmicas	29
3.3.1.2.1 Método Transient Plane Source (Hot Disk AB)	29
3.3.1.2.2 Ensaio MDSC (Modulated Differential Scanning Calorimeter)	30
4 Resultados e discussão	33
4.1 Desenvolvimento de uma argamassa com PCM, resultados experimentais	33
4.1.1 Produto em pasta	33
4.1.2 Produto endurecido	35
4.1.3 Comportamento térmico	37

4.1.3.1	Condutividade térmica	37
4.1.3.2	Calor específico	38
4.1.3.3	Ensaio MDSC	40
4.1.3.3.1	Fluxo de calor	40
4.1.3.3.2	Calor Específico	45
4.1.3.3.3	Transient Plane Source vs MDSC	48
4.1.3.3.4	Entalpia de fusão e solidificação	50
5	Conclusão e desenvolvimentos futuros	57
5.1	Conclusões gerais	57
5.2	Desenvolvimentos futuros	59
	Referências Bibliográficas	61
	Anexos	65
A.1	- Matriz Leca [®] XS sem PCM (LXS00)	67
A.2	- Matriz Leca [®] XS com PCM (LXS01)	68
A.3	- Matriz Leca [®] S sem PCM (LS00)	69
A.4	- Matriz Leca [®] S com PCM (LS01)	70
B.1	- Fluxo de calor das amostras de Leca [®] S e formulação L	71
B.2	- Entalpias de fusão e solidificação	75
B.3	- Calor específico das amostras de Leca [®] S e formulação L	79
B.4	- Entalpia das amostras de Leca [®] S e formulação L	83
C.1	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para o PCM Puro	87
C.2	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz XS01NA	88
C.3	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz XS01A	89
C.4	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz S01NA	90
C.5	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz S01A	91
C.6	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz LNA	92
C.7	- Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz LA	93

Índice de Figuras

Fig. 1. Síntese da metodologia do trabalho.	2
Fig. 2. Processo de armazenamento de calor latente em função de temperatura para o caso da transformação entre estados sólido – líquido [4-6, 9].	5
Fig. 3. Classificação dos materiais de mudança de fase [13, 15, 16, 18].	9
Fig. 4. Temperatura de fusão e entalpias de mudança de fases para diferentes PCMs [9, 12].	13
Fig. 5. Painel CSM contendo o PCM [28].	14
Fig. 6. Placa de gesso cartonado com PCM microencapsulado [37].	15
Fig. 7. Análise de composto de mudança de fase com eritritol misturado com grafite ou partículas de níquel [41].	16
Fig. 8. Propriedades que caracterizam a argamassa.	22
Fig. 9. Ensaio de determinação das variações dimensionais e de massa; (a) Micrómetro; (b) Pesagem das amostras.	24
Fig. 10. Prensa automática.	25
Fig. 11. Ensaio de flexão.	25
Fig. 12. Ensaio de compressão.	25
Fig. 13. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade – equipamento de medição de frequência de ressonância.	27
Fig. 14. Equipamento <i>TPS 2500 S</i> no Laboratório Térmico da UA.	29
Fig. 15. Montagem para a caracterização térmica da amostra; (a) Sonda entre a amostra; (b) Montagem para ensaio a temperatura variável (entre -20 °C e 70 °C).	30
Fig. 16. Equipamentos utilizados para ensaios realizados no departamento de química da Universidade de Coimbra; (a) Prensa de cadinhos; (b) Equipamento MDSC; (c) Cadinhos de referência e de amostra; (d) Registo das medições.	31
Fig. 17. Amostras de leca sem PCM; (a) LXS00; (b) LS00.	34
Fig. 18. Amostras de leca com PCM; (a) LXS01; (b) LS01.	35
Fig. 19. Resultados de condutividade térmica para as amostras XS01 e S01.	37
Fig. 20. Resultados de condutividade térmica para a Formulação L.	38
Fig. 21. Calor específico relativo às amostras de XS01 e S01 através do método <i>Transient Plane Source</i>	39
Fig. 22. Calor específico relativo à formulação L através do método <i>Transient Plane Source</i>	39
Fig. 23. Fluxo de calor no PCM puro.	40
Fig. 24. Fluxo de calor na amostra LXS00.	41
Fig. 25. Fluxo de calor na amostra XS01NA.	41
Fig. 26. Fluxo de calor na amostra XS01A.	42
Fig. 27. Entalpias de fusão e solidificação do PCM puro.	43
Fig. 28. Entalpias de fusão e solidificação da amostra XS01NA.	44
Fig. 29. Calor específico do PCM puro.	45
Fig. 30. Calor específico da amostra LXS00.	45
Fig. 31. Calor específico da amostra XS01NA.	46
Fig. 32. Calor específico da amostra XS01A.	46
Fig. 33. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra XS01 obtidos por <i>Transient Plane Source</i> e <i>MDSC</i>	48
Fig. 34. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra S01 obtidos por <i>Transient Plane Source</i> e <i>MDSC</i>	49
Fig. 35. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra Formulação L obtidos por <i>Transient Plane Source</i> e <i>MDSC</i>	49

Fig. 36. Entalpia do PCM puro.....	50
Fig. 37. Entalpia da amostra LXS00.....	51
Fig. 38. Entalpia da amostra XS01NA.....	51
Fig. 39. Entalpia da amostra XS01A.....	52
Fig. 40. Fluxo de calor na amostra LS00.....	71
Fig. 41. Fluxo de calor na amostra S01NA.....	71
Fig. 42. Fluxo de calor na amostra S01A.....	72
Fig. 43 Fluxo de calor na formulação LNA.....	72
Fig. 44. Fluxo de calor na formulação LA.....	73
Fig. 45 Entalpia de fusão da amostra XS01A.....	75
Fig. 46. Entalpia de fusão da amostra S01NA.....	75
Fig. 47. Entalpias de fusão e solidificação da amostra S01A.....	76
Fig. 48. Entalpias de fusão e solidificação da formulação LNA.....	76
Fig. 49. Entalpias de fusão e solidificação da formulação LA.....	77
Fig. 50. Calor específico da amostra LS00.....	79
Fig. 51. Calor específico da amostra S01NA.....	79
Fig. 52. Calor específico da amostra S01A.....	80
Fig. 53. Calor específico da formulação LNA.....	80
Fig. 54. Calor específico da formulação LA.....	81
Fig. 55. Entalpia da amostra LS00.....	83
Fig. 56. Entalpia da amostra S01NA.....	83
Fig. 57. Entalpia da amostra S01A.....	84
Fig. 58. Entalpia da formulação LNA.....	84
Fig. 59. Entalpia da formulação LA.....	85
Fig. 60. Entalpia de fusão da amostra de PCM puro, em função de temperatura.....	87
Fig. 61. Entalpia de solidificação da amostra de PCM puro, em função da temperatura.....	87
Fig. 62. Entalpia de fusão da amostra XS01NA, em função de temperatura.....	88
Fig. 63. Entalpia de solidificação da amostra XS01NA, em função de temperatura.....	88
Fig. 64. Entalpia de fusão da amostra XS01A., em função de temperatura.....	89
Fig. 65. Entalpia de solidificação da amostra XS01A., em função de temperatura.....	89
Fig. 66. Entalpia de fusão da amostra S01NA, em função de temperatura.....	90
Fig. 67. Entalpia de solidificação da amostra S01NA, em função de temperatura.....	90
Fig. 68. Entalpia de fusão da amostra S01A, em função de temperatura.....	91
Fig. 69. Entalpia de solidificação da amostra S01A, em função de temperatura.....	91
Fig. 70. Entalpia de fusão da amostra LNA, em função de temperatura.....	92
Fig. 71. Entalpia de solidificação da amostra LNA, em função de temperatura.....	92
Fig. 72. Entalpia de fusão da amostra LA, em função de temperatura.....	93
Fig. 73. Entalpia de solidificação da amostra LA, em função de temperatura.....	93

Índice de Tabelas

Tabela 1 Propriedades desejáveis na seleção do PCM para aplicação em edifícios [8, 12, 13, 15-17].	8
Tabela 2 – Exemplos de PCMs Orgânicos [21].	10
Tabela 3 - Exemplos de PCMs Inorgânicos [21].	11
Tabela 4 Comparação entre os diferentes tipos de PCMs [Fonte: Adaptado de [9, 12, 13, 15, 23].	12
Tabela 5 Grupos de argamassas presentes na Norma Europeia EN 998-1 [45].	19
Tabela 6 Classificação de argamassas de acordo com a EN 998-1 [45].	20
Tabela 7 Requisitos para as características de uma argamassa genérica (GP) e uma argamassa leve (LW) e métodos de ensaio respetivos [45].	20
Tabela 8 Composições das argamassas testadas (% em massa)	21
Tabela 9 Resultados relativos a propriedades mensuráveis (% água e densidade) e outras obtidas por perceção empírica, das argamassas em avaliação.	34
Tabela 10 Resumo das propriedades mecânicas e físicas do produto endurecido.	35
Tabela 11 Classificação da amostra LXS01 segundo a Norma Europeia EN 998-1 [67].	37
Tabela 12 Parâmetros de medida utilizados para a caracterização térmica.	38
Tabela 13. Picos obtidos através da análise dos gráficos de fluxo de calor.	42
Tabela 14. Picos obtidos através da análise dos gráficos de calor específico.	47
Tabela 15 Resultado dos ensaios MDSC	53
Tabela 16 Resumo das propriedades térmicas do produto endurecido	53
Tabela 17 Classificação das amostras segundo a Norma Europeia 998-1 [45] relativamente à condutividade térmica.	53
Tabela A.1. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LXS00	67
Tabela A.2. Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LXS00.	67
Tabela A.3. Resultados ensaios da capilaridade da matriz LXS00.	67
Tabela A.4 Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LXS01	68
Tabela A.5 Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LXS01.	68
Tabela A.6 Resultados ensaios de capilaridade da matriz LXS01	68
Tabela A.7. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LS00	69
Tabela A.8. Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LS00.	69
Tabela A.9. Resultados ensaios de capilaridade da matriz LS00.	69
Tabela A.10. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LS01	70
Tabela A.11 Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LS01.	70
Tabela A.12. Resultados ensaios de capilaridade da matriz LS01	70

Lista de abreviaturas

INE	Instituto Nacional de Estatística
PCM	<i>Phase Change Materials</i>
MDSC	<i>Modulated Differential Scanning Calorimeter</i>
LXS00	Amostra de Leca® XS com cimento
LS00	Amostra de Leca® S com cimento
LXS01	Amostra de Leca® XS com cimento e <i>PCM</i>
LXS01NA	Amostra de Leca® XS com cimento e <i>PCM</i> não amassado
LXS01A	Amostra de Leca® XS com cimento e <i>PCM</i> amassado
LS01	Amostra de Leca® S com cimento e <i>PCM</i>
LS01NA	Amostra de Leca® S com cimento e <i>PCM</i> não amassado
LS01A	Amostra de Leca® XS com cimento e <i>PCM</i> amassado
LNA	Formulação L com <i>PCM</i> não amassado
LA	Formulação L com <i>PCM</i> amassado

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O consumo de energia no sector doméstico em Portugal, de acordo com o Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010, representava, em 2009, 17,7 % do total do consumo final de energia, apresentando uma taxa média de crescimento anual de 1,5 % entre os anos de 1989 e 2009. No sector doméstico, 21,5 % do consumo energético destina-se ao aquecimento do ambiente e 0,5 % ao seu arrefecimento [1].

O nível de qualidade e de conforto dos edifícios portugueses tem vindo a aumentar na última década e prevê-se uma tendência para o aumento dos gastos energéticos. O clima português apresenta períodos com frio capaz de causar desconforto e, por isso, apresentando elevadas necessidades de aquecimento. Desta forma, a climatização dos edifícios revela-se importante no que diz respeito ao consumo energético, quer seja no aquecimento (inverno) ou arrefecimento (verão).

Atendendo ao que foi exposto previamente, surge a necessidade de encontrar alternativas capazes de controlar estes consumos energéticos. Uma alternativa provém da utilização de materiais de mudança de fase (*Phase Change Material*, PCM). Estes apresentam uma elevada capacidade de armazenar energia térmica durante a mudança de fase [2]. Desta forma, é possível melhorar o conforto térmico no verão e reduzir o consumo de energia no Inverno.

Devido às suas vantagens, estes materiais começam a surgir cada vez mais no mercado, embora ainda a preços pouco competitivos. Os PCMs têm vindo a ser aplicados em materiais de construção apresentando, no entanto, desvantagens como a dificuldade na trabalhabilidade com a introdução do PCM, ou valores mecânicos elevados como a retração. Surge então a necessidade de realizar estudos de modo a melhorar a eficiência destes materiais. Neste âmbito, desenvolveu-se o presente projeto, como forma de testar a eficácia dos PCMs numa matriz argila expandida (embora isolante poderá ter vantagens mecanicamente como redução dos valores de retração, entre outros) e cimento.

1.2 Objetivo

O principal objetivo deste projeto consiste na caracterização de um compósito de matriz de argila expandida em PCM. Foram estudados vários tipos de argamassas com PCM e, apesar de mecanicamente serem admissíveis, apresentam grandes dificuldades no seu manuseamento e

trabalhabilidade devido à adição de PCM. Neste trabalho, o elemento escolhido para facilitar a agregação do PCM, além do cimento foi a Leca® (argila expandida) compreendida em duas granulometrias: Leca® XS (1,6 mm - 2,5 mm) e a Leca® S (2 mm - 5 mm). Procura-se ultrapassar as dificuldades mecânicas das argamassas “tradicionais” encontrando um ponto de equilíbrio com as propriedades térmicas, diminuindo a retração e conferindo isolamento.

1.3 Metodologia

A metodologia deste trabalho englobou quatro fases, contemplando a primeira fase uma revisão bibliográfica sobre PCMs, nomeadamente sobre os diferentes tipos de matérias, vantagens e desvantagens. Numa segunda fase, procedeu-se à avaliação experimental da incorporação de PCM num composto de Leca® e cimento. Posteriormente, procedeu-se à caracterização do compósito, analisando-o física, mecânica e termicamente.

A Fig. 1 apresenta a síntese da metodologia desenvolvida no desenvolvimento da dissertação.

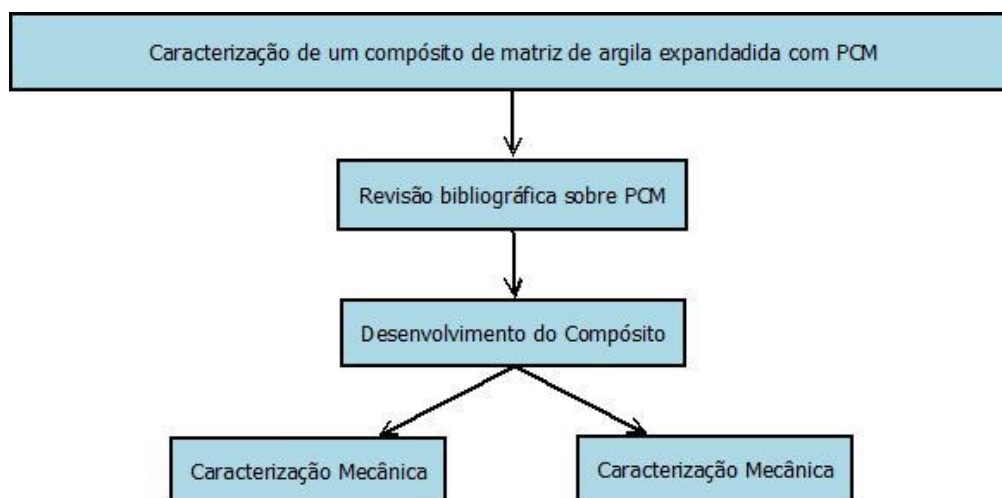


Fig. 1. Síntese da metodologia do trabalho.

1.4 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em quatro capítulos, organizados consoante os diversos assuntos expostos. Desta forma, o primeiro capítulo apresenta brevemente um enquadramento da temática e os objetivos pretendidos. O segundo capítulo aborda o estudo bibliográfico do tema, PCM, apresentando as classes, as características, as vantagens e desvantagens deste tipo de material. Contempla também as diversas aplicações, abordando

alguns trabalhos de outros autores no âmbito da utilização de PCM em materiais de construção. O terceiro capítulo refere a norma e os ensaios usados no desenvolvimento da argamassa. No quarto capítulo, descreve-se todo o processo do desenvolvimento e caracterização do novo compósito de argila expandida com PCM. Por último, no quinto capítulo expõem-se as principais conclusões que se retiram do trabalho experimental e sugestões para trabalhos futuros.

2 Materiais de Mudança de Fase

Os materiais utilizados para o armazenamento de calor latente designam-se materiais de mudança de fase [3], apresentando uma mudança de fase sólido-líquido e permitindo o armazenamento de energia [4-6]. Este tipo de armazenamento consiste na absorção ou na libertação de calor quando um material passa por uma mudança de fase do estado sólido para líquido ou de líquido para gás, ou vice-versa [7, 8].

A Fig. 2 apresenta o processo de armazenamento de calor latente em função de temperatura para o caso da transformação entre estados sólido – líquido [4-6, 9]. Durante a acumulação, o material mudará do estado sólido para líquido e, durante a recuperação voltará para o estado sólido. A uma dada temperatura, a energia é armazenada, e, quanto maior o calor, maior a concentração de energia. A entalpia de fusão aumenta com a temperatura de fusão da massa do material utilizado [10].

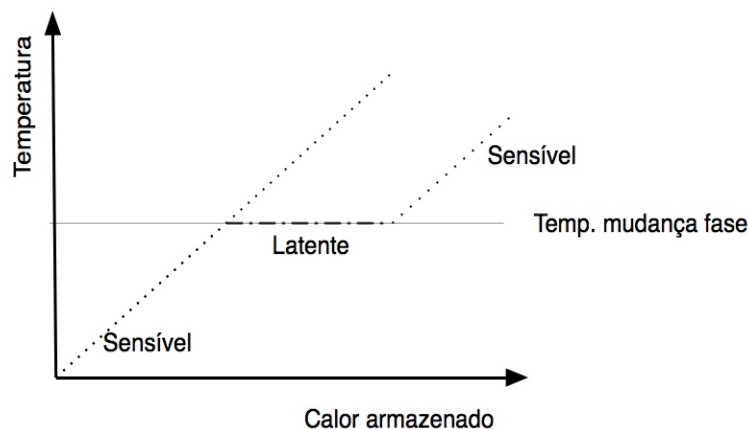


Fig. 2. Processo de armazenamento de calor latente em função de temperatura para o caso da transformação entre estados sólido – líquido [4-6, 9].

Durante o armazenamento de calor latente, numa mudança de fase de sólido para líquido, a temperatura de fusão mantém-se constante. No final do processo, o material passa à fase líquida, e o calor é armazenado sob a forma de calor sensível. Devido à pequena alteração de volume, o calor armazenado é igual à diferença de entalpia [4-6]:

$$Q = \Delta H = m\Delta h \quad (2.1)$$

O calor latente armazenado durante a mudança de fase é calculado a partir da diferença entre a entalpia nos estados sólido e líquido. O armazenamento de calor latente é particularmente apelativo uma vez que proporciona uma alta densidade de armazenamento, possibilitando armazenar o excesso de energia que, de outra forma, seria desperdiçado e,

melhorar a lacuna entre a produção e o consumo de energia. Quando se comparam sistemas de armazenamento de energia por calor sensível aos de calor latente, os segundos requerem um menor peso e volume do material. No armazenamento de calor sensível, a energia térmica é armazenada através do aumento da temperatura de um sólido ou líquido. Utiliza-se a capacidade térmica e a alteração na temperatura do material durante o processo de carga e descarga. A quantidade de calor que é armazenada depende de vários fatores, nomeadamente do calor específico do fluido, da alteração da temperatura e da quantidade de material de armazenamento [7, 8].

Os PCMs diferenciam-se dos materiais convencionais de armazenamento devido à maior capacidade de absorver e libertar calor a uma temperatura quase constante. Estes materiais são capazes de armazenar muito mais calor por unidade de volume que os materiais sensíveis de armazenamento como a água, alvenaria ou pedra [8, 11].

Quando a temperatura ambiente aumenta, as ligações intermoleculares do material quebram-se e este passa de estado sólido para líquido. O processo de mudança de fase é endotérmico, o que significa que o material absorve o calor fornecido. Quando a temperatura diminui, o PCM regressa ao estado anterior, ou seja, ao estado sólido, libertando o calor armazenado anteriormente. Estes ciclos permitem a estabilização da temperatura interior, obtida a partir da ação do PCM de conservar o calor a temperatura constante e não pelo aumento da resistência térmica dos elementos da envolvente do edifício [12]. Este mecanismo permite explicar o motivo pelo qual o armazenamento de calor sob energia latente é superior em relação ao método sensível. Para este último, a capacidade de armazenamento de calor depende do calor específico dos materiais, enquanto que para os PCMs, o armazenamento de calor além do calor específico, inclui também o calor latente. Outra vantagem dos PCMs, como já foi referido, é a sua pequena variação de temperatura entre os intervalos de armazenamento/libertação de calor [15]. Embora cada material tenha um calor latente associado a cada transição de fase, apenas alguns são adequados na utilização para melhoria do conforto térmico em edifícios. Durante a mudança de fase, os materiais devem apresentar um elevado calor latente, serem capazes de sofrer transição reversível e, por último, apresentarem uma variação pequena de volume. Devem ser também quimicamente estáveis e bons condutores de calor. Por último, uma importante propriedade é a temperatura à qual a mudança de fase ocorre, a temperatura de fusão. Esta deve ser uma temperatura adequada às condições de utilização do espaço (produção de calor por: máquinas, iluminação, atividades humanas, etc.) e às condições climáticas da envolvente do edifício [12].

2.1 Propriedades dos PCMs

Para melhor compreensão deste material e para a sua utilização no armazenamento de calor latente, o PCM deve apresentar determinadas propriedades termofísicas, cinéticas, químicas, económicas e ambientais [8, 13]. Para tal, é conveniente referir alguns conceitos das propriedades que conferem a estes materiais a capacidade de armazenamento de calor como condutividade térmica, calor específico, difusividade térmica e inércia térmica.

A condutividade térmica é uma propriedade que se define como a quantidade de calor, por unidade de tempo, que atravessa uma superfície de área unitária por unidade de diferença de temperatura entre a superfície e outra que se situa a distância unitária. Desta forma, esta propriedade determina uma maior ou menor facilidade de transferência de calor. Representa-se por λ e expressa-se em $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ [14].

O calor específico define-se como a quantidade de calor necessária para elevar de uma unidade de temperatura de uma substância, uma unidade de massa de corpo. Representa-se por c_p , e expressa-se por $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ [14]. Os materiais de construção mais comuns possuem valores entre 300 e 1500 $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ [14]. À relação entre a condutividade térmica e o calor específico designa-se difusividade térmica, expressando-se em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$, sendo apresentada na Equação (2.3).

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (2.3)$$

Representa uma medida da capacidade de um material conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de a armazenar. Materiais com elevados α_T respondem rapidamente a alterações térmicas no meio (como os metais), enquanto materiais com baixos α_T serão mais lentos a responder demorando mais tempo a estabelecer nova condição de equilíbrio [14].

A inércia térmica pode definir-se como a resistência dos sistemas térmicos para a alteração do seu estado termodinâmico. Tem origem na capacidade que os materiais possuem para armazenar calor. Quanto maior, mais energia é armazenada. A inércia térmica é definida como uma função da densidade, do calor específico e pela capacidade térmica do material. Expressa-se em $\text{J m}^{-2} \text{K}^{-1} \text{s}^{-1/2}$ e é apresentada na Equação (2.4).

$$I = (\lambda \rho c_p)^{1/2} \quad (2.4)$$

Na Tabela 1 apresentam-se as várias características, termofísicas, cinéticas, químicas, económicas e ambientais que o PCM deve apresentar.

Tabela 1 Propriedades desejáveis na seleção do PCM para aplicação em edifícios [8, 12, 13, 15-17].

Propriedades	Características desejáveis na seleção do PCM para aplicação em edifícios
Termofísicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Temperatura de mudança de fase adequada para aplicação de edifícios; 2. Elevado calor latente de fusão por unidade de volume, pois desta forma o volume de recipiente necessário para armazenamento da energia é menor; 3. Elevado calor específico para favorecer o armazenamento de calor sensível; 4. Elevada condutividade térmica para aumentar a rapidez na carga e descarga do PCM; 5. Pequena variação de volume na fase de mudança e uma pressão baixa; 6. O PCM deve derreter completamente (fusão congruente) durante a transição de fase, de modo a que as fases (sólida e líquida) sejam homogêneas; 7. Termicamente confiável (estabilidade cíclica), de modo a que o PCM seja estável em termos de temperatura de mudança de fase e calor latente de fusão, podendo ser usado a longo prazo;
Cinéticas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elevada taxa de nucleação, de modo a evitar o sobreaquecimento do PCM em fase líquida; 2. Elevada taxa de crescimento de cristais, de modo a que a recuperação de calor a partir do sistema de armazenamento seja ótima;
Químicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ciclo reversível de fusão/solidificação; 2. Quimicamente compatível com os materiais de construção/encapsulados; 3. Ausência de degradação após grande número de ciclos térmicos (fusão/solidificação), de modo a assegurar uma vida longa; 4. Não tóxico, não inflamável e não explosivo, de modo a garantir segurança; 5. Resistente à corrosão dos materiais de construção/encapsulados;
Económicas	<ol style="list-style-type: none"> 1. Abundância; 2. Disponibilidade; 3. Custo;
Ambientais	<ol style="list-style-type: none"> 1. Baixo impacto ambiental e não poluente durante a vida útil; 2. Reciclável.

2.2 Classificação dos PCMs

Os PCMs podem ser divididos em três grupos: os PCMs sólido-sólido, os PCMs sólido-líquido e, por último os PCMs líquido-gás. Destes três, os mais apropriados para o armazenamento de energia térmica são os PCMs sólido-líquido. Este tipo de material inclui os PCMs inorgânicos, orgânicos e ainda, os eutéticos [13, 15, 16, 18]. Um resumo da classificação de PCMs encontra-se na Fig. 3.

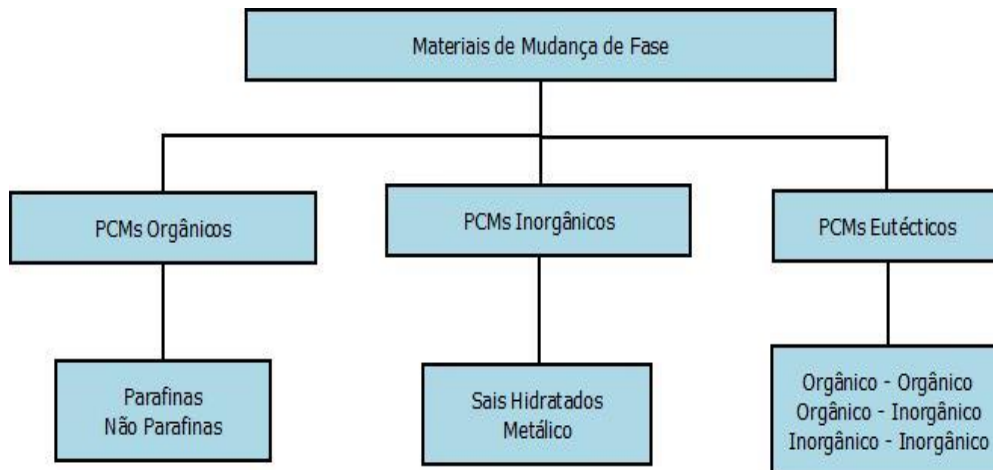


Fig. 3. Classificação dos materiais de mudança de fase [13, 15, 16, 18].

2.2.1 PCMs Orgânicos

Os PCMs orgânicos são, em geral, quimicamente estáveis, não sofrem de sobrearrefecimento, não são corrosivos ou tóxicos e apresentam um elevado calor latente de fusão. Estes PCMs podem ser divididos em duas categorias: as parafinas e as não-parafinas [6, 8, 11, 12, 19].

As ceras parafínicas são compostas por uma mistura de n-alcanos ($\text{CH}_3\text{-(CH}_2\text{)-CH}_3$). A cristalização do CH_3 na cadeia liberta uma grande quantidade de calor latente e quanto maior o comprimento da cadeia, ou seja, maior número de carbonos, maior o ponto e calor latente de fusão [8].

As parafinas comerciais são baratas e possuem uma razoável densidade de armazenamento térmico. Estão disponíveis numa ampla gama de temperaturas de fusão, são quimicamente inertes, não corrosivas, seguras, confiáveis, mais baratas, apresentam baixa pressão de vapor ao derreter, e não sofrem segregação de fase [8, 12]. Outra característica vantajosa é que o seu desempenho térmico parece não ser afetado pela ciclicidade do processo. No entanto, este material apresenta uma baixa condutividade térmica e uma grande alteração de volume durante a transição de fase. Para melhorar a condutividade térmica, são utilizadas estruturas matriciais e enchimentos metálicos, enquanto que recipientes de plástico e diferentes geometrias de contentores são utilizados para minimizar a variação de volume durante a fusão e a solidificação. No entanto, são questões que ainda não foram totalmente solucionadas [12]. As parafinas estão também ligadas à inflamabilidade, um problema comum neste tipo de materiais, devido ao seu ponto de ignição, (a temperatura mínima na qual o material consegue libertar uma mistura inflamável com o ar, em quantidade suficiente para iniciar a combustão em condições

atmosféricas normais). O ponto de ebulição, peso molecular e temperatura de autoignição são os fatores mais importantes para a ignição [20].

Os PCMs orgânicos não parafínicos são os mais numerosos dos PCMs e apresentam propriedades muito diferentes. Ao contrário das parafinas que possuem propriedades muito semelhantes, cada um destes materiais tem as suas próprias propriedades [8]. As não-parafinas incluem ácidos gordos, ésteres, álcoois e glicóis. Apresentam um custo muito superior ao das parafinas. São materiais inflamáveis e não devem ser expostos a uma temperatura excessivamente elevada, a chamas ou a agentes oxidantes. Além destas características, as não-parafinas apresentam ainda um elevado calor de fusão mas baixa condutividade térmica [8].

O grupo com maior interesse refere-se ao dos ácidos gordos uma vez que estes apresentam pontos de fusão numa gama de temperaturas relativamente baixa, calor latente de fusão elevado, sofrem pequenas variações de volume durante a transição de fase e não sofrem sobrearrefecimento durante a solidificação [8, 12]. No entanto, a sua desvantagem é o elevado custo relativamente às parafinas. São ainda levemente corrosivos [8]. A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de PCMs orgânicos [21].

Tabela 2 – Exemplos de PCMs Orgânicos [21].

Designação Comercial	Temperatura de Fusão / °C	Entalpia de Fusão / kJ kg ⁻¹	Calor Específico / kJ kg ⁻¹ k ⁻¹	Condutividade Térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹
Parafina C16–C18	20–22	152	-	-
Parafina C13–C24	22–24	189	0,21	0,21
Parafina C28	28	244	2,16	0,15
<i>Butyl stearate</i>	19	140	-	-
1-Dodecanol	26	200	-	-
<i>n-Octadecane</i>	28	200	-	-
<i>Vinyl stearate</i>	27-29	122	-	-

2.2.2 PCMs Inorgânicos

Os PCMs inorgânicos apresentam, em geral, um elevado calor de fusão, elevada condutividade térmica, são baratos e não inflamáveis. Apesar destas vantagens, a maior parte destes materiais é corrosiva para os metais, sofre sobrearrefecimento e separação de fases. O sobrearrefecimento ocorre quando o material não solidifica seguidamente à temperatura abaixo do ponto de fusão, incitando uma cristalização lenta a temperaturas inferiores. Alguns materiais não libertam calor, de modo que nestes casos só existe armazenamento de calor. Este problema pode ser contornado com aditivos específicos [4]. O problema de separação de fases ocorre quando, em substâncias constituídas por dois ou mais constituintes, durante o processo de solidificação por parte de um componente, o outro permanece na fase líquida, conduzindo à

separação de fases ou decomposição. Este comportamento é resultado da diferença da temperatura de fusão nos dois componentes da mistura. Os PCMs inorgânicos mais comuns são os sais hidratados. Estes são materiais bastante atrativos para o armazenamento de energia térmica pois apresentam uma densidade de armazenamento e condutividade térmica elevadas e um custo razoável comparando com as parafinas [12]. A alta densidade de armazenamento destes materiais é bastante difícil de manter durante o ciclo pois estes derretem congruentemente com a formação de pequenos sais, tornando o processo irreversível e deste modo, reduzindo a capacidade de armazenamento [12].

Outra categoria importante inclui material metálico. Esta categoria inclui os metais de baixa fusão e os eutéticos de metal. Estes materiais ainda não foram seriamente considerados para a tecnologia PCM devido ao peso. No entanto, quando o volume é algo a ponderar, estes materiais são candidatos devido ao calor de fusão elevado e à condutividade térmica elevada [8]. A Tabela 3 apresenta alguns exemplos de condutividade térmica e calor latente de fusão de PCMs inorgânicos [21].

Tabela 3 - Exemplos de PCMs Inorgânicos [21].

Designação Comercial	Temperatura de Fusão / °C	Entalpia de Fusão / kJ kg ⁻¹	Calor Especifico / kJ kg ⁻¹ k ⁻¹	Condutividade Térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹
KF.4H ₂ O	18,5	231	1,84 (s) 2,39 (l)	-
Mn(NO ₃).6H ₂ O	25,8	125,9	-	-
CaCl ₂ .6H ₂ O	29,7	171	1,45 (s)	-

2.2.3 PCMs Eutéticos

Os PCMs eutéticos resultam da mistura de dois ou mais componentes com um ponto de fusão muito baixo, cada um dos quais fundindo e congelando congruentemente formando uma mistura de componentes cristalinos. Estes materiais estão comumente divididos em três categorias: eutéticos orgânico-orgânico, orgânico-inorgânico e, por último, inorgânico-inorgânico [17].

O custo elevado destas misturas é uma desvantagem, sendo atualmente cerca de duas ou três vezes superior ao dos compostos orgânicos ou inorgânicos [22]. A Tabela 4 apresenta uma comparação entre os diversos tipos de PCMs [9, 12, 13, 15, 23].

Tabela 4 Comparação entre os diferentes tipos de PCMs [Fonte: Adaptado de [9, 12, 13, 15, 23].

Classificação	Vantagens	Desvantagens
PCMs Orgânicos	<p>Disponibilidade numa extensa gama de temperaturas</p> <p>Não sofrem segregação de fase</p> <p>Elevado ponto de fusão</p> <p>Pequena variação de volume durante a mudança de fase</p> <p>Não sofrem sobrearrefecimento</p> <p>Quimicamente inerte, estável e reciclável</p> <p>Boa compatibilidade com outros materiais, incluindo de construção</p> <p>Não corrosivos</p>	<p>Baixa condutividade térmica</p> <p>Variação de volume relativamente elevada</p> <p>Inflamável</p> <p>Não compatíveis com recipientes de plástico</p>
PCMs Inorgânicos	<p>Elevado ponto de fusão</p> <p>Elevada condutividade térmica</p> <p>Baixa variação de volume</p> <p>Disponibilidade a baixo custo</p> <p>Baixo impacto ambiental</p> <p>Não inflamáveis</p> <p>Potencial reciclável</p> <p>Compatíveis com recipientes de plástico</p>	<p>Sobrearrefecimento</p> <p>Corrosão</p> <p>Segregação de fase</p> <p>Irritante</p> <p>Elevada pressão e vapor (induzindo perda de água e causando mudança progressiva no comportamento térmico durante o processo cíclico térmico)</p> <p>Elevada variação de volume durante a mudança de fase</p>
Eutéticos	<p>Temperatura de fusão bem definida</p> <p>Elevada capacidade de armazenamento de calor</p>	<p>Carência de dados disponíveis sobre as propriedades termofísicas</p>

Na Fig. 4 são apresentadas as temperaturas de fusão e as entalpias de mudança de fase para PCMs existentes. A partir da Fig. 4 conclui-se que o armazenamento de calor latente em edifícios pode ser conseguido com as parafinas, ácidos gordos e sais hidratados.

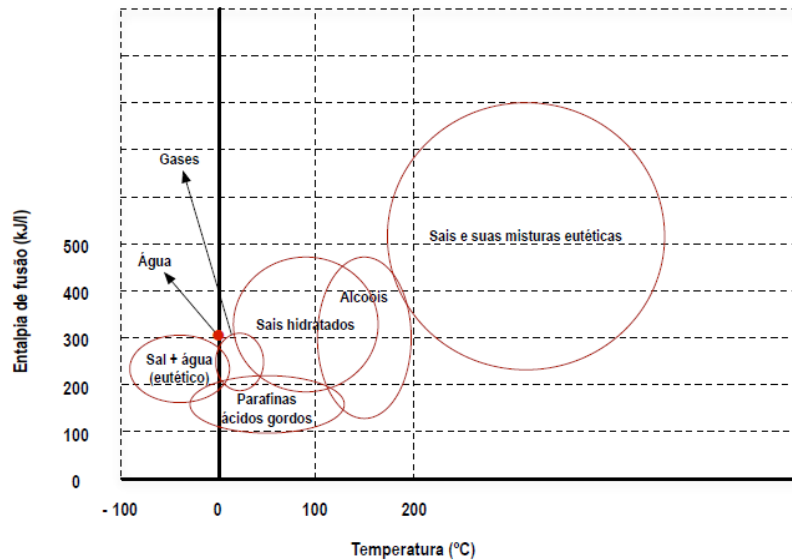


Fig. 4. Temperatura de fusão e entalpias de mudança de fases para diferentes PCMs [9, 12].

Dos materiais anteriores, os que apresentam maior entalpia de fusão são os sais hidratados. As parafinas são as que apresentam as características mais vantajosas para a sua utilização em edifícios uma vez que apresentam temperaturas de fusão na gama de temperaturas de interesse.

2.3 Incorporação em materiais

O PCM pode ser incorporado em elementos e materiais de construção por vários métodos, sendo estes: incorporação direta, imersão, encapsulamento (macroencapsulamento e microencapsulamento).

2.3.1 Incorporação Direta

A incorporação direta é o método mais simples, viável e económico no qual PCMs líquidos ou em pó são diretamente adicionados ao material de construção como gesso ou betão durante a produção. Neste método, não existe necessidade de equipamento extra. No entanto, este processo apresenta algumas desvantagens, sendo as principais a incompatibilidade com os materiais de construção e fugas [13, 15].

2.3.2 Imersão

No método de imersão, componentes de estruturas de construção como gesso, tijolo ou betão, são mergulhados em PCMs fundidos para depois absorverem os PCMs nos poros internos

com ajuda de elevação capilar [13, 15, 24]. Uma desvantagem deste método refere-se ao derrame, principalmente após grande número de ciclos, não sendo adequado para longos períodos. Embora a incorporação direta e a imersão possuam diferentes processos de operação, ambos incorporam os PCMs diretamente nos materiais de construção convencionais [13, 15].

2.3.3 Macroencapsulamento

Na técnica de macroencapsulamento, uma quantidade significativa de PCM (até vários litros) pode ser empacotada em recipientes tais como tubos, esferas, painéis ou sem forma definida para serem utilizados em elementos de construção [13, 25, 26]. O macroencapsulamento apresenta vantagens como facilidade de transporte e manuseamento, pode ser projetado para atender uma aplicação pretendida e melhora a compatibilidade de PCM com o ambiente, agindo como uma barreira. No entanto, o recipiente deve ser compatível com o material circundante. É possível ainda, reduzir a variação de volume externa, algo importante para aplicação em edifícios [13, 25, 26]. Esta técnica permite evitar grandes separações de fases, o aumento da taxa de transferência de calor e, por último, proporciona uma estrutura de autorregulação para o PCM [26]. No entanto, esta técnica apresenta também desvantagens como uma condutividade térmica pobre e necessidade de proteção contra destruição (furos ou pregos nas paredes) [13, 27]. Desta forma, o encapsulamento deve ser otimizado para a taxa de transferência de calor eficaz e, ao mesmo tempo, deve ser resistente à corrosão, termicamente estável e fiável [6].

Os recipientes mais rentáveis são garrafas plásticas (frascos de polietileno de elevada ou baixa densidade, frascos de polipropileno), latas de metal banhadas a estanho e latas de metal leve. No entanto, a corrosão pode ser um problema, levando a danos internos e externos caso não seja bem selado [26]. A Fig. 5 mostra um painel CSM (*Compact Storage Module*) que contém PCM [28].

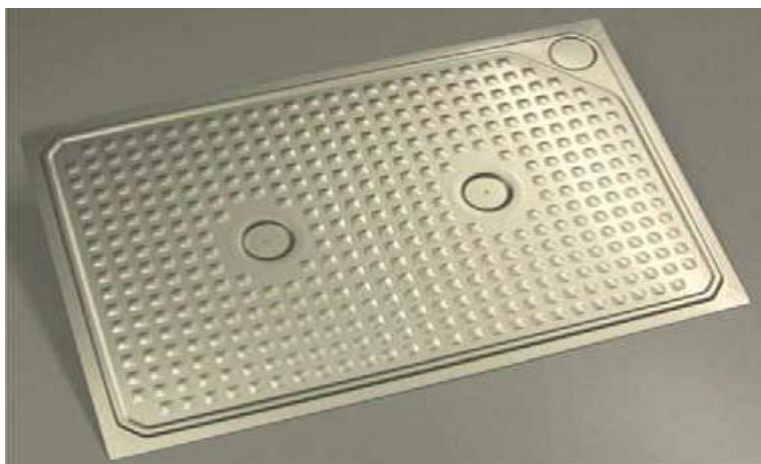


Fig. 5. Painel CSM contendo o PCM [28].

2.3.4 Microencapsulamento

No microencapsulamento, pequenas partículas de PCM que variam de 1 μm a 1000 μm são colocadas numa fina película sólida feita normalmente de polímeros naturais e sintéticos [13, 15, 25, 29]. Esta película mantém a sua forma e previne o PCM de fugas [15]. Existem vários métodos de microencapsulamento: físicos, físico-químicos e químicos [30]. O microencapsulamento apresenta várias vantagens como o impedimento de derrame do PCM durante a transição de fases através da construção de uma barreira e, fornecimento de alta taxa de transferência de calor utilizando maior área de superfície por unidade de volume. É resistente à mudança de volume durante a fase de transição e é térmica e quimicamente estável [9, 13, 15, 29, 31-34]. No entanto, esta técnica apresenta também alguns problemas como os associados ao facto da rigidez da película impedir a convecção natural e, portanto, diminuir a taxa de transferência de calor podendo afetar as propriedades mecânicas dos materiais de construção e custo de investimento elevado [13, 26, 35].

Foram realizadas análises térmicas e ensaios de ciclo térmico na parafina microencapsulada e descobriu-se que esta após 1000 ciclos ainda mantém o seu perfil geométrico e a capacidade armazenamento de calor [36]. Recentemente, a National Gypsum produziu um tipo de painéis de gesso com Micronal PCM produzido pela BASF. Este tipo de painéis é designado por National Gypsum ThermalCORE Panel e é apresentado na Fig. 6.

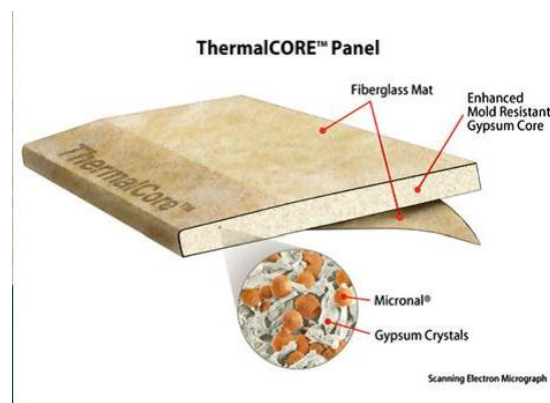


Fig. 6. Placa de gesso cartonado com PCM microencapsulado [37].

2.3.5 PCMs em nanopartículas

Hoje em dia, a evolução tecnológica permite encapsular PCM em nanoescala. O tamanho da cápsula do PCM desempenha um papel importante e pode expandir as fronteiras das aplicações dos PCMs encapsulados. As nanocápsulas são estruturalmente mais estáveis do que as microcápsulas [30, 38]. A fim de aumentar a condutividade de calor, metais ou partículas de óxido metálico são adicionados à base fluída de PCM em certas proporções, formando assim o PCM nano-compósito. As nanopartículas podem alterar a estrutura do fluido de base. Podem também alterar a micro-convecção entre o fluido de base e as partículas sólidas, bem como entre as próprias partículas. Deste modo, a condutividade térmica do PCM pode ser aumentada [39]. Um estudo deste género de PCMs consistiu em investigar as características de transferência de calor e comportamentos termodinâmicos de um PCM com dispersão de nanopartículas de alumina e alumínio.

2.3.6 Impregnação de matrizes porosas

É possível provocar o aumento da transferência de calor através da utilização de matrizes porosas impregnadas com PCM. No entanto, o desempenho destes materiais depende diretamente da porosidade e da condutividade térmica. Uma vez que a condutividade térmica diminui com o aumento da porosidade, é possível dizer que existe um valor ótimo de porosidade da matriz que assegura uma boa taxa de impregnação sem comprometer a condutividade [40].

Num estudo, foi utilizada grafite dispersa em eritritol líquido, a fim de aumentar a condutividade térmica do PCM [41]. Concluiu-se que a utilização de agentes de enchimento altamente condutores é eficaz na melhoria da condutividade térmica. A Fig. 7 apresenta a análise de um composto de mudança de fase com eritritol misturado com grafite ou partículas de níquel [53].

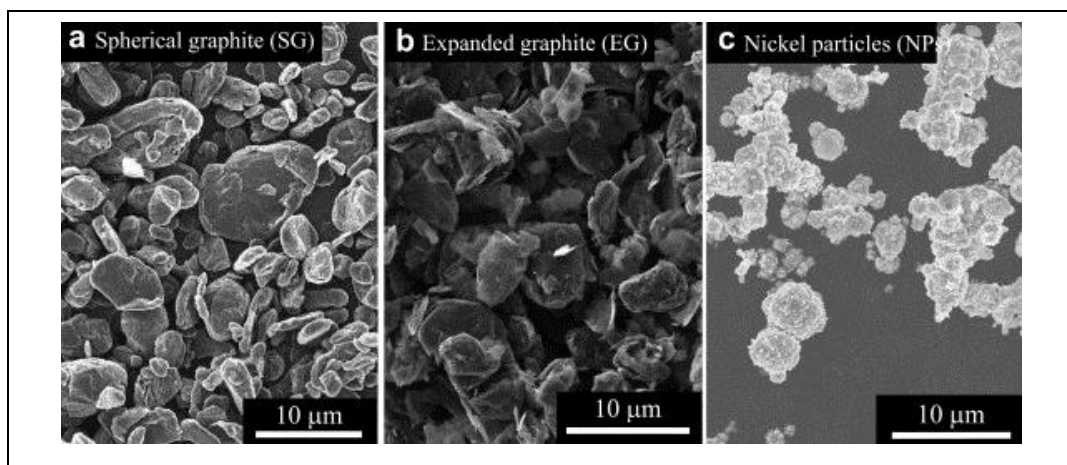


Fig. 7. Análise de composto de mudança de fase com eritritol misturado com grafite ou partículas de níquel [41].

2.3.7 PCMs encapsulados em esferas

O armazenamento a frio em cápsulas esféricas consiste em encapsular o PCM em bolas de polietileno e acumulá-las num tanque de água fria. As trocas diretas de calor entre a água e as bolas fazem o PCM solidificar e fundir do exterior para o interior da esfera [39].

Num estudo experimental, foi utilizada a água como material de mudança de fase, tendo este sido encapsulado em cinco tipos de cápsulas diferentes de cobre e apresentando o mesmo volume interno. A cápsula esférica foi a que apresentou o melhor desempenho no armazenamento de energia térmica [42].

Outros estudos avaliaram parâmetros como o tamanho da cápsula, a espessura da parede, a temperatura exterior e a temperatura inicial dos PCMs. Concluíram que o tempo de solidificação total é maior conforme o tamanho da cápsula esférica. Este tempo aumenta também com o aumento da temperatura exterior. A condutividade térmica do material de encapsulamento tem uma forte influência no tempo de solidificação [43].

Num outro estudo experimental sobre a transferência de calor durante o congelamento e a fusão utilizando água no interior de uma cápsula esférica, foram utilizadas cápsulas com diferentes diâmetros e materiais. Os parâmetros analisados foram o tamanho e natureza do material da cápsula esférica, a taxa de fluxo de volume e a temperatura do fluido de transporte de calor. Os resultados experimentais mostraram que a taxa de recuperação de energia é melhor quando se usam cápsulas metálicas, aumentando seu o tamanho e reduzindo as taxas de fluxo de volume do fluido de transferência de calor [44].

3 Normas e metodologias de ensaio

Para o desenvolvimento de uma argamassa é necessário cumprir vários requisitos. No presente trabalho seguir-se-á a Norma Europeia EN 998-1 [45], específica para argamassas de revestimento (reboco). Embora o objetivo deste trabalho seja estudar uma matriz e não uma argamassa de reboco optou-se por adotar a norma indicada ao nível da consideração de propriedades, para se obter um termo de comparação.

3.1 Norma Europeia EN 998-1

3.1.1 Grupos e classes

A Norma Europeia EN 998-1 [45] é válida para argamassas de revestimento exterior e interior fabricadas industrialmente. Esta norma contempla argamassas secas (com pré-doseamento em fábrica) e argamassas em pasta. Daqui distinguem-se seis grupos distintos de argamassas referidas na Tabela 5.

Tabela 5 Grupos de argamassas presentes na Norma Europeia EN 998-1 [45].

Abreviatura	Tipo de argamassa
GP	Argamassa genérica para revestimento exterior ou interior <i>General purpose rendering/plastering mortar</i>
LW	Argamassa leve para revestimento exterior ou interior <i>Lightweight rendering/plastering mortar</i>
CR	Argamassa colorida para revestimento exterior <i>Coloured rendering mortar</i>
OC	Argamassa para revestimento exterior monocamada <i>One coat rendering mortar for external use</i>
R	Argamassa de reparação <i>Renovation mortar</i>
T	Argamassa de isolamento térmico <i>Thermal insulating mortar</i>

Esta norma classifica ainda os rebocos em categorias relativas a três parâmetros de caracterização do produto endurecido, particularmente: a resistência mecânica aos 28 dias (CS I a CS IV), capilaridade (W0 a W2) e condutividade térmica (T1 e T2). Na Tabela 6 são apresentados os valores de referência consoante as diferentes classes e os distintos parâmetros.

Tabela 6 Classificação de argamassas de acordo com a EN 998-1 [45].

Propriedades	Classes	Valores de Referência
Resistência mecânica aos 28 dias	CSI	0,4 a 2,5 N mm ⁻²
	CSII	1,5 a 5,0 N mm ⁻²
	CSIII	3,5 a 7,5 N mm ⁻²
	CSIV	> 6 N mm ⁻²
Absorção de água por capilaridade	W0	Não especificado
	W1	$c \leq 0,40 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1/2}$
	W2	$c \leq 0,20 \text{ kg m}^{-2} \text{ min}^{-1/2}$
Condutividade térmica	T1	$\lambda \leq 0,1 / \text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
	T2	$\lambda \leq 0,2 / \text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

3.1.2 Requisitos

Uma argamassa deve, de acordo com o referido anteriormente, respeitar a regulamentação presente na Norma Europeia EN 998-1 [45]. Desta forma, como se decidiu seguir a norma anteriormente referida, a matriz deve cumprir algumas exigências que a regulamentação impõe. Como tal, é necessário verificar se o produto final da matriz produzida neste trabalho cumpre os requisitos apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 Requisitos para as características de uma argamassa genérica (GP) e uma argamassa leve (LW) e métodos de ensaio respetivos [45].

Propriedades	Método de ensaio	Requisitos	
		GP	LW
Massa volúmica (produto endurecido) / kg m ⁻³	EN 1015-10 [46]	Intervalo de valores declarado	Intervalo de valores declarado $\leq 1300 \text{ kg m}^{-3}$
Resistência à compressão / N mm ⁻²	EN 1015-11 [46]	CS I a CS IV	
Aderência / N mm ⁻² Configuração da rotura – FP: (A,B ou C)	EN 1015-12 [46]	\geq valor declarado e FP	
Absorção de água por capilaridade / g dm ⁻² min ^{-1/2}	EN 1015-18 [46]	W0 a W2	
Coefficiente de difusão ao vapor	EN 1015-19 a b [46]	\leq valor declarado	
Condutividade Térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹	Valor médio Tabelado (P = 50 %)	EN 1745 [47], Tabela A.12	
Reação ao fogo (classe)	EN 13501-1 [48]	Classe de resistência ao fogo apropriada.	
Durabilidade ($\lambda_{10, dry}$)	Aderência e permeabilidade à água após ciclos de gelo/degelo. Requisitos válidos para o local de aplicação pretendido		

Por motivos de foco, apenas foram consideradas algumas destas propriedades como indicado na Fig. 8. Adicionalmente, foram avaliadas outras propriedades, nomeadamente o calor específico e entalpias de fusão e solidificação e, devido ao facto de serem afetadas pela presença do PCM e por serem fundamentais na análise do comportamento do material compósito.

3.2 Formulação da argamassa

A mistura obtida resulta de uma série de ensaios iniciais com vista à avaliação da possibilidade da introdução do PCM microencapsulado. Para além da mistura padrão, ou seja, da mistura de Leca®, cimento e água, testaram-se duas misturas com PCM. Todas elas apresentavam bom aspeto e sem tendência para fissuração após algumas horas em ambiente com condições controladas (temperatura de $20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e humidade relativa de $50\% \pm 5\%$). As amostras utilizadas medem $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 1\text{ cm}$. No entanto, as argamassas com Leca® XS apresentavam melhor comportamento em termos de aspeto e trabalhabilidade. O PCM utilizado foi o *Micronal DS 5040 X*, caracterizado por apresentar uma forma física pulverizada, densidade entre $250 - 350\text{ kg m}^{-3}$, ponto de fusão de 23 °C , uma faixa de operação entre 10 °C e 30 °C , capacidade de armazenamento total de 135 kJ kg^{-1} e capacidade de calor latente de 100 kJ kg^{-1} [49]. Este foi adicionado a cimento do tipo I, classe 42,5R, de acordo com a NP-EN197-1 [50] e água. Na Tabela 8 são apresentadas as misturas que se testaram.

Tabela 8 Composições das argamassas testadas (% em massa)

Formulação	LXS00	LS00	LXS01	LS01	LXS02
Cim CZ,I, 42.5R	30	30	15	15	5
Leca®	70	70	60	60	70
PCM	-	-	25	25	25

3.3 Caracterização da argamassa

3.3.1 Avaliação de desempenho

A caracterização da argamassa pretende avaliar o seu desempenho em termos de propriedades de interesse do produto endurecido. Destas, fazem parte propriedades físicas como densidade e capilaridade, mecânicas como resistências à flexão e compressão e módulo de elasticidade e, por último, térmicas como a condutividade e difusividade térmicas, calor

específico e entalpias de fusão e solidificação. Na Fig. 8, representa-se um resumo destas propriedades características de uma argamassa.

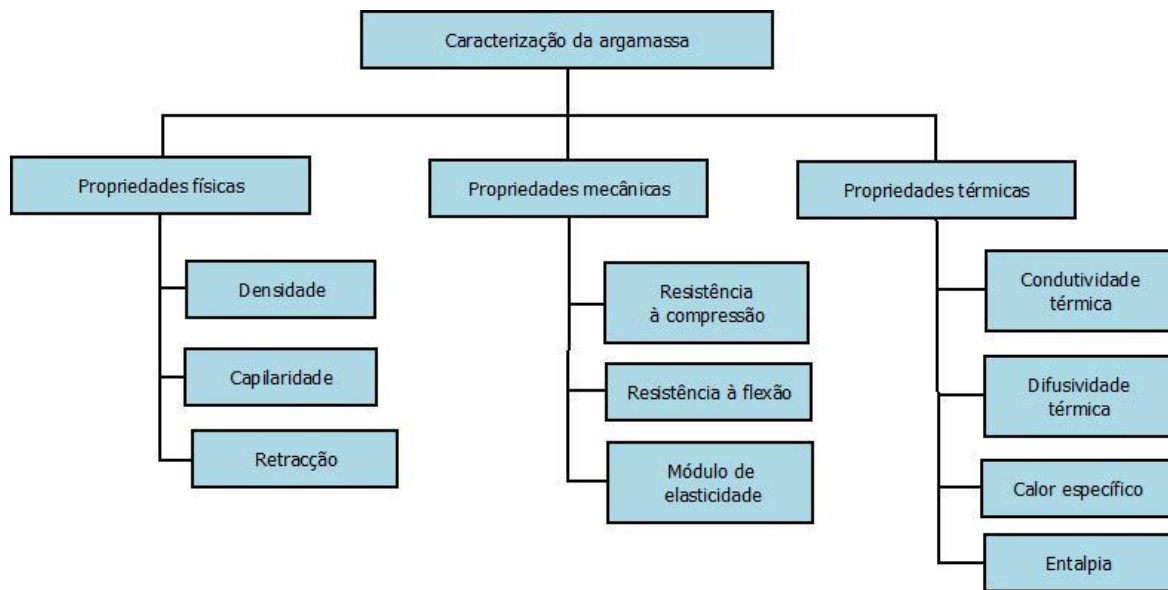


Fig. 8. Propriedades que caracterizam a argamassa.

3.3.1.1 Propriedades físicas e mecânicas

3.3.1.1.1 Amassado de uma argamassa

O presente método de ensaio define o modo de mistura para obter-se uma boa homogeneização, tendo como referência a EN NP 196-1 [51]. Neste método, amassa-se durante 30 s em marcha lenta na amassadora e de seguida, com uma espátula, elimina-se o produto que se encontra nas paredes do recipiente. Posteriormente, amassa-se novamente durante 1 min na amassadora e aplica-se imediatamente, sem repouso.

3.3.1.1.2 Densidade de um amassado

O referido método de ensaio define a forma de determinar a densidade de um amassado utilizando um copo de volume conhecido. Tem como referência o *Guía Técnica UEAtc para la evaluación de las colas para revestimientos cerâmicos* [52]. Depois do produto amassado como referido anteriormente, pesa-se o copo de volume conhecido vazio. De seguida, enche-se o copo com massa até aproximadamente metade da sua capacidade, aglomera-se o conteúdo com o auxílio da mesa compactadora, dando 5 batidas com a cadência de aproximadamente 1 batida por segundo. Enche-se o copo e repete-se a compactação de forma idêntica à anteriormente

referida. Por fim, elimina-se o excedente de produto, alisando a superfície com o auxílio de uma espátula. Para o cálculo da densidade (g cm^{-3}) aplica-se Equação (3.1):

$$\rho = \frac{m_1 - m_0}{v_c} \quad (3.1)$$

onde:

m_1 = massa com o copo cheio;

m_0 = massa com o copo vazio;

v_c = Volume conhecido do copo.

3.3.1.1.3 Preparação e conservação de provetes

O princípio deste método de ensaio define a preparação e conservação dos provetes de uma argamassa. Para tal, necessita-se de uma câmara de temperatura e humidade controladas, moldes de dimensões $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$ e $2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm} \times 28 \text{ cm}$ e roscas metálicas de contacto.

Como metodologia, enche-se o molde até metade e compacta-se deixando cair alternadamente cada extremo do molde de uma altura de aproximadamente 5 cm, por 10 vezes. Repete-se o passo enchendo o molde e alisa-se a superfície com o auxílio de uma espátula, de modo a retirar o excesso de produto. Após 24 horas, desmoldam-se os provetes, sendo posteriormente introduzidos numa câmara climatizada com temperatura $23 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e humidade $50 \pm 5 \text{ \% HR}$ (ou outras estabelecidas por normas específicas de ensaios), até à data de ensaio (normalmente após 28 dias, mas pode variar de acordo com produtos e normas específicas) [51].

3.3.1.1.4 Determinação das variações dimensionais e de massa de uma argamassa endurecida

A finalidade deste método é determinar as variações de dimensões e de massa de provetes prismáticos conservadas em condições padrão. Para tal, necessita-se de 3 provetes de dimensões de $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm} \times 16 \text{ cm}$, com as correspondentes pontas de contacto incorporadas. Pesam-se os provetes e medem-se as suas dimensões através de um micrómetro na seguinte periodicidade: ao desmoldar os provetes, após 7 dias de secagem e, por último, após 28 dias de secagem [53]. A Fig. 9 exhibe o micrómetro e a balança, materiais necessários para este ensaio.



(a)



(b)

Fig. 9. Ensaio de determinação das variações dimensionais e de massa; (a) Micrómetro; (b) Pesagem das amostras.

A retração expressa-se em mm m^{-1} , e para cada provete, é determinada a partir da Equação (3.2):

$$\text{Retração} = \frac{l_0 - l_1}{l_0} \times 100 \quad (3.2)$$

onde:

l_0 = comprimento inicial de cada provete (após a desmoldagem)

l_1 = comprimento de cada provete após cada medição

As variações de massa expressam-se em gramas e para cada provete calculam-se as diferenças entre o valor inicial, após a desmoldagem e o valor após 7 e 28 dias de cura. Em ambos os casos, o resultado final é obtido pela média dos valores obtidos com 3 provetes.

3.3.1.1.5 Determinação da resistência à flexão e compressão de uma argamassa

O objetivo deste ensaio é determinar as resistências mecânicas à aplicação de forças de flexão e compressão em provetes de uma argamassa. Ambos os ensaios apresentam como referência a EN 1015-11 [46].

Para tal, necessita-se de 3 provetes com dimensões de 4 cm × 4 cm × 16 cm e prensas automáticas de flexão e compressão. Após 28 dias de cura, os provetes retiram-se da câmara climatizada e são ensaiados, primeiro à flexão e, posteriormente, à compressão. A Fig. 10 mostra a prensa automática, marca *Controls*, modelo 65-L1142. As Fig. 11 e Fig. 12 mostram os ensaios de flexão (gama de medição: 2÷15 kN) e compressão (gama de medição: 30÷300 kN), respetivamente.



Fig. 10. Prensa automática.



Fig. 11. Ensaio de flexão.

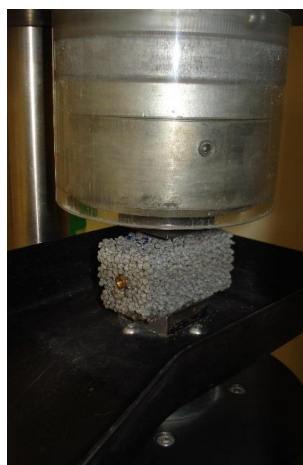


Fig. 12. Ensaio de compressão.

De modo a determinar a resistência à flexão, o provete deve ser colocado na máquina de flexão (Fig. 11) com uma das faces laterais de moldagem sobre os cilindros de apoio e o seu eixo longitudinal perpendicular aos apoios e centrado em relação a estes. Dá-se início ao ensaio aumentando a carga uniformemente à velocidade de 115 kPa s⁻¹. Por fim, regista-se a carga máxima (F_f) suportada pelo provete até à sua rutura.

A resistência à flexão (R_f) em N mm⁻² é dada pela Equação (3.3):

$$R_f = \frac{1,5 F_f l}{b d^2} \quad (3.3)$$

onde:

F_f = carga máxima suportada pelo provete / N

l = distância entre os cilindros de apoio / mm

$b; d$ = dimensões interiores do provete / mm

No seguimento do ensaio anterior, são aproveitadas as metades dos provetes resultantes do ensaio anterior. Centram-se lateral e longitudinalmente cada meio-provete em relação aos pratos da máquina de compressão (Fig. 12). Como no ensaio anterior, uma das faces laterais de moldagem deverá ficar em contato com os pratos da máquina de compressão. Dá-se início ao ensaio aumentando a carga uniformemente à velocidade de 245 kPa s⁻¹. No final, regista-se a carga máxima F_c suportada pelo provete até à sua rutura.

É possível obter a resistência à compressão (R_c) em N mm⁻² a partir da Equação (3.4):

$$R_c = \frac{F_c}{S} \quad (3.4)$$

onde:

F_c = carga máxima suportada pelo provete / N

S = área de superfície sobre a qual se aplica a carga / mm² ≈ 1600

3.3.1.1.6 Determinação do módulo de elasticidade de uma argamassa

O ensaio tem como objetivo determinar a frequência de ressonância de um provete de argamassa em vibração longitudinal, a partir da qual se deduz o seu módulo de elasticidade dinâmico. Para tal, necessita-se de dois provetes com dimensões de 25 mm × 25 mm × 285 mm.

Este ensaio realizou-se com amostras curadas 7 e 28 dias após da preparação dos provetes. Coloca-se o provete no banco de ensaio e fixa-se ao suporte através das roscas laterais, garantindo o contacto entre o recetor e emissor com os extremos do provete (Fig. 13). Através do gerador de frequências executa-se um varrimento desde 1 até 10 kHz e procura-se a frequência fundamental de ressonância, ou seja, de maior amplitude [54].

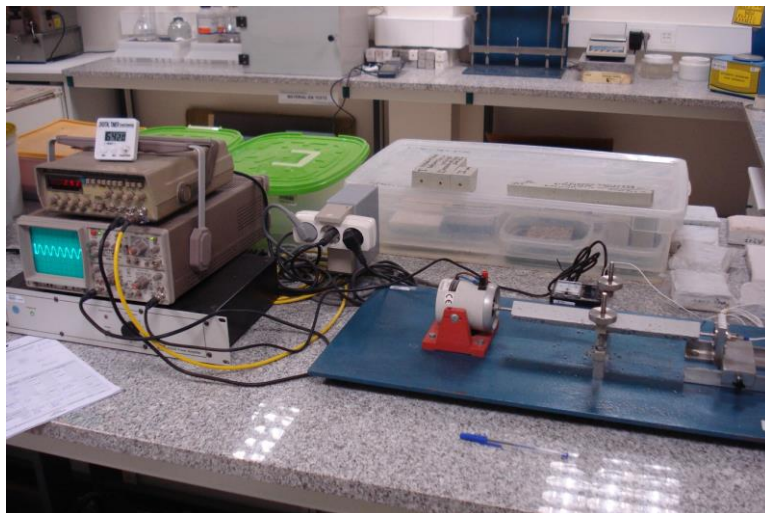


Fig. 13. Ensaio de determinação do módulo de elasticidade – equipamento de medição de frequência de ressonância.

A Equação (3.5) permite obter o módulo de elasticidade (E), expresso em MPa, resultando da média de, no mínimo, duas medições:

$$E = 1,85m f^2 \quad (3.5)$$

onde:

m = massa do provete / g

f = frequência da ressonância / Hz

3.3.1.1.7 Determinação da absorção de água por capilaridade

O ensaio permite quantificar a quantidade de água absorvida por difusão capilar, e tem como referência a norma EN 1015-18 [46]. Para tal, necessita-se de provetes com dimensões de 160 mm × 40 mm × 40 mm. As amostras, resultantes dos ensaios de resistência à flexão, foram mantidas em laboratório com ambiente controlado até à data de ensaio (em sala condicionada com temperatura de 20 °C e H.R. de 60 %).

Como procedimento, secam-se as amostras em estufa ventilada para se determinar a massa seca e colocam-se submersas em 10 mm de água para medição da massa de água que penetrou após 10 e 90 min, avaliada por pesagem.

O coeficiente de absorção de água por capilaridade (C) expressa-se em $\text{kg m}^{-2} \text{h}^{-0.5}$ e é calculado a partir da Equação (3.6):

$$C = \frac{m_{sat} - m_{seco}}{A\sqrt{t}} 10^3 \quad (3.6)$$

onde:

m_{sat} : massa dos provetes após absorção de água por capilaridade / g

m_{seco} : massa dos provetes secos / g

A : área dos provetes (no caso dos prismáticos assume-se 1600 mm²)

t : tempo, em hora

No entanto, experimentalmente o valor de C foi quantificado em $\text{g dm}^{-2} \text{min}^{-1/2}$.

3.3.1.2 Propriedades Térmicas

3.3.1.2.1 Método *Transient Plane Source (Hot Disk AB)*

O método *Transient Plane Source* permite caracterizar termicamente materiais. O equipamento utilizado foi o *TPS 2500 S* da fabricado pela *Hot Disk AB* que se encontra disponível no novo Laboratório Térmico da Universidade de Aveiro (CICFANO- Complexo Interdisciplinar de Ciências Físicas Aplicadas à Nanotecnologia e Oceanografia, Fig. 14). Este método opera por relaxação térmica tradicional, ou seja, uma determinada quantidade de calor é fornecida à amostra em estudo. Consequentemente, esta tende a libertar a energia térmica recebida. Durante esta libertação é estimada a condutividade térmica e o calor específico. Em termos práticos, este método consiste em colocar uma sonda entre duas peças da mesma amostra, tal como é possível visualizar na Fig. 15. Esta sonda apresenta duas funções, operando inicialmente como aquecedor e, posteriormente como sensor de temperatura.



Fig. 14. Equipamento *TPS 2500 S* no Laboratório Térmico da UA.

Neste método existem dois parâmetros fundamentais: a potência de aquecimento e o tempo de medida. A potência de aquecimento corresponde ao calor transmitido para a amostra e o tempo de medida é o período necessário para avaliar termicamente a mesma. Estes dois parâmetros necessitam de ser bem conjugados de acordo com as propriedades térmicas dos materiais em teste, de modo a alcançar medidas térmicas fiáveis. A estratégia para o conseguir, consiste na experimentação e avaliação da qualidade dos resultados experimentais fornecidos pelo *software* do equipamento, *Hot Disk Thermal Analyser 7.1*. O cuidado a reter pelo técnico, é manter a amplitude da onda de calor no interior da amostra inferior às dimensões da mesma e superior à dimensão da sonda [55].

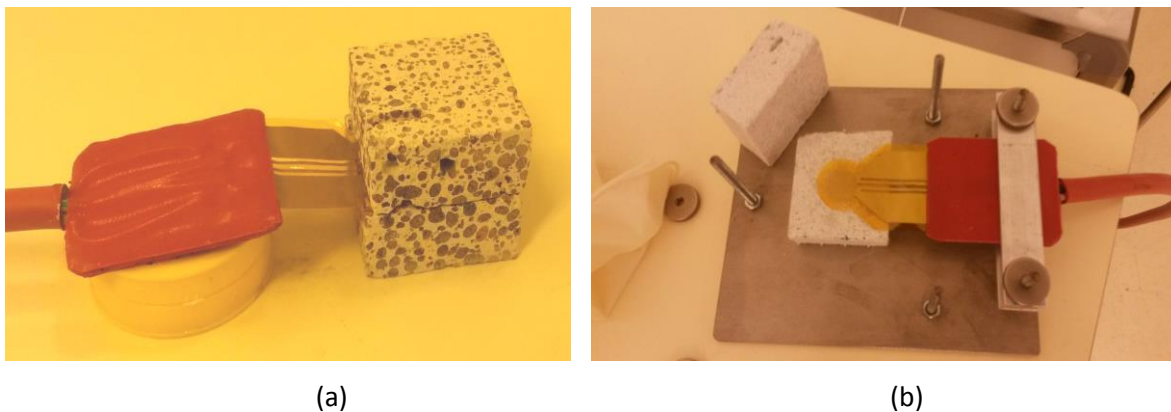


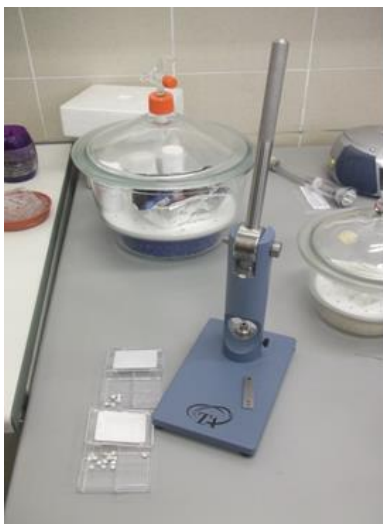
Fig. 15. Montagem para a caracterização térmica da amostra; (a) Sonda entre a amostra; (b) Montagem para ensaio a temperatura variável (entre -20 °C e 70 °C).

3.3.1.2.2 Ensaio MDSC (*Modulated Differential Scanning Calorimeter*)

Estes ensaios foram realizados utilizando o método *MDSC*, num equipamento da *TA Instruments*, modelo Q100, no laboratório do Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. O fluxo de calor e capacidade calorífica foram calibrados a 2 K min^{-1} utilizando padrões de índio e safira. Foram utilizados um período de modulação de 120 s e uma amplitude de temperatura $\pm 53 \text{ °C}$. Um fluxo de $50 \text{ cm}^3 \text{ min}^{-1}$ de N_2 foi aplicado na calibração e nas medições [56].

Os ensaios realizaram-se às quatro amostras distintas: às duas amostras que não possuíam PCM (LS00 e LXS00) e nas restantes amostras com PCM (LS01 e LXS01). Nestas últimas, uma vez que para a realização do ensaio é necessário as amostras em estado de pó, realizaram-se ainda amostras sem amassar o PCM. Para tal, as amostras LXS01 e LS01 foram testadas de duas formas: depois de endurecida e amassada (amassando também o PCM), e sem água (só o cimento e a Leca[®] foram amassados, o PCM foi posteriormente adicionado à mistura em pó). A ausência da água nas amostras não endurecidas não parece um problema relevante, uma vez que a água, depois de endurecida, evapora. Desta forma, não ocorre um afastamento muito grande da realidade. Como forma de facilitar o entendimento geral, cada amostra em que o PCM não foi amassado, será chamada NA, como XS01NA enquanto que cada amostra com PCM amassado terá no nome A, como XS01A. Cada amostra foi submetida a dois ciclos de aquecimento/arrefecimento na gama 0-30 °C.

O padrão e a amostra foram colocados em recipientes distintos, designados por cadinho, e prensadas. Estas amostras são muito pequenas, entre 5 e 7 mg. Na Fig. 16 apresentam-se imagens do equipamento utilizado para este ensaio.



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 16. Equipamentos utilizados para ensaios realizados no departamento de química da Universidade de Coimbra; (a) Prensa de cadinhos; (b) Equipamento MDSC; (c) Cadinhos de referência e de amostra; (d) Registo das medições.

4 Resultados e discussão

4.1 Desenvolvimento de uma argamassa com PCM, resultados experimentais

Neste estudo, pretende-se observar o comportamento térmico de uma argamassa de matriz de argila expandida e cimento em PCM. A introdução de argila expandida tem por objetivo verificar a possibilidade de solucionar alguns aspetos negativos verificados em argamassas correntes com PCM, como elevada tendência à fissuração, trabalhabilidade difícil, tempos de presa muito longos e, especialmente, limitação na quantidade de PCM possível de adicionar.

Neste capítulo, pretende-se avaliar a possibilidade de desenvolvimento de uma nova argamassa com capacidades específicas de armazenamento de calor. Tal capacidade consegue-se através da introdução de PCM, micro encapsulado, misturado com cimento e água.

A realização deste estudo abrangeu os seguintes passos:

- Formulação da argamassa com e sem PCM - Preparação de amostras com diferentes formulações com vista a determinar os diferentes componentes de mistura;
- Caracterização experimental da argamassa com e sem PCM – Realização de ensaios mecânicos físicos e térmicos, com o objetivo de avaliar as propriedades do material;
- Análise crítica dos resultados – Nesta etapa caracteriza-se a argamassa preparada segundo a Norma Europeia EN 998-1 [45] e comparam-se os valores obtidos com os de outros materiais com PCM.

4.1.1 Produto em pasta

Todas as misturas apresentaram um comportamento razoável em pasta aquando da incorporação de PCM. Nenhuma apresentou tendência para fissuração. Uma vez que as misturas com Leca® XS apresentaram um melhor comportamento, avaliaram-se duas adições alternativas, nenhuma apresentando problemas nem tendência para fissuração. Selecionou-se a amostra LXS01, por se considerar que esta detinha uma maior quantidade de ligante e por ser a que possuía as mesmas proporções que a amostra LS01.

Desta forma, na Tabela 9 apresentam-se os resultados obtidos do comportamento em pasta para os compósitos de Leca®, XS e S, sem PCM (LXS00 e LS00) e com PCM (LXS01 e LS01). Esta Tabela apresenta duas escalas (-, +, ++, e -1, 0, 1) que se traduzem na avaliação empírica, relativamente a uma argamassa corrente. O símbolo – indica o menor valor, ou mais desvantajoso da escala, representando um manuseamento pior, colando à ferramenta, enquanto que o símbolo ++ traduz o comportamento mais favorável, apresentado um bom manuseamento

e não colando muito. Relativamente à segunda escala, o -1 indicia um aspeto pior ao contrário do 1 que traduz bom aspeto, enquanto o 0 corresponde a aspeto razoável. Mediante a análise da Tabela 9, verifica-se que a argamassa com Leca® LXS01 apresenta um melhor comportamento que a Leca® LS01, no que concerne à trabalhabilidade e ao aspeto final. Mais ainda, verifica-se que, ao contrário do que acontece com Leca® S01, a adição de PCM não prejudica o comportamento da pasta com Leca® XS01. Em complemento, o próprio resultado ao nível da perceção do produto endurecido a 24 horas, 3, 5 e 28 dias, confirma a mesma evidência. Conforme esperado, as argamassas com Leca® S apresentam uma densidade menor em relação às suas equivalentes com Leca® XS. Também se verifica que a adição de PCM contribui para um incremento de densidade da pasta, muito provavelmente, como resultado do maior preenchimento de vazios. Nas Fig. 17 e Fig. 18 é possível observar o aspeto que as placas apresentavam após 7 dias de cura.

Tabela 9 Resultados relativos a propriedades mensuráveis (% água e densidade) e outras obtidas por perceção empírica, das argamassas em avaliação.

Formulação	Leca® XS00	Leca® XS01	Leca® S00	Leca® S01
H ₂ O Teórica	21%	36%	20%	36%
Densidade / kg m ⁻³	740	850	640	820
Trabalhabilidade (Manuseamento dos provetes)	+	++	+	-
Aspeto após 24 h	1	1	1	-1
Aspeto após 3-5 dias	1	1	1	0
Aspeto após 28 dias	1	1	1	0



Fig. 17. Amostras de leca sem PCM; (a) LXS00; (b) LS00.



Fig. 18. Amostras de leca com PCM; (a) LXS01; (b) LS01.

4.1.2 Produto endurecido

A Tabela 10 apresenta o resumo das propriedades mecânicas e físicas das matrizes LXS00, LXS01, LS00 e LS01 e Formulação L (resultante dos trabalhos de Sá [21] e referente a uma argamassa “convencional” com adição de PCM), para comparação. Pormenores sobre os ensaios encontram-se no Anexo A.

Tabela 10 Resumo das propriedades mecânicas e físicas do produto endurecido.

Produto / Propriedade	LXS00	LXS01	LS00	LS01	Formulação L [21]
MVAed / kg m ⁻³	750	750	630	690	1170
Retração / mm m ⁻¹ (7-28 dias)	0,33	1,96	0,21	1,65	6,40
Rf / MPa	1,60	1,21	0,96	0,77	1,32
Rc / MPa	4,51	3,11	2,27	2,21	2,40
E /GPa	4,8	2,1	2,9	1,6	4,8
Coefficiente de capilaridade / g dm ⁻² min ^{-1/2}	1,24	1,87	0,77	2,06	4,89
Aderência / N mm ⁻²	-	-	-	-	0,35
Configuração da rotura – FP: (A,B ou C)	-	-	-	-	0,35
Coefficiente de difusão ao vapor / μ	-	-	-	-	5 a 10*
Reação ao fogo (classe)	F	F	F	F	F

* valor extrapolado a partir da densidade [57]

Pela Tabela 10 observa-se que a adição do PCM aumenta a retração, possivelmente como resultado da maior introdução de água de amassadura, uma vez que é um fator que influencia fortemente a retração [58]. Embora o aumento deste parâmetro seja uma desvantagem, qualquer um destes valores é significativamente inferior ao obtido no caso da Formulação L, que ultrapassa o limite recomendado para este parâmetro. Ainda assim, sugere-se uma melhoria a

este nível, obtida pela introdução de Leca®, direcionando para uma matriz mais estável no domínio dimensional. Refere-se, no entanto, que trabalhos paralelos apresentam resultados de alguma retração plástica. Deste modo, estes valores obtidos de retração para as amostras de Leca® necessitam de ser utilizados com prudência, uma vez que poderá sugerir alguma tendência a fissuração em fase plástica. Uma possível correção para esta desvantagem passa pela introdução de um superplastificante ou um agente redutor de retração, que induz a redução da necessidade de água.

É possível observar pela mesma tabela que a adição de PCM provoca a diminuição das resistências à flexão e compressão relativamente à LXS01 e LS01. Esta redução pode ocorrer devido ao facto do PCM não possuir propriedades ligantes diminuindo, deste modo, as resistências [22]. Outra justificação poderá remeter, mais uma vez, para o efeito da adição de maior quantidade de água de amassadura [22]. Adicionalmente, é possível constatar que os valores da Leca® S01 são menores que os da Leca® XS01, o que era antecipado, uma vez que a primeira apresenta uma superfície mais porosa e menor resistência mecânica. Observa-se também, que o módulo de elasticidade diminui quando é adicionado o PCM, apresentando uma diferença bastante visível, provavelmente devido ao aumento da porosidade. Em consonância, as resistências mecânicas por flexão e compressão também diminuem [58]. Os valores obtidos para estes parâmetros são aceitáveis, por refletirem um bom equilíbrio entre resistência e densidade menor. Quanto ao coeficiente de absorção de água por capilaridade, observa-se o seu aumento com a adição do PCM em ambos os casos. Sugere-se que este aumento seja consequência de uma maior quantidade de água de amassadura que pode aumentar a porosidade e, por inerência, maior capilaridade [58]. Os resultados obtidos, sintetizados na Tabela 10, evidenciam que as matrizes de argila expandida são mais leves que as argamassas correntes - estas observações partiram da análise dos valores de massa volúmica - o que do ponto de vista mecânico é positivo, uma vez que esta argamassa possui uma boa resistência. Adicionalmente, confere tensões menores, resultado de um módulo de elasticidade relativamente baixo. Os valores obtidos dependem não só da adição do PCM, como também da porosidade presente na Leca® e indiciam que estas matrizes além de resistentes, são também deformáveis.

Uma vez que as matrizes com Leca® XS01 são as que apresentam melhor trabalhabilidade e aspeto, decidiu-se seguir o trabalho com a Leca® referida anteriormente. Desta forma, na Tabela 11 analisam-se algumas das propriedades exigidas pela regulamentação presente na Norma Europeia EN 998-1 [45] e consequente classificação de argamassa escolhida segundo os critérios normativos.

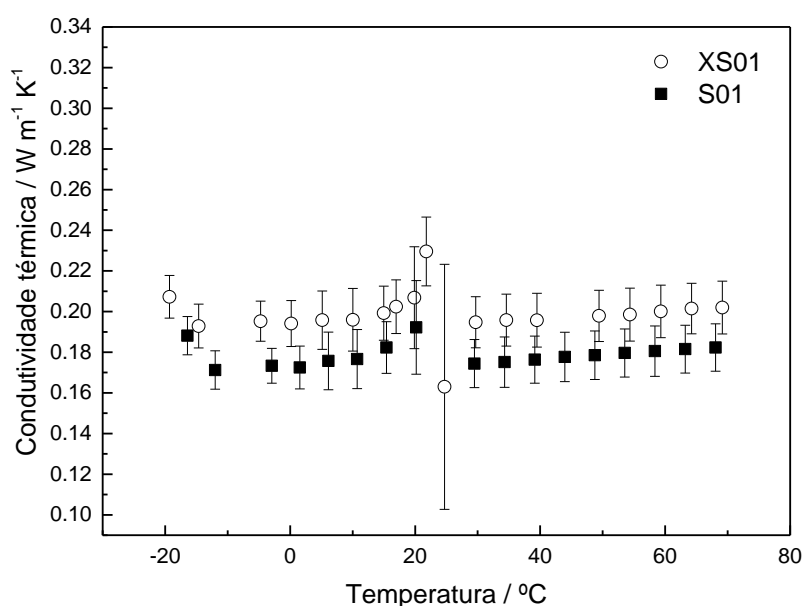
Tabela 11 Classificação da amostra LXS01 segundo a Norma Europeia EN 998-1 [67].

Propriedades (argamassa endurecida)	LXS01	Classificação
Massa volúmica / kg m^{-3}	750	LW
Resistência à compressão / N mm^{-2}	3,11	CS II
Absorção de água por capilaridade / $\text{g dm}^{-2} \text{min}^{-1/2}$	1,87	W2

4.1.3 Comportamento térmico

4.1.3.1 Condutividade térmica

Nesta secção, apresentam-se os resultados relativos à condutividade térmica das amostras LXS01, LS01 e formulação L. Relativamente às amostras de Leca® sem PCM, LXS00 e LS00, revelaram-se impossíveis de avaliar, devido à rugosidade e à presença de muitas cavidades de ar. A Fig. 19 apresenta as condutividades térmicas em função da temperatura para cada caso, LXS01 e LS01. Verifica-se que são muito semelhantes, embora a LXS01 seja ligeiramente mais condutora que a LS01, por apresentar menos ar na sua composição. Na transição de fase verifica-se pouca qualidade das medidas através das barras de erro. Este aspeto é abordado com mais detalhe na discussão dos resultados de calor específico obtidos pelo mesmo método, *Transient Plane Source*. Mediante a análise da Fig. 20 verifica-se que a Formulação L é mais condutora que as amostras de Leca®. A presença de ar, devido às características porosas é uma justificação para tal resultado.

**Fig. 19.** Resultados de condutividade térmica para as amostras XS01 e S01.

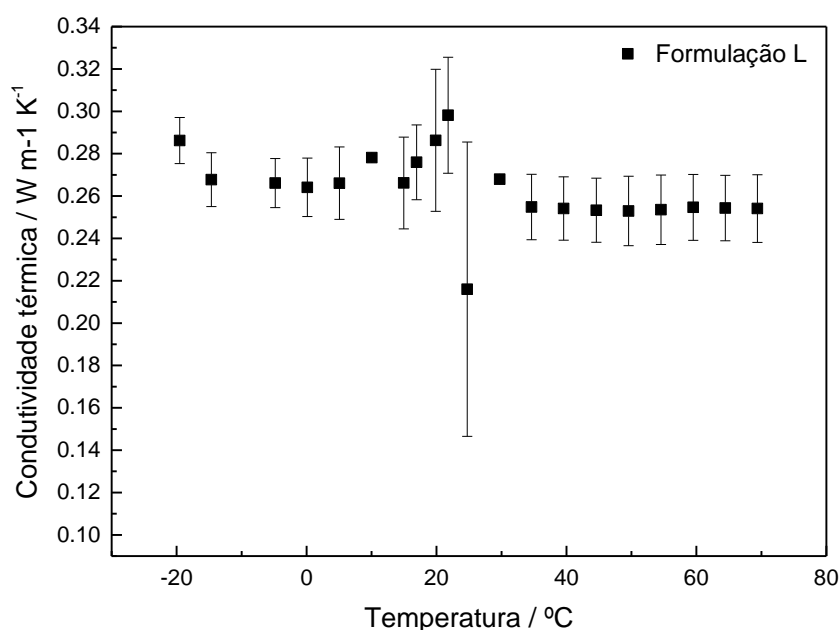


Fig. 20. Resultados de condutividade térmica para a Formulação L.

4.1.3.2 Calor específico

As Fig. 21 e Fig. 22 apresentam o calor específico obtido pelo método *Transient Plane Source* para as amostras LXS01 e LS01 e Formulação L, respetivamente.

Na Tabela 12 apresentam-se dois parâmetros de medida (adquiridos por experimentação) para a obtenção de resultados com qualidade estatística. Os parâmetros em questão são a potência de aquecimento e o tempo de medida. Estes permitem que a sonda opere (como referido anteriormente) primeiramente como aquecedor e, posteriormente, como sensor de temperatura. Deste modo, a potência de aquecimento é a potência necessária para aquecer a amostra de forma coerente, enquanto que o tempo de medida é o tempo no qual a sonda mede a variação de temperatura em função do mesmo. A composição das duas amostras, LXS01 e LS01, são muito semelhantes, diferindo apenas no tamanho do agregado leve (Leca®).

Tabela 12 Parâmetros de medida utilizados para a caracterização térmica.

	Antes da transição do PCM		Durante a transição de fase do PCM		Depois da transição de fase do PCM	
	Potência / W	Tempo de medida / s	Potência / W	Tempo de medida / s	Potência / W	Tempo de medida / s
XS01	0,010	80	0,015	160	0,010	160
S01	0,010	80	0,015	160	0,010	160
Formulação L	0,020	80	0,025	160	0,020	160

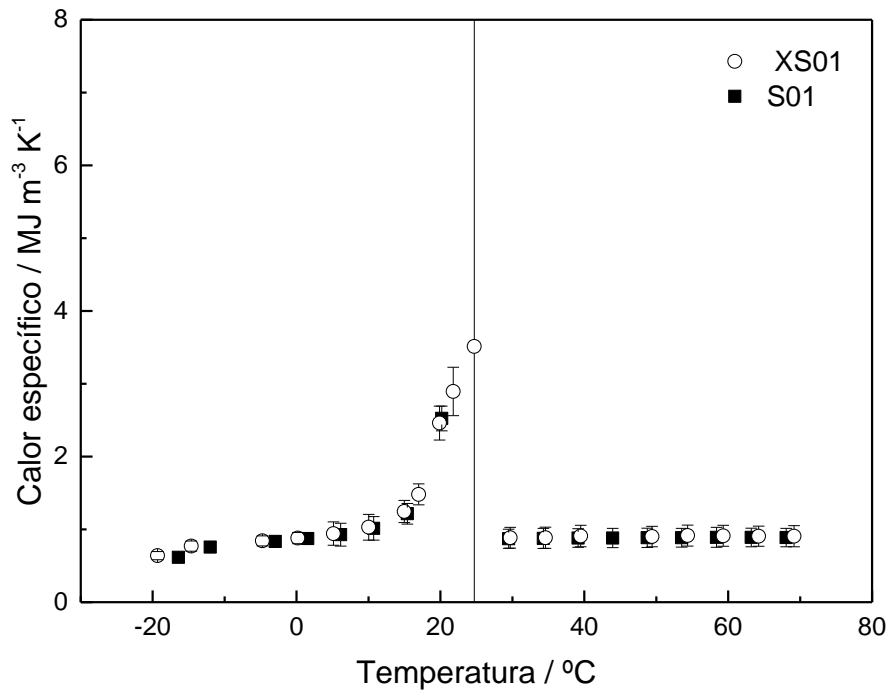


Fig. 21. Calor específico relativo às amostras de XS01 e S01 através do método *Transient Plane Source*.

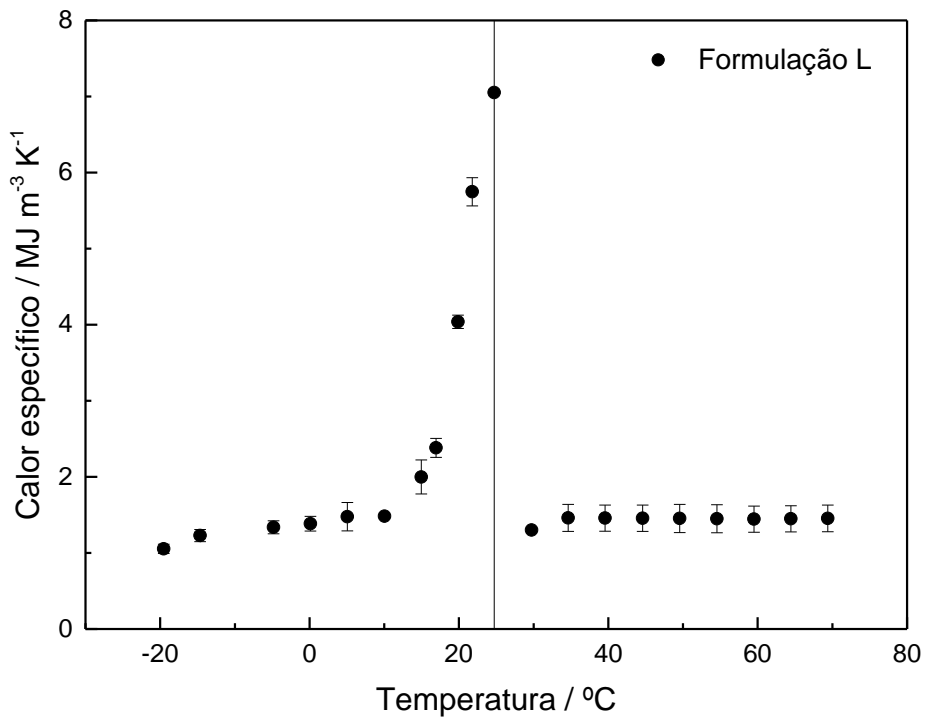


Fig. 22. Calor específico relativo à formulação L através do método *Transient Plane Source*.

Através da Fig. 21 verifica-se que para os extremos da temperatura, a caracterização térmica para ambos os casos foi obtida com qualidade estatística, não acontecendo o mesmo na transição de fase. Este resultado justifica-se, principalmente, por o modelo matemático do *software* da *Hot Disk AB* considerar que o calor específico do material em estudo é constante, independentemente da variação da temperatura. Nestes casos, ocorre uma mudança de fase, do

estado sólido para o estado líquido, provocando uma grande variação de calor específico. Uma vez que este método é de relaxação térmica é preciso ter muita perícia na caracterização térmica de materiais com transições de fase. Ou seja, fornecer calor à amostra de modo a que não ocorra mudança de fase, quando próximo da transição de fase.

Ainda através das Fig. 21 e Fig. 22 é possível verificar que os valores obtidos para a Formulação L são muito próximos as das amostras de Leca®.

4.1.3.3 Ensaio MDSC

4.1.3.3.1 Fluxo de calor

Nesta secção apresentar-se-ão os resultados do fluxo de calor das amostras de PCM puro e Leca® contendo ou não PCM. Na Fig. 23 apresenta-se o gráfico do fluxo de calor da amostra de PCM puro.

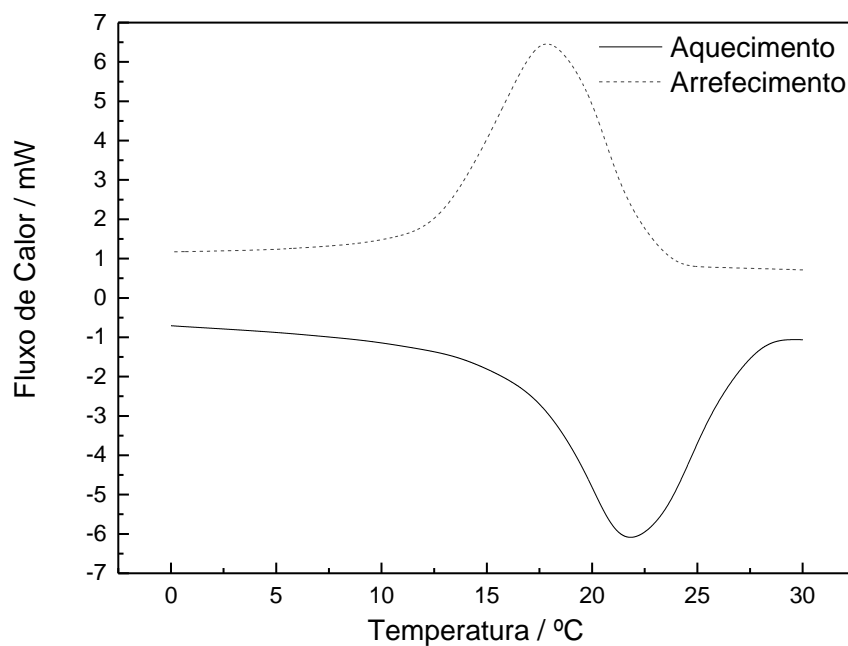


Fig. 23. Fluxo de calor no PCM puro.

Através da Fig. 23 verificam-se variações no fluxo de calor, quer no aquecimento quer no arrefecimento. É possível verificar que a curva de aquecimento é uma curva típica de um processo endotérmico, absorvendo calor e que a curva de arrefecimento apresenta uma curva comum para um processo exotérmico, libertando calor.

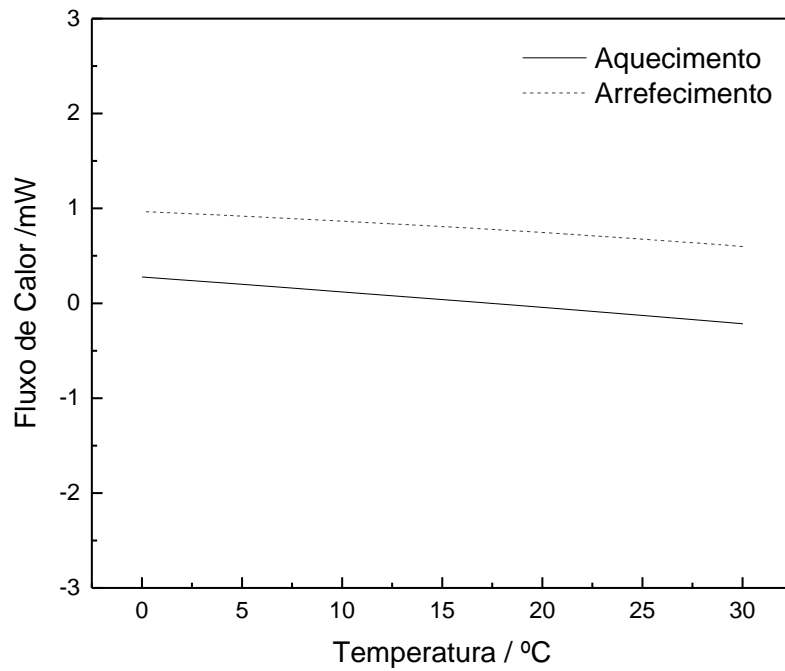


Fig. 24. Fluxo de calor na amostra LXS00.

A Fig. 24 apresenta os resultados para a amostra XS00 e, como previsto, observa-se que não existe variação do fluxo de calor, sendo praticamente constante, apesar da variação de temperatura. Similarmente à amostra LXS00, também a amostra LS00 não apresenta uma variação relevante de fluxo de calor (ver Anexo B.1). A Fig. 25 mostra o fluxo de calor da amostra XS01NA.

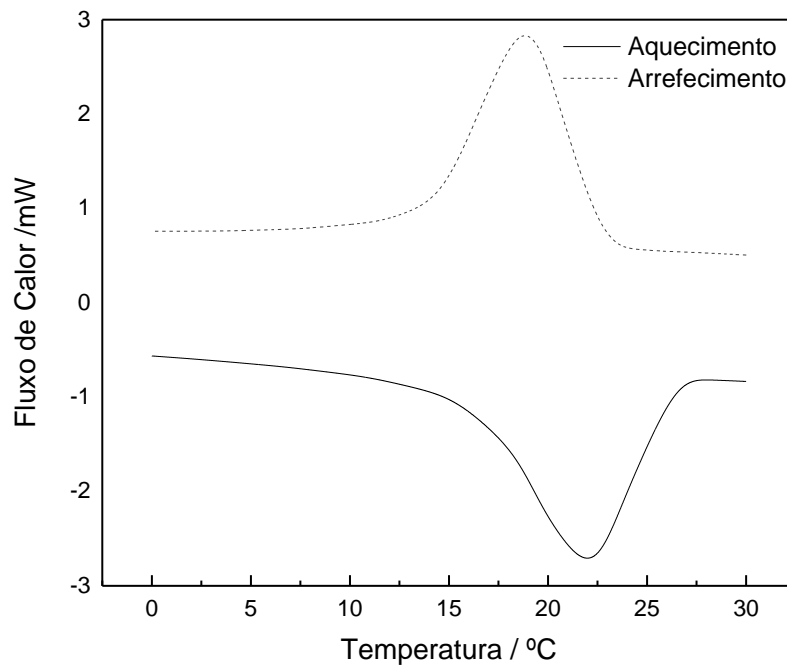


Fig. 25. Fluxo de calor na amostra XS01NA.

Pela Fig. 25 é possível verificar picos de intensidades menores que os do PCM puro e podendo tal ser explicado por a concentração do PCM ser menor nesta amostra. A Fig. 26 apresenta o fluxo de calor obtido para a amostra XS01A.

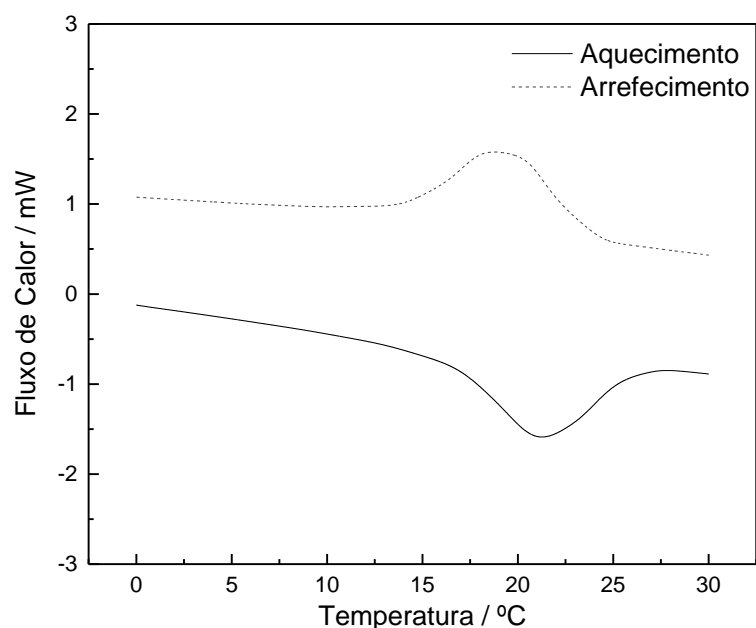


Fig. 26. Fluxo de calor na amostra XS01A.

Através da Fig. 26 é possível verificar que, comparando com os resultados anteriores, nomeadamente, o PCM puro e a amostra XS01NA, esta é a que apresenta picos de intensidade menores. Este resultado pode justificar-se pela aglomeração das cápsulas de PCM.

Relativamente às amostras de Leca[®] S os resultados do fluxo de calor encontram-se no Anexo B.1, apresentando na Tabela 13 um resumo dos picos obtidos através da análise dos gráficos. Com o objetivo de comparar com a formulação L [21], trabalharam-se os dados utilizados noutro estudo com a mesma formulação [59]. Os resultados encontram-se também no Anexo B.1.

Tabela 13. Picos obtidos através da análise dos gráficos de fluxo de calor.

Propriedade	Micronal DS 5040 X	LXS01		LS01		Formulação L	
		NA	A	NA	A	NA	A
Pico de Fusão / °C	21,80	21,97	20,96	21,71	21,20	21,65	21,00
Pico de Solidificação / °C	17,87	18,86	18,93	18,53	19,29	18,80	18,20
Pico de Fusão / mW	-6,09	-2,71	-1,59	-2,10	-0,54	-0,98	-1,02
Pico de Solidificação mW	6,46	2,38	2,57	2,26	1,17	1,85	1,76

Os resultados obtidos para a amostra S01NA são muito idênticos à amostra XS01NA, provavelmente devido à similaridade de características. No entanto, os valores obtidos desta amostra são de intensidade menor que os da amostra XS01NA. Relativamente à amostra S01, esta é a que apresenta picos de menor intensidade, provavelmente devido à maior porosidade que apresenta. É um material isolante, possuindo baixa condutividade térmica e diminuindo a variação do fluxo de calor.

Constata-se que os picos obtidos por a amostra LNA são de menor intensidade que as amostras de Leca®. Verifica-se que, em relação aos resultados adquiridos na amostra LA, os valores obtidos nesta são muito próximos. Em comparação com as amostras de Leca®, com exceção da XS01A (que apresenta picos de intensidade próximos), a amostra LA é a que apresenta picos de menor intensidade. A Tabela 13 apresenta um resumo dos picos obtidos através da análise dos gráficos de fluxo de calor.

A partir dos gráficos de fluxo de calor foi possível obter as entalpias de fusão e solidificação. Estes parâmetros foram determinados utilizando o programa *TA Universal Analysis 2000*, um *Software* fornecido pela *TA Instruments* [60]. Na Fig. 27, mostram-se as entalpias de fusão e solidificação do PCM puro, que apresentam valores de $91,22 \text{ J g}^{-1}$ e $88,30 \text{ J g}^{-1}$, respetivamente. Posteriormente, na Fig. 28 mostram-se as entalpias de fusão e solidificação da amostra XS01NA.

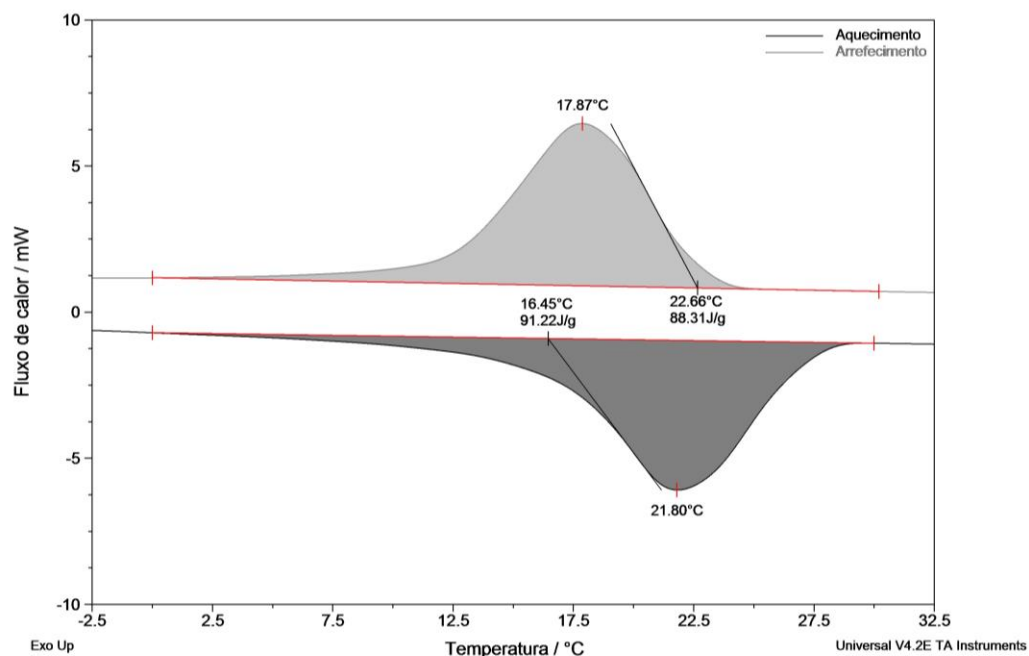


Fig. 27. Entalpias de fusão e solidificação do PCM puro.

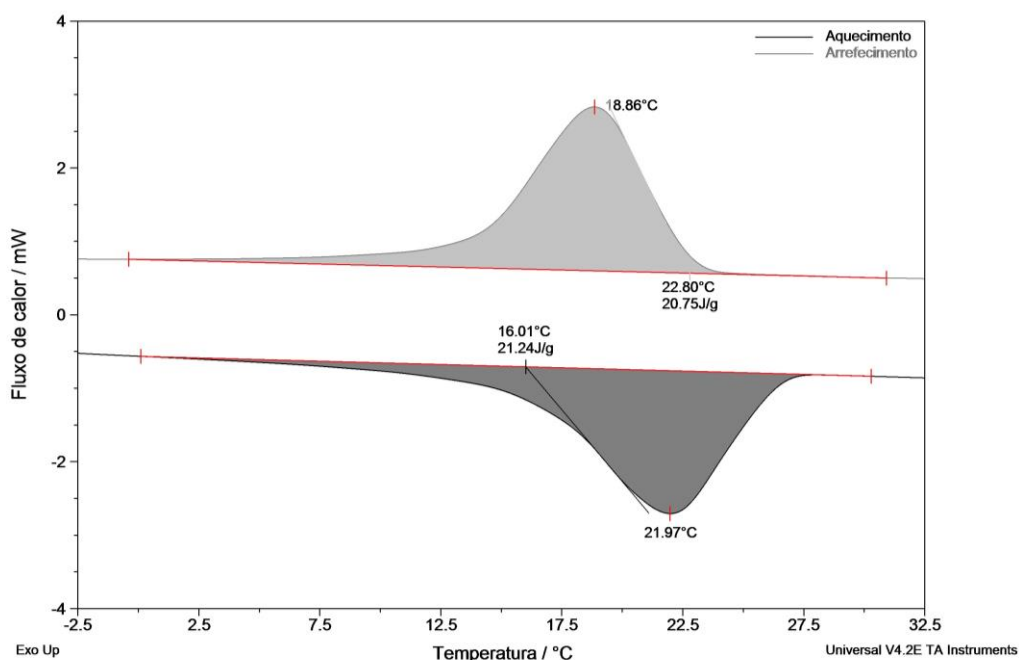


Fig. 28. Entalpias de fusão e solidificação da amostra XS01NA.

Relativamente à amostra XS01NA, os valores que apresentam são respetivamente de $21,24 \text{ J g}^{-1}$ e $20,75 \text{ J g}^{-1}$. Uma vez que o processo utilizado para a determinação das entalpias de fusão e solidificação foi igual para todas as amostras, encontram-se no anexo B.2 os resultados que dizem respeito às restantes. A Tabela 15 apresenta o resumo dos resultados obtidos para as entalpias de fusão e solidificação. Para todos os casos, os valores obtidos são menores que os correspondentes ao PCM puro o que se explica pela menor concentração de material e pela porosidade que as amostras de Leca[®] possuem.

Para o caso da amostra XS01A, os valores são menores que os valores referentes a XS01NA, resultados que se justificam pela aglomeração das cápsulas do PCM. Também se verifica que a formulação S01NA apresenta valores relativamente próximos aos resultados obtidos pela amostra XS01NA. Os resultados obtidos para a amostra LNA são próximos entre si e superiores aos obtidos para as amostras de Leca[®]. Relativamente à amostra LA, os valores obtidos são ligeiramente inferiores aos da formulação LNA, sugerindo a mesma aglomeração referida anteriormente. Em relação às amostras de Leca[®], a formulação L apresenta valores superiores de entalpias de fusão e solidificação.

4.1.3.3.2 Calor Específico

Nesta secção, apresentam-se os resultados referentes ao calor específico pelo método MDSC. Na Fig. 29 é possível observar os resultados obtidos com a amostra de PCM puro.

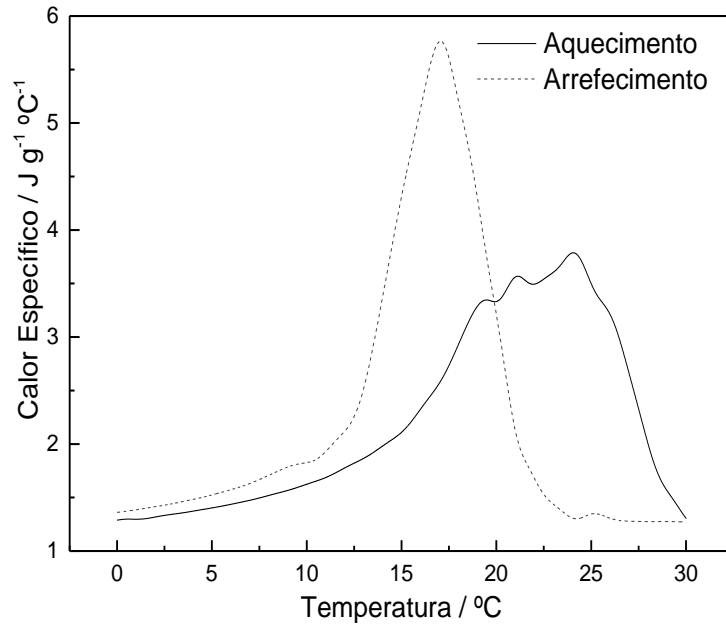


Fig. 29. Calor específico do PCM puro.

Através da Fig. 29 verifica-se que o pico referente ao aquecimento é de intensidade menor que o pico de solidificação. A curva incongruente no aquecimento explica-se, segundo o fabricante, pelas misturas de parafínicos de elevada pureza que o PCM possui, levando à separação de picos. Na Fig. 30 apresenta-se o calor específico para amostra LXS00.

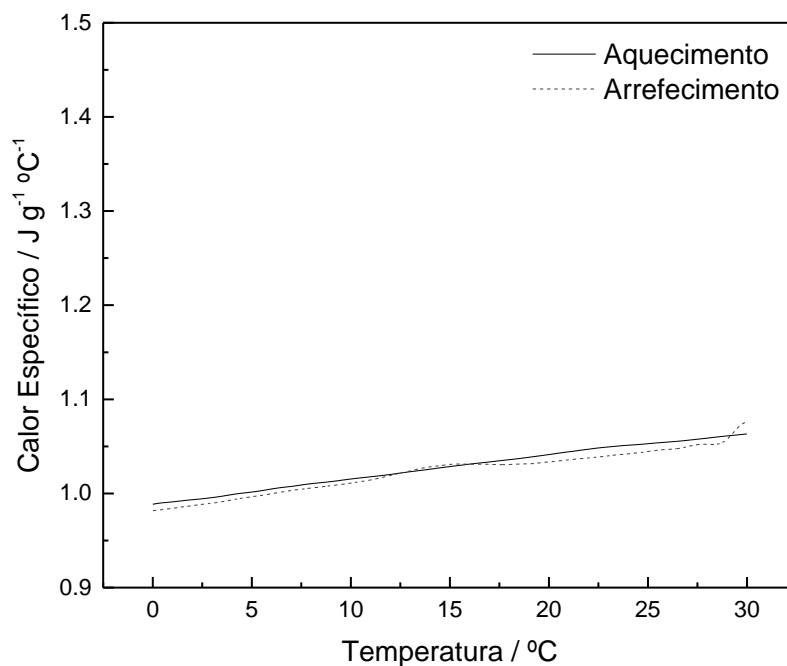


Fig. 30. Calor específico da amostra LXS00.

Conforme era esperado, os resultados representados na Fig. 30 indicam que a amostra LXS00, por não possuir PCM, não apresenta mudança de fase. As Fig. 31 e Fig. 32 apresentam a variação de calor específico das amostras XS01NA e XS01A, respetivamente.

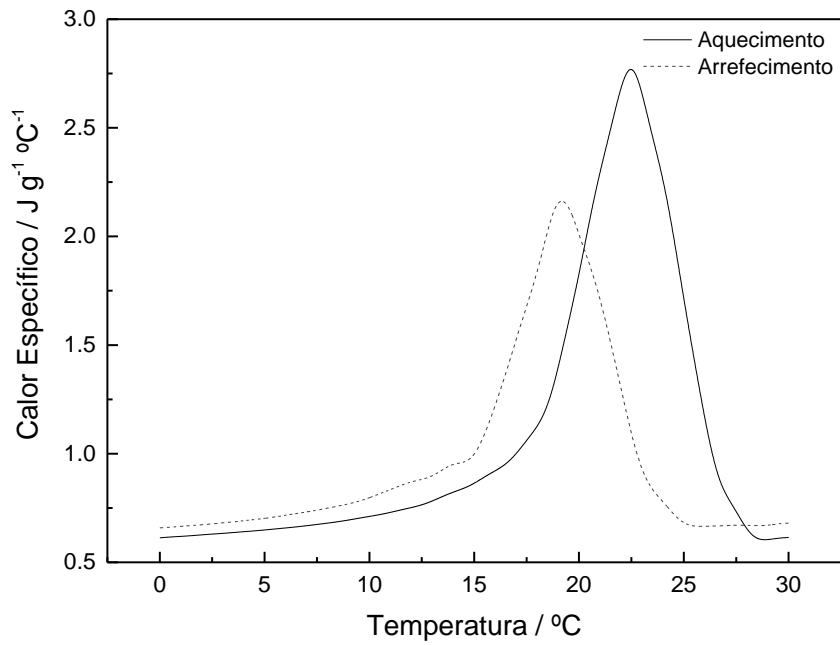


Fig. 31. Calor específico da amostra XS01NA.

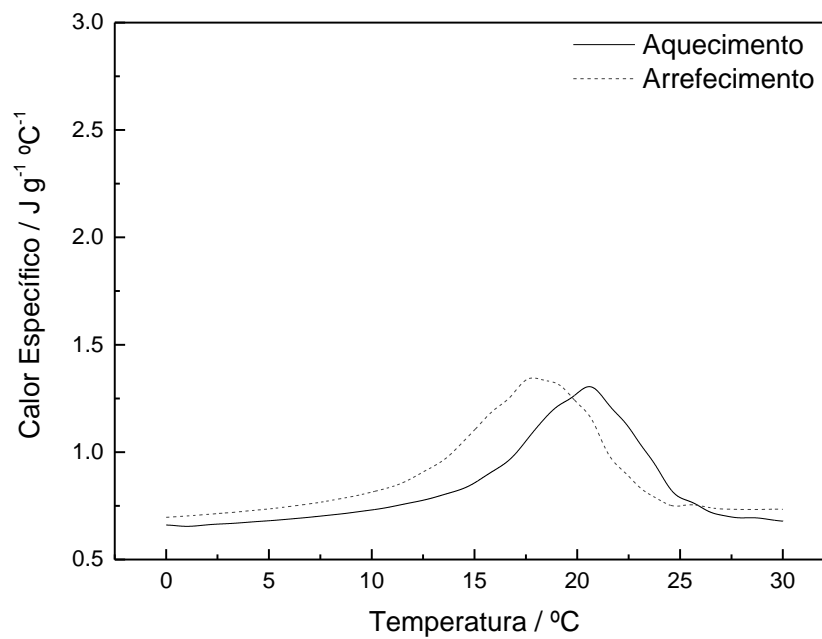


Fig. 32. Calor específico da amostra XS01A.

Através da observação das Fig. 31 e Fig. 32 verifica-se que as duas formulações apresentam intensidades de picos inferiores ao PCM puro provavelmente pela presença de outros componentes porosos. Também se verifica que a formulação XS01A apresenta resultados menores, sugerindo a aglomeração das cápsulas do PCM, como já indicado anteriormente.

Os resultados do calor específico para as amostras de Leca® S e formulação L encontram-se no Anexo B.3, apresentando a Tabela 14 um resumo dos picos de calor específico obtidos pela análise das figuras.

Para a amostra LS00, verifica-se que não houve mudança de fase, como era expectável, apresentando um calor específico constante. Relativamente às amostras S01NA e S01A observam-se, novamente, resultados que sugerem a aglomeração das cápsulas do PCM, embora a diferença entre os dois casos seja menor que no caso anterior.

Em comparação com as amostras de Leca® equivalentes, a formulação LNA apresenta valores de pico de intensidades maiores. Estes resultados justificam-se, possivelmente pela porosidade típica das amostras de Leca®. Observando os resultados da formulação LNA, verifica-se que os valores obtidos diminuem para praticamente metade na formulação LA, sugerindo, novamente, a aglomeração das cápsulas do PCM.

Tabela 14. Picos obtidos através da análise dos gráficos de calor específico.

Propriedade	PCM Puro	LXS01		LS01		Formulação L	
		NA	A	NA	A	NA	A
Pico de Fusão / °C	24,06	22,47	20,58	22,92	21,50	22,27	22,87
Pico de Solidificação / °C	17,06	19,98	17,83	18,23	19,33	18,84	17,70
Pico de Fusão / J g ⁻¹ °C ⁻¹	3,78	2,77	1,31	2,54	2,60	4,13	2,07
Pico de Solidificação / J g ⁻¹ °C ⁻¹	5,77	2,16	1,35	2,70	1,92	4,36	2,38

Mediante a análise da Tabela 14, verifica-se que os picos de temperaturas são, novamente, muito próximos entre si. É possível observar em todos os casos a aglomeração das cápsulas de PCM. A Formulação L é, em comparação com todas as amostras de Leca®, a que apresenta picos de maiores intensidades.

4.1.3.3.3 *Transient Plane Source vs MDSC*

Nesta secção, pretende-se comparar os dois métodos utilizados para determinação das propriedades térmicas, nomeadamente o calor específico. Para tal, converteram-se os resultados obtidos para este parâmetro pelo método *Transient Plane Source* para as mesmas unidades em que se encontram os resultados obtidos pelo método *MDSC* e compararam-se. Em relação ao ensaio *MDSC*, optou-se por seleccionar a amostra em que o PCM não foi amassado por se considerar que apresentava as características mais próximas. Nas Fig. 33, Fig. 34 e Fig. 35 observam-se os resultados obtidos para o calor específico pelo método *Transient Plane Source* e pelo ensaio *MDSC* para as amostras LXS01, LS01 e Formulação L. É possível observar que os dois métodos apresentam curvas com comportamento idêntico mas com valores bastante diferentes. Observa-se que o método *Transient Plane Source* apresenta valores mais elevados que os valores obtidos pelo método *MDSC*, especialmente na zona de transição de fase. Uma vez que o método *Transient Plane Source* tem dificuldade em ler materiais que mudam de fase [61], o ensaio *MDSC* será mais indicado para a determinação de propriedades térmicas deste tipo de material.

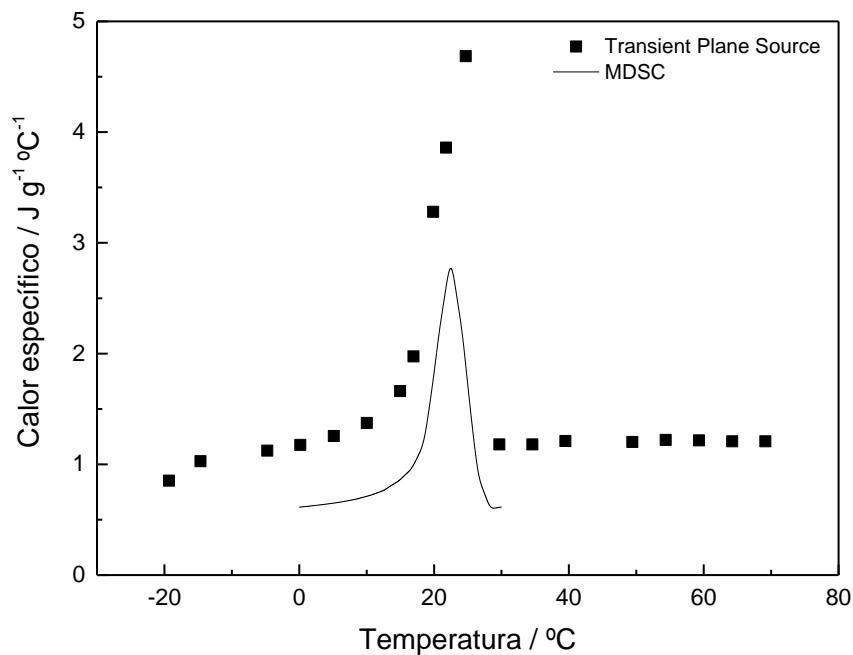


Fig. 33. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra XS01 obtidos por *Transient Plane Source* e *MDSC*.

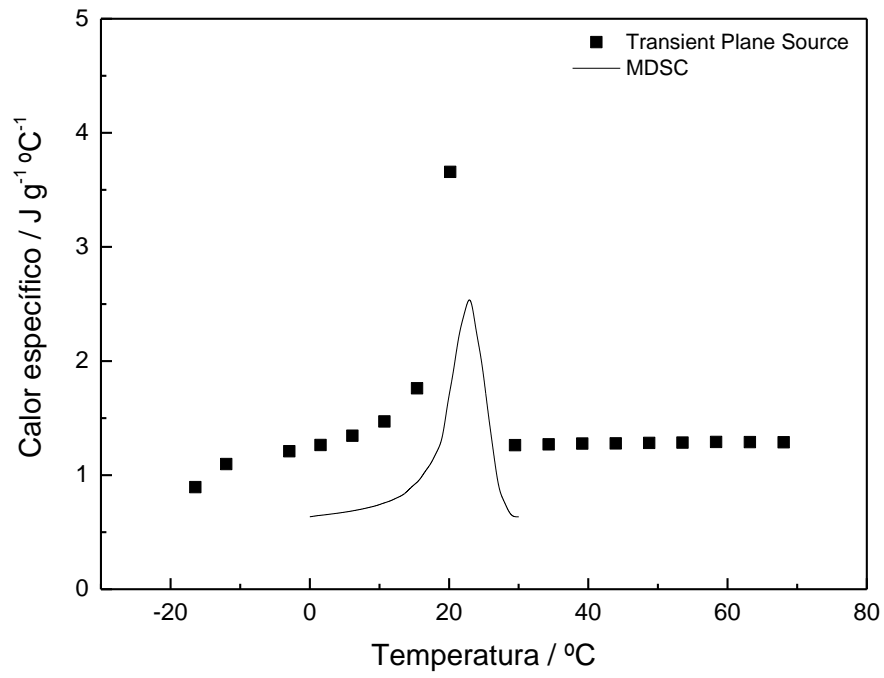


Fig. 34. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra S01 obtidos por *Transient Plane Source* e *MDSC*.

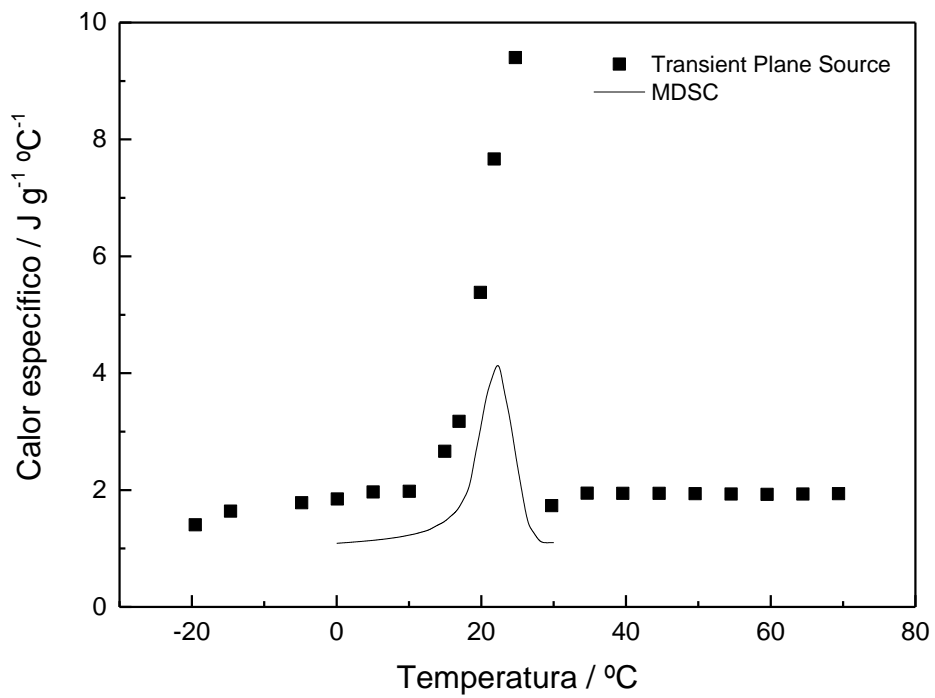


Fig. 35. Comparação dos resultados de calor específico para a amostra Formulação L obtidos por *Transient Plane Source* e *MDSC*.

4.1.3.3.4 Entalpia de fusão e solidificação

A partir dos dados do calor específico é possível fazer a determinação da área integrada e que corresponde ao valor de entalpia em função da temperatura, de acordo com a Equação (4.1):

$$h(T) = \int_{T_0}^T C_p(T) dT \quad (4.1)$$

Nesta secção, apresentam-se os resultados relativos à entalpia de fusão e solidificação das amostras de PCM puro, XS e S ambas com e sem PCM (amassadas e não amassadas) e ainda Formulação L (amassada e não amassada). Na Fig. 36 apresentam-se as curvas de entalpia de aquecimento e arrefecimento para o PCM puro.

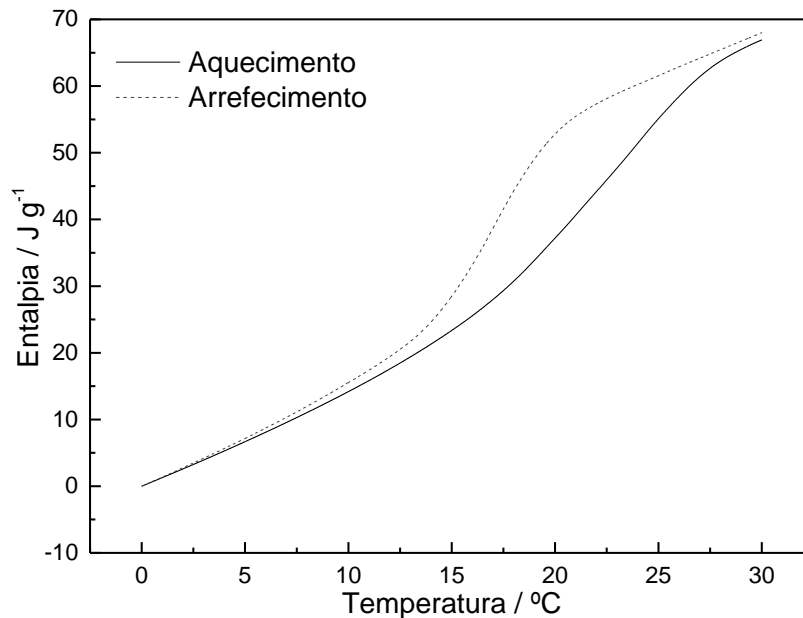


Fig. 36. Entalpia do PCM puro.

Os intervalos de fusão e solidificação são 8,09 °C ÷ 27,62 °C e 9,19 °C ÷ 22,67 °C, respetivamente. Estes intervalos foram determinados a partir das curvas de entalpia, traçando uma paralela antes e depois da transição. Quando as retas não coincidem, considera-se que entrou na fase de transição (ver em detalhe no Anexo C). A Fig. 37 apresenta os resultados de entalpia relativos à amostra XS00, que se apresentam como uma reta que alcança 30 J g⁻¹.

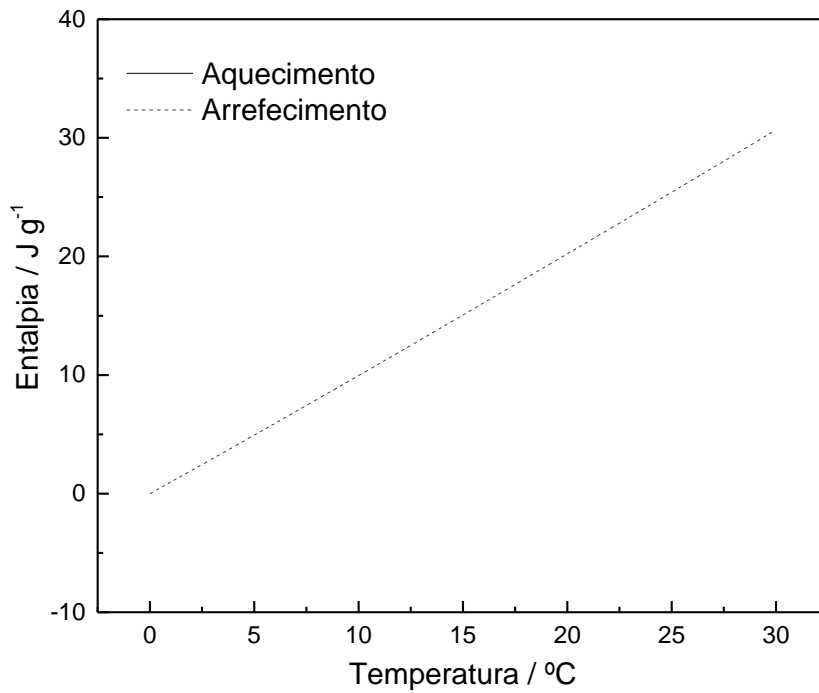


Fig. 37. Entalpia da amostra LXS00.

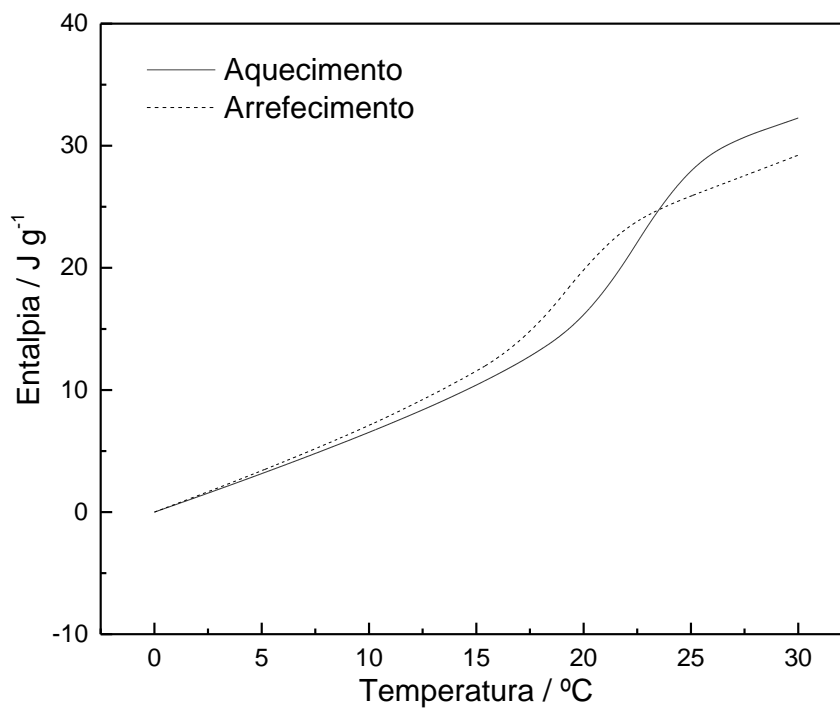


Fig. 38. Entalpia da amostra XS01NA.

Na Fig. 38 é possível observar as curvas de entalpia para a amostra XS01NA. Verificam-se valores de entalpia mais baixos que os resultados relativos ao PCM puro. Tal resultado era esperado uma vez que a Leca[®] e o cimento estão misturados com o PCM. No entanto, os valores são próximos dos resultados obtidos com a formulação XS00. O intervalo de fusão é de

10,33 °C ÷ 27,21 °C e o de solidificação verifica-se em 8,94 °C ÷ 23,96 °C (ver em detalhe o Anexo C). Na Fig. 39 apresentam-se os resultados das curvas de entalpia para a amostra XS01A.

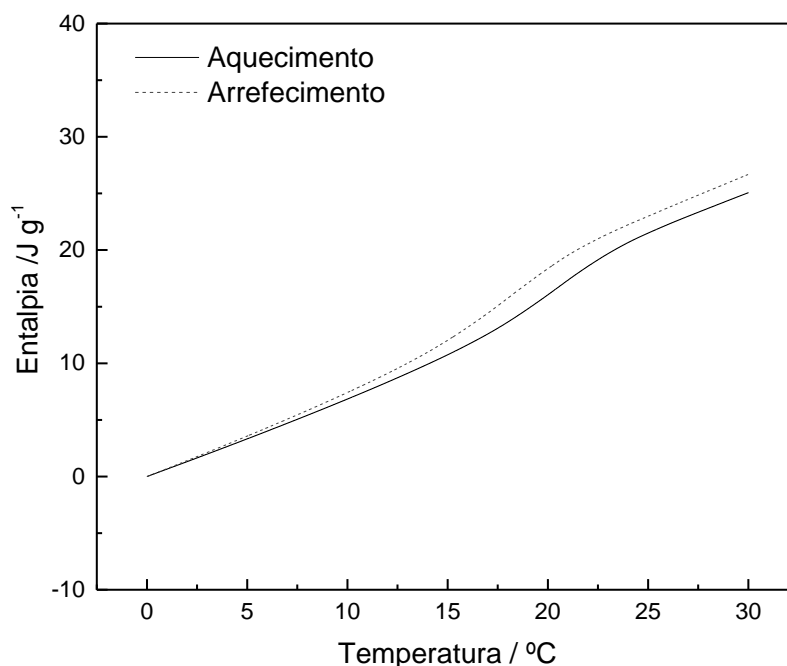


Fig. 39. Entalpia da amostra XS01A.

A amostra XS01A apresenta valores de entalpia menores que a formulação XS01NA. As gamas de fusão e solidificação desta amostra são 10,26 °C ÷ 24,85 °C e 9,33 °C ÷ 23,16 °C, respetivamente (ver Anexo C).

Os resultados de entalpia correspondentes às amostras de Leca® S e formulação L são apresentados no Anexo B.4. A amostra LS00, como esperado, apresenta duas retas coincidentes, apresentando uma entalpia superior à LXS00.

Relativamente à amostra S01NA, os resultados são ligeiramente superiores aos da XS01NA.

A formulação LNA apresenta valores de entalpia superiores às amostras de Leca® provavelmente devido à maior condutividade térmica e menor porosidade. Observando os resultados da formulação LA, verifica-se que esta apresenta menor entalpia, sugerindo a aglomeração das cápsulas de PCM.

Na Tabela 15 apresenta-se um resumo dos resultados obtidos a partir dos ensaios MDSC (ver Anexos B e C). Os valores para os intervalos de temperaturas de fusão e solidificação e ainda, entalpias de fusão e solidificação foram determinados a partir das curvas do fluxo de calor do ensaio MDSC.

Tabela 15 Resultado dos ensaios MDSC

Propriedade	PCM Puro	LXS01		LS01		Formulação L	
		NA	A	NA	A	NA	A
ΔT de Fusão / °C	8,09 - 27,62	10,33 - 27,21	10,26 - 24,85	9,95 - 27,04	10,88 - 26,02	11,15 - 26,54	10,13 - 26,82
ΔT de Solidificação / °C	9,19 - 22,67	8,94 - 23,96	9,33 - 23,16	8,93 - 22,41	10,01 - 24,54	10,08 - 23,72	9,06 - 24,88
Entalpia de Fusão / J g ⁻¹	91,22	21,24	12,73	21,66	15,45	24,18	23,09
Entalpia de Solidificação / kJ kg ⁻¹	88,31	20,75	13,12	20,81	15,64	25,21	23,52

A Tabela 16 apresenta um resumo das propriedades térmicas do produto endurecido. O calor específico foi calculado a partir dos intervalos determinados, calculando-se a média na mudança de fases registada nos ensaios de *MDSC*. Estes resultados são diferentes dos valores obtidos para o calor específico apresentado na Tabela anterior, pois estes são pontos específicos observados nos gráficos.

A condutividade térmica foi determinada através da média dos valores obtidos pelo método *Transient Plane Source*. As duas restantes propriedades, a difusividade e inércia térmicas foram determinadas a partir das equações (2.3) e (2.4). Posteriormente, na Tabela 17 apresenta-se a classificação das amostras quanto à condutividade térmica segundo a Norma Europeia 998-1 [45].

Tabela 16 Resumo das propriedades térmicas do produto endurecido

Propriedades térmicas	LXS00	LXS01	LS00	LS01	Formulação L
Condutividade Térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹	0,30*	0,20	0,20*	0,18	0,26
Calor Específico / kJ kg ⁻¹ K ⁻¹	0,99	1,40	1,33	1,39	2,32
Difusividade Térmica / m ² s ⁻¹	4,10E-07	1,68E-07	2,39E-07	1,88E-07	9,58E-08
Inércia Térmica / J m ⁻² K ⁻¹ s ⁻¹	469	488	409	415	840

* Valores estimados segundo a Norma Europeia EN 998-1 (não obtidos experimentalmente).

Tabela 17 Classificação das amostras segundo a Norma Europeia 998-1 [45] relativamente à condutividade térmica.

Amostra	Condutividade térmica / W m ⁻¹ K ⁻¹	Classificação segundo a Norma Europeia EN 998-1 [45]
LXS01	0,20	T2
LS01	0,18	T2
Formulação L	0,26	T1

Mediante a análise da Tabela 15 é possível verificar que os intervalos de fusão e solidificação são bastante similares apresentando-se praticamente dentro do intervalo de operação do PCM (10-30 °C).

Quanto à entalpia de fusão e solidificação, em relação às amostras de Leca[®], é nítida a diferença entre o PCM amassado ou não, apresentando o amassado valores bastante inferiores ao não amassado. No entanto, tal disparidade não é visível na formulação L, amostra que apresenta valores de entalpias muito próximos. Verifica-se que a formulação L apresenta valores superiores de entalpia de fusão e solidificação relativamente às amostras de Leca[®]. Os resultados de entalpia da Leca[®] com PCM não amassado são aceitáveis, uma vez que a amostra possui 25% de PCM, apresentando este um valor de aproximadamente 100 kJ kg⁻¹. No entanto, os resultados da Formulação L encontram-se mais perto desse valor, apresentando menor erro. As causas podem advir de erros de metodologia e para solucioná-los deve utilizar-se menor velocidade de varrimento podendo resultar em menor erro. Desta forma, é sugerida a realização destes ensaios a uma velocidade 0,5 K min⁻¹ [62]. Os valores de calor específico sólido e líquido são bastante próximos em todas as amostras.

Existem vários métodos para a caracterização das propriedades térmicas. Os métodos utilizados neste trabalho, embora fossem os que se encontraram disponíveis para a realização do projeto, não são os mais adequados. O método mais indicado é o *step method*, caracterizado por o aquecimento e o arrefecimento não são contínuos, mas envolverem pequenos incrementos de temperatura seguidos por períodos em que a temperatura é mantida constante até que a amostra atinja o equilíbrio térmico. Este método, além de garantir maior precisão é, também, menos sensível a uma variação nos parâmetros de medição [63].

Posteriormente observando a Tabela 16 verifica-se que adição de PCM reduz a condutividade térmica. Esta redução é uma desvantagem uma vez que para o PCM funcionar é necessária uma elevada condutividade térmica. Verifica-se que a mais condutora das amostras é a Formulação L e, entre as amostras contendo argila expandida com PCM, é a XS01 que se apresenta mais condutora, provavelmente por ser menos porosa. O calor específico aumenta com a adição do PCM, ainda que na amostra LS01 o aumento não seja muito elevado. No entanto, a Formulação L, além de ser mais condutora, é ainda a que apresenta calor específico mais elevado. Relativamente à difusividade térmica, verifica-se que, embora a adição do PCM tenha provocado a redução dos valores deste parâmetro, é a formulação L que apresenta um valor menor, significando que responde mais lentamente às alterações térmicas do meio que as matrizes com argila expandida (com e sem PCM), devendo-se aquele efeito à maior densidade da amostra com formulação L. Entre as amostras de Leca[®] com PCM, é a S01 que se destaca.

A inércia térmica aumenta com a adição de PCM, o que é uma mais-valia uma vez que significa maior capacidade de armazenar calor e de o restituir lentamente, sendo a Formulação L que se destaca neste parâmetro devido à sua maior densidade e também ao elevado calor específico. Entre as amostras de Leca®, é a LXS01 que apresenta um valor mais elevado. Mediante a análise da Tabela 17, é possível verificar que ambas as amostras contendo argila expandida se classificam como T2 e a Formulação L como T1.

5 Conclusão e desenvolvimentos futuros

5.1 Conclusões gerais

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar o desenvolvimento de uma argamassa de argila expandida com PCM. Para tal estudaram-se várias misturas de Leca[®], cimento e PCM para determinar a melhor formulação, tendo-se posteriormente caracterizado a argamassa, a fim de avaliar o respetivo desempenho.

Os resultados das propriedades mecânicas foram, em geral, positivos, sobretudo para a LXS01. Todas as formulações apresentaram um comportamento razoável e nenhuma apresentou tendência para fissuração. Em relação ao seu comportamento em pasta, a LXS01 é melhor do que a LS01, no que respeita à trabalhabilidade e ao aspeto final.

Conforme era esperado, as argamassas com Leca[®] S apresentam uma densidade menor em relação às suas equivalentes com Leca[®] XS, uma vez que são menos porosas. No entanto, qualquer uma apresenta menor densidade comparativamente à argamassa correspondente da Formulação L, testada num trabalho anterior. Verifica-se que a adição de PCM aumenta a densidade da pasta, muito provavelmente porque, uma vez que é fino, preenche os vazios presentes na Leca[®]. A adição do PCM aumenta também a retração, assim como o coeficiente de capilaridade, embora qualquer amostra de Leca[®] apresente um valor inferior ao obtido no caso da argamassa L. No entanto, os valores de retração obtidos devem ser analisados prudentemente, pois podem significar uma tendência à fissuração na fase plástica, podendo essa desvantagem ser corrigida através da adição de um superplastificante ou um agente redutor de retração, a fim de diminuir a necessidade de água.

A adição de PCM provoca a redução das resistências à flexão e compressão, bem como do módulo de elasticidade, quer na LXS01, quer na LS01. Estes resultados podem ser explicados pelo facto do PCM não possuir propriedades ligantes diminuindo, deste modo, as resistências; poderão ainda dever-se à adição de maior quantidade de água de amassadura. Os valores obtidos para os referidos parâmetros, para a Leca[®] S01 são menores que os da Leca[®] XS01, o que era antecipado, uma vez que a primeira apresenta uma superfície mais porosa do que a segunda. As matrizes são também muito leves, mas com resistência e deformabilidade aceitáveis. Apesar das matrizes serem resistentes, não se encontram sujeitas a grandes tensões. Em resumo, os valores obtidos relativamente às argamassas de matriz de argila com PCM não comprometem o desempenho físico e mecânico das matrizes.

Quanto às curvas de fluxo de calor, calor específico e entalpia, em relação às amostras de Leca[®], é nítida a diferença entre as amostras com o PCM amassado ou não, apresentando o

amassado valores bastante inferiores ao não amassado. Em relação às entalpias de fusão e solidificação, a mesma diferença é visível nas amostras de Leca®. No entanto, tal disparidade não é visível na Formulação L, amostra que apresenta valores de entalpias muito próximos, facto que justifica uma futura avaliação da metodologia utilizada na Formulação L. Verifica-se que a formulação L apresenta maiores valores de entalpia de fusão e solidificação em relação às amostras de Leca®. É possível afirmar que os resultados obtidos de entalpia de Leca® com PCM não amassado (em torno dos 21 - 22 kJ kg⁻¹) são aceitáveis, uma vez que a amostra possui 25% de PCM, e este apresenta um valor de aproximadamente 100 kJ kg⁻¹. No entanto, os resultados da Formulação L encontram-se mais perto desse valor, apresentando um menor desvio.

Os métodos utilizados para as características térmicas não são os mais adequados para este tipo de material, sendo o melhor, o *step method*, utilizando pequenos incrementos de temperatura seguidos por períodos em que a temperatura é mantida constante até que a amostra atinja o equilíbrio térmico.

A adição de PCM reduz a condutividade térmica das argamassas, o que de um ponto de vista das características de isolamento constitui uma vantagem. No entanto, a baixa condutividade poderá prejudicar o funcionamento do PCM. É possível observar que o calor específico aumenta com a adição do PCM, ainda que na Leca® LS01 o aumento não seja muito elevado. Por outro lado, a Formulação L, além de ser mais condutora que qualquer amostra de Leca®, é ainda a que apresenta calor específico mais elevado. A adição do PCM reduz os valores da difusividade térmica nas amostras de Leca®. Porém, em comparação com a Formulação L, é esta que apresenta um menor valor, ou seja, responde mais lentamente às alterações térmicas do meio. Relativamente à inércia térmica, observa-se que a adição de PCM faz aumentar esta propriedade, o que é uma vantagem, uma vez que esta propriedade consiste na capacidade de retardar a passagem do calor.

Em síntese, em relação às amostras de Leca®, é possível afirmar que a Leca® XS é a que apresenta melhores características, uma vez que, mecanicamente foi a que se revelou melhor e, embora termicamente as Lecas XS e S estejam muito próximas, a XS destaca-se também por uma condutividade e uma inércia maiores.

Comparativamente a argamassas tradicionais, as matrizes com Leca® apresentam vantagens ao nível de manuseamento e do comportamento mecânico. Por outro lado, prejudicam o funcionamento do PCM por diminuírem a condutividade térmica e, em consequência, a difusividade térmica.

5.2 Desenvolvimentos futuros

Este trabalho apresentou algumas dificuldades, principalmente em relação às metodologias utilizadas para determinação das características térmicas. Deste modo, apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros, tais como, novas formulações de argamassa (de modo a atingir um equilíbrio mais favorável entre as propriedades mecânicas e térmicas), novos ensaios térmicos e ensaios DSC incrementais. Caso não seja possível um ensaio com DSC incremental, poder-se-á experimentar o ensaio *MDSC* a menores velocidades, de modo a obterem-se resultados mais fiáveis. Caso estas dificuldades sejam ultrapassadas e os resultados aceitáveis, simular o em comportamento térmico em paredes com ferramentas numéricas. Sugerem-se ainda novos testes de condutividade térmica num equipamento preparado para amostras que apresentem mudança de fase.

Referências Bibliográficas

1. INE, *Inquérito ao Consumo de Energia no Sector Doméstico 2010*. 2011, Instituto Nacional de Estatística: Lisboa. p. 117.
2. Kuznik, F. and J. Virgone, *Experimental investigation of wallboard containing phase change material: Data for validation of numerical modeling*. Energy and Buildings, 2009. **41**(5): p. 561-570.
3. Lane, G.A., *Solar heat storage: Latent heat materials*. 1983.
4. Lucas, S.M.S.d.O., *Argamassas funcionais para uma construção sustentável*. 2011, Universidade de Aveiro.
5. Mehling, H. and L.F. Cabeza, *Heat and Cold Storage with PCM: An Up to Date Introduction Into Basics and Applications; with 28 Tables*. 2008: Springer.
6. Zhang, Y., et al., *Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state-of-the-art and outlook*. Building and Environment, 2007. **42**(6): p. 2197-2209.
7. Pillai, K. and B. Brinkworth, *The storage of low grade thermal energy using phase change materials*. Applied Energy, 1976. **2**(3): p. 205-216.
8. Sharma, A., et al., *Review on thermal energy storage with phase change materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(2): p. 318-345.
9. Cabeza, L., et al., *Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011. **15**(3): p. 1675-1695.
10. Ibrahim, H., A. Ilinca, and J. Perron, *Energy storage systems—characteristics and comparisons*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(5): p. 1221-1250.
11. Nguyen, Q.T., T. Ngo, and P. Mendis, *Performance-enhancement of phase change materials for energy conservation in the built environment: a state-of-the-art review*. 2013.
12. Baetens, R., B.P. Jelle, and A. Gustavsen, *Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review*. Energy and Buildings, 2010. **42**(9): p. 1361-1368.
13. Memon, S.A., *Phase change materials integrated in building walls: A state of the art review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **31**: p. 870-906.
14. Azenha, M.Â.D., *Comportamento do betão nas primeiras idades. Fenomenologia e análise termo-mecânica*. 2004, Universidade do Porto.
15. Zhou, D., C. Zhao, and Y. Tian, *Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications*. Applied Energy, 2012. **92**: p. 593-605.
16. Osterman, E., et al., *Review of PCM based cooling technologies for buildings*. Energy and Buildings, 2012. **49**: p. 37-49.
17. Tyagi, V.V. and D. Buddhi, *PCM thermal storage in buildings: A state of art*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(6): p. 1146-1166.
18. Abhat, A., *Low temperature latent heat thermal energy storage: heat storage materials*. Solar energy, 1983. **30**(4): p. 313-332.
19. Li, M. and Z. Wu, *Preparation and performance of highly conductive phase change materials prepared with paraffin, expanded graphite, and diatomite*. International Journal of Green Energy, 2011. **8**(1): p. 121-129.
20. Ferreira, P.M.F., *Comportamento térmico dinâmico dos elementos da envolvente opaca dos edifícios: com estudo de incorporação de materiais com mudança de fase*. 2011.
21. Sá, A.M.V.D.O., *Sustentabilidade na construção: comportamento térmico de edifícios em Portugal usando materiais de mudança de fase*. 2013.
22. Silva, N., *Incorporação de materiais de mudança de fases em materiais de construção*. 2009.
23. Zalba, B., et al., *Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications*. Applied thermal engineering, 2003. **23**(3): p. 251-283.

24. Hawes, D.W., D. Banu, and D. Feldman, *Latent heat storage in concrete*. Solar energy materials, 1989. **19**(3): p. 335-348.
25. Waqas, A. and Z. Ud Din, *Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings—A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **18**: p. 607-625.
26. Regin, A.F., S.C. Solanki, and J.S. Saini, *Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008. **12**(9): p. 2438-2458.
27. Schossig, P., et al., *Micro-encapsulated phase-change materials integrated into construction materials*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2005. **89**(2): p. 297-306.
28. Castell, A., et al., *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*. Energy and Buildings, 2010. **42**(4): p. 534-540.
29. Hawlader, M., M. Uddin, and M.M. Khin, *Microencapsulated PCM thermal-energy storage system*. Applied energy, 2003. **74**(1): p. 195-202.
30. Jamekhorshid, A., S. Sadrameli, and M. Farid, *A review of microencapsulation methods of phase change materials (PCMs) as a thermal energy storage (TES) medium*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **31**: p. 531-542.
31. Soares, N., et al., *Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency*. Energy and Buildings, 2013. **59**: p. 82-103.
32. Jegadheeswaran, S. and S.D. Pohekar, *Performance enhancement in latent heat thermal storage system: a review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(9): p. 2225-2244.
33. Alkan, C., et al., *Preparation, characterization, and thermal properties of microencapsulated phase change material for thermal energy storage*. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2009. **93**(1): p. 143-147.
34. Hawlader, M., M. Uddin, and H. Zhu, *Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: experiments and simulation*. International Journal of Energy Research, 2002. **26**(2): p. 159-171.
35. Khudhair, A.M. and M.M. Farid, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. Energy conversion and management, 2004. **45**(2): p. 263-275.
36. Hawlader, M.N.A., M.S. Uddin, and H.J. Zhu, *Encapsulated phase change materials for thermal energy storage: Experiments and simulation*. International Journal of Energy Research, 2002. **26**(2): p. 159-171.
37. Gypsum, N. *National Gypsum ThermalCORE Panel*. Available from: <http://www.thermalcore.info/ThermalCore.pdf>.
38. Sukhorukov, G., A. Fery, and H. Möhwald, *Intelligent micro-and nanocapsules*. Progress in Polymer Science, 2005. **30**(8): p. 885-897.
39. Zhai, X., et al., *A review on phase change cold storage in air-conditioning system: Materials and applications*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 108-120.
40. Mesalhy, O., et al., *Numerical study for enhancing the thermal conductivity of phase change material (PCM) storage using high thermal conductivity porous matrix*. Energy Conversion and Management, 2005. **46**(6): p. 847-867.
41. Oya, T., et al., *Thermal conductivity enhancement of erythritol as PCM by using graphite and nickel particles*. Applied Thermal Engineering, 2012(0).
42. Sakr, M.H., R.M. Abdel-Aziz, and A.A.E. Ghorab, *Experimental and theoretical study on freezing and melting in capsules for thermal storage*. ERJ Soubra Faculty Eng, 2008. **9**: p. 48-65.
43. Ismail, K.A.R., J.R. Henríquez, and T.M. da Silva, *A parametric study on ice formation inside a spherical capsule*. International Journal of Thermal Sciences, 2003. **42**(9): p. 881-887.

44. ElGhnam, R.I., et al., *An experimental study of freezing and melting of water inside spherical capsules used in thermal energy storage systems*. Ain Shams Engineering Journal, 2012. **3**(1): p. 33-48.
45. CEN, *EN 998-1: Specification for mortar masonry. Part 1: Rendering and plastering mortar*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization), 2010.
46. CEN, *EN 1015: Methods of test for mortar for masonry*. CEN (European Committee for Standardization), 2006.
47. CEN, *Masonry and masonry products. Methods for determining design thermal values*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization). 2002.
48. CEN, *EN 13501-1: Fire classification of construction products and building elements. Part 1: Classification using data from reaction to fire tests*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization), 2007.
49. BASF. *Micronal® PCM Intelligent Temperature Management for Buildings*. 2012 [cited 2013 Maio]; Available from: <http://www.micronal.de/portal/load/fid774774/Catalogue%20Micronal%20PCM.pdf>.
50. CEN, *EN 197-1: Cement. Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements*. Brussels: CEN (European Committee for Standardization), 2001.
51. ATIC, *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. 2006.
52. del Olmo Rodríguez, C., *Nueva guía técnica UEAtc para la evaluación de las colas para revestimientos cerámicos (comentarios)*. Informes de la Construcción, 1990. **42**(410): p. 59-64.
53. CSTB, C.d., *Modalités d'essais - A3.3: Variations dimensionnelles et pondérales*. CSTB - Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation, 1993.
54. CSTB, C.d., *Modalités d'essais - A3.2: Module d'élasticité dynamique*. CSTB - Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation, 1993.
55. AB, H.D. *Transient Planc Source*. Available from: www.hotdiskinstruments.com.
56. Ferreira, A.F., P.N. Simões, and A.G.M. Ferreira, *Quaternary phosphonium-based ionic liquids: Thermal stability and heat capacity of the liquid phase*. The Journal of Chemical Thermodynamics, 2012. **45**(1): p. 16-27.
57. EN, N., *1745: 2005-Alvenarias e elementos de alvenaria*. Métodos para determinação de valores térmicos de cálculo. IPQ, Lisboa, 2005.
58. Coutinho, A.S. and A. Gonçalves, *Fabrico e propriedades do betão*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1997: p. 401.
59. Nunes, H.F.S., *Comportamento térmico de uma argamassa com PCM numa célula de teste*. 2013, Universidade de Aveiro.
60. Instruments, T. *TA Universal Analysis 2000*. Available from: <http://www.tainstruments.com/main.aspx?siteid=11&id=171&n=2>.
61. He, Y., *Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor: Part 1. Theoretical considerations*. Thermochimica acta, 2005. **436**(1): p. 122-129.
62. Barreneche, C., et al., *Study on differential scanning calorimetry analysis with two operation modes and organic and inorganic phase change material (PCM)*. Thermochimica Acta, 2013. **553**: p. 23-26.
63. Castellón, C., et al., *Determination of the enthalpy of PCM as a function of temperature using a heat-flux DSC—A study of different measurement procedures and their accuracy*. International Journal of Energy Research, 2008. **32**(13): p. 1258-1265.

Anexos

A.1 - Matriz Leca® XS sem PCM (LXS00)

A Tabela A.1 apresenta os resultados obtidos relativamente aos ensaios de retração, resistências à flexão e compressão da matriz LXS00, matriz de menor granulometria e sem PCM. Posteriormente, as Tabelas A.2 e A.3 expõem os resultados relativos aos ensaios ao módulo de elasticidade e de capilaridade.

Tabela A.1. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LXS00

		Retração / mm		Massa / g	Res. Flexão / N mm ⁻²	Res. Compressão / N mm ⁻²
	Inicial	-	-	-		
Provete 1	7 Dias	-5,530	0,469	191,79	1,56	4,27
	28 Dias	-5,605		192,46		
					1,60	4,51
	Inicial	-	-	-		
Provete 2	7 Dias	-5,355	0,194	192,39	1,64	4,74
	28 Dias	-5,386		192,96		
Média			0,332			

Por questões de dificuldades nos ensaios, uma vez que o produto não estava bem ligado, foi necessário ajustá-lo e a retração inicial não foi observada por motivos de esquecimento.

Tabela A.2. Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LXS00

Módulo Elasticidade		7 Dias	28 Dias	Média
	Massa / g	138,27	137,58	139,53
Provete 3	Freq Ressonância	-	-	4,38/4,24
				4794 mPa

Tabela A.3. Resultados ensaios da capilaridade da matriz LXS00

Capilaridade	Massa inicial / g	Massa 10 min / g	Massa 90 min / g	Média
Provete 1	86,08	90,04	91,01	0,97
Provete 2	94,98	99,45	100,96	1,51
				1,24 g.dm ⁻² min ⁻¹

A.2 - Matriz Leca® XS com PCM (LXS01)

Na Tabela A.4 é possível observar os resultados que dizem respeito aos ensaios de retração, resistências à flexão e compressão da matriz LXS01, matriz de menor granulometria e com PCM. De seguida, as Tabelas A.5 e A.6 apresentam os resultados relativos aos ensaios ao módulo de elasticidade e de capilaridade da mesma matriz.

Tabela A.4 Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LXS01

		Retração / mm	Massa / g	Res. Flexão / N mm ⁻²	Res. Compressão / N mm ⁻²
	Inicial	- 5,807	207,38		
Provete 1	7 Dias	- 5,990	2,013	1,20	3,13
	28 Dias	- 6,312	191,56	1,21	4,51
	Inicial	- 5,891	207,90		
Provete 2	7 Dias	- 6,091	1,900	1,21	3,08
	28 Dias	- 6,395	191,75		
Média			1,957		

Dado que não foi observada a retração inicial da matriz LXS00, para efeitos de comparação, irá ter-se em conta apenas dos 7-28 dias a retração observada.

Tabela A.5 Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LXS01

	Módulo Elasticidade	7 Dias	28 Dias	
	Massa / g	134,93	129,42	128,18
Provete 3	Freq			3,00/2,99
	Ressonância	-	-	2127 mPa

Tabela A.6 Resultados ensaios de capilaridade da matriz LXS01

Capilaridade	Massa inicial / g	Massa 10 min / g	Massa 90 min / g	
Provete 1	88,95	90,24	92,14	1,90
Provete 2	94,34	95,65	97,49	1,84
Média				1,87 g.dm ⁻² min ⁻¹

A.3 - Matriz Leca® S sem PCM (LS00)

Na Tabela A.7 apresentam-se os resultados adquiridos nos ensaios de retração, resistências à flexão e compressão da matriz LS00, matriz de maior granulometria e sem PCM. As Tabelas A.8 e A.9 expõem os resultados relativos aos ensaios ao módulo de elasticidade e de capilaridade.

Tabela A.7. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LS00

		Retração / mm		Massa / g	Res. Flexão / N mm ⁻²	Res. Compressão / N mm ⁻²
	Inicial	-	-	-		
Provete 1	7 Dias	-5,563	0,194	158,40	1,01	2,37
	28 Dias	-5,595		159,58		
					0,96	2,27
	Inicial	-	-	-		
Provete 2	7 Dias	-5,507	0,219	161,33	0,91	2,17
	28 Dias	-5,542		162,23		
	Média		0,207			

Mais uma vez, devido às mesmas questões de dificuldades nos ensaios, a retração inicial não foi observada.

Tabela A.8. Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LS00

	Módulo Elasticidade	7 Dias	28 Dias	
	Massa / g	110,53	110,41	111,55 Média
Provete 3	Freq Ressonância	-	-	3,75/3,70 2863 mPa

Tabela A.9. Resultados ensaios de capilaridade da matriz LS00

Capilaridade	Massa inicial / g	Massa 10 min / g	Massa 90 min / g	
Provete 1	83,66	85,95	86,85	0,90 Média
Provete 2	82,57	85,24	85,87	0,63 0,77 g.dm ⁻² min ⁻¹

A.4 - Matriz Leca® S com PCM (LS01)

Na Tabela A.10 é possível analisar os resultados relativos aos ensaios de retração, resistências à flexão e compressão da matriz LS00, matriz de maior granulometria e com PCM. Posteriormente, as Tabelas A.11 e A.12 apresentam os resultados respeitantes aos ensaios ao módulo de elasticidade e de capilaridade.

Tabela A.10. Resultados dos ensaios de retração, resistência à flexão e resistência à compressão da matriz LS01

	Retração / mm	Massa / g	Res. Flexão / N mm ⁻²	Res. Compressão / N mm ⁻²
	Inicial - 5,072	191,84		
Provete 1	7 Dias - 5,276 1,744	181,86 83,40	0,76	2,21
	28 Dias - 5,555	175,84	0,77	2,21
	Inicial - 5,891	194,94		
Provete 2	7 Dias - 6,091 1,550	183,76 83,80	0,77	2,21
	28 Dias - 6,395	178,41		
Média	1,65	83,60		

Tabela A.11 Resultados ensaios ao módulo de elasticidade da matriz LS01

Módulo Elasticidade	7 Dias	28 Dias	Média
Massa / g	125,20	119,14	118,49
Provete 3			2,62/2,71
Freq Ressonância	-	-	1556 mPa

Tabela A.12. Resultados ensaios de capilaridade da matriz LS01

Capilaridade	Massa inicial / g	Massa 10 min / g	Massa 90 min / g	Média
Provete 1	93,96	94,40	96,43	2,03
Provete 2	95,86	97,25	99,34	2,09
				2,06 g.dm ⁻² min ⁻¹

Mais uma vez, dado que não foi observada a retração inicial da LS00, para efeitos de comparação, irá ter-se em conta apenas dos 7-28 dias a retração observada.

B.1 - Fluxo de calor das amostras de Leca® S e formulação L

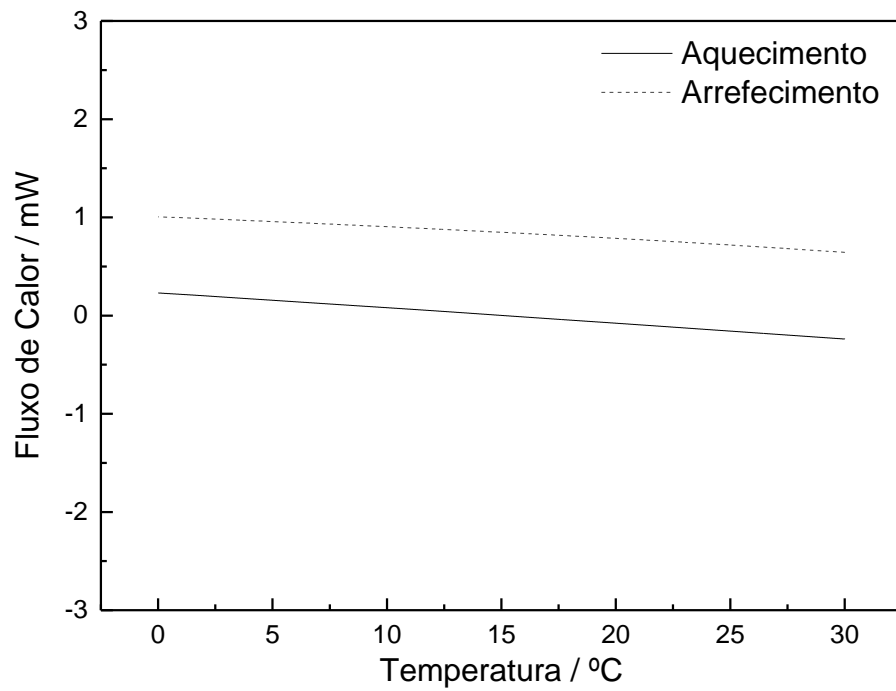


Fig. 40. Fluxo de calor na amostra LS00.

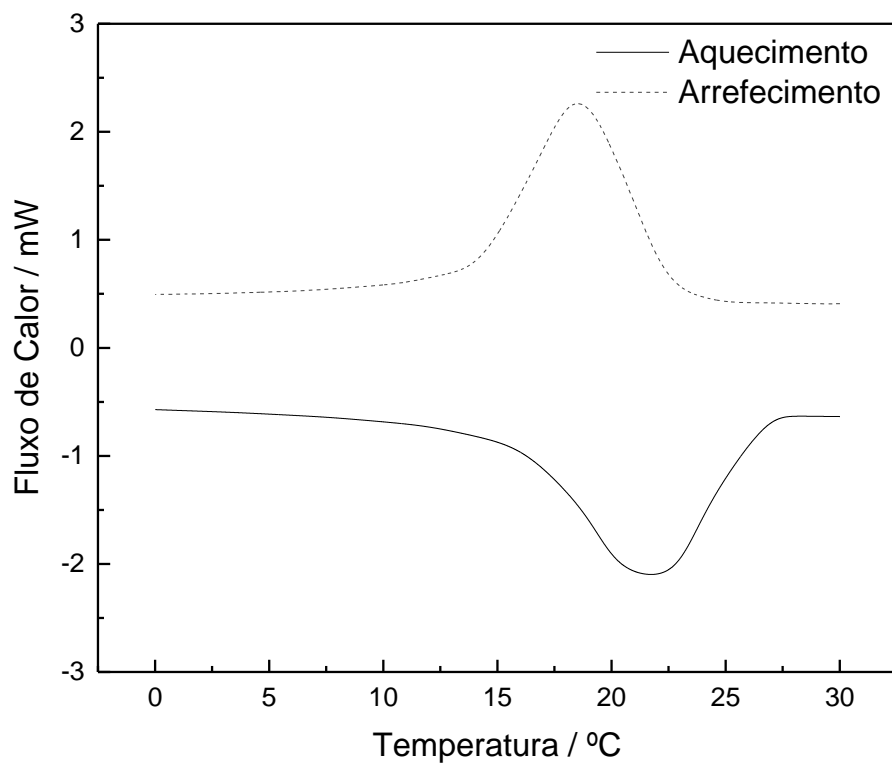


Fig. 41. Fluxo de calor na amostra S01NA.

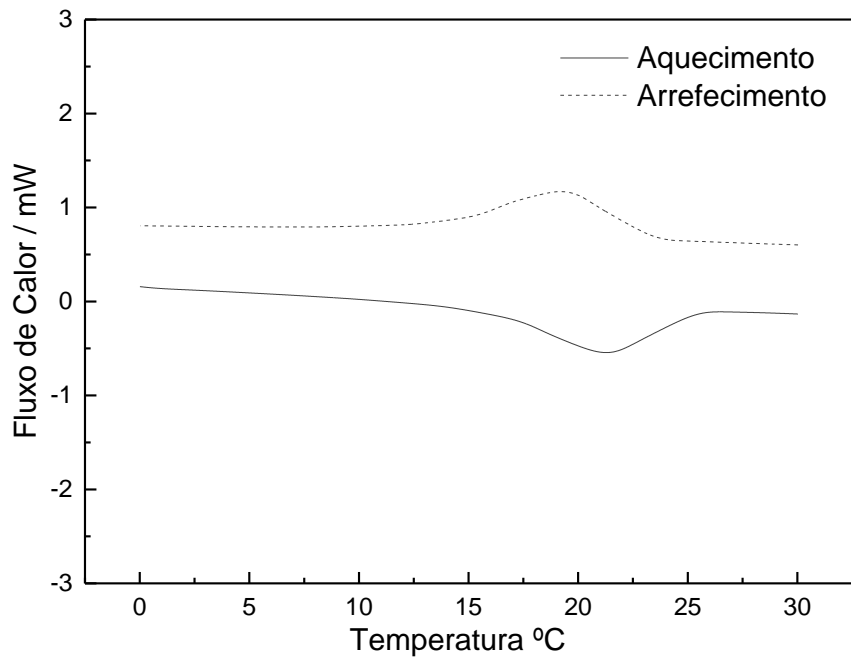


Fig. 42. Fluxo de calor na amostra S01A.

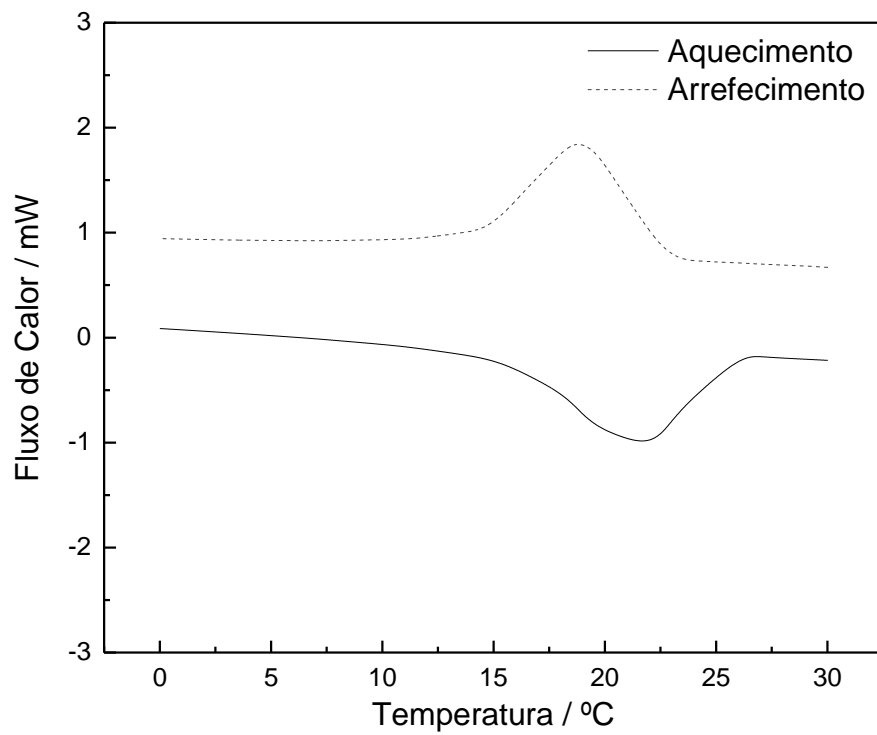


Fig. 43 Fluxo de calor na formulação LNA.

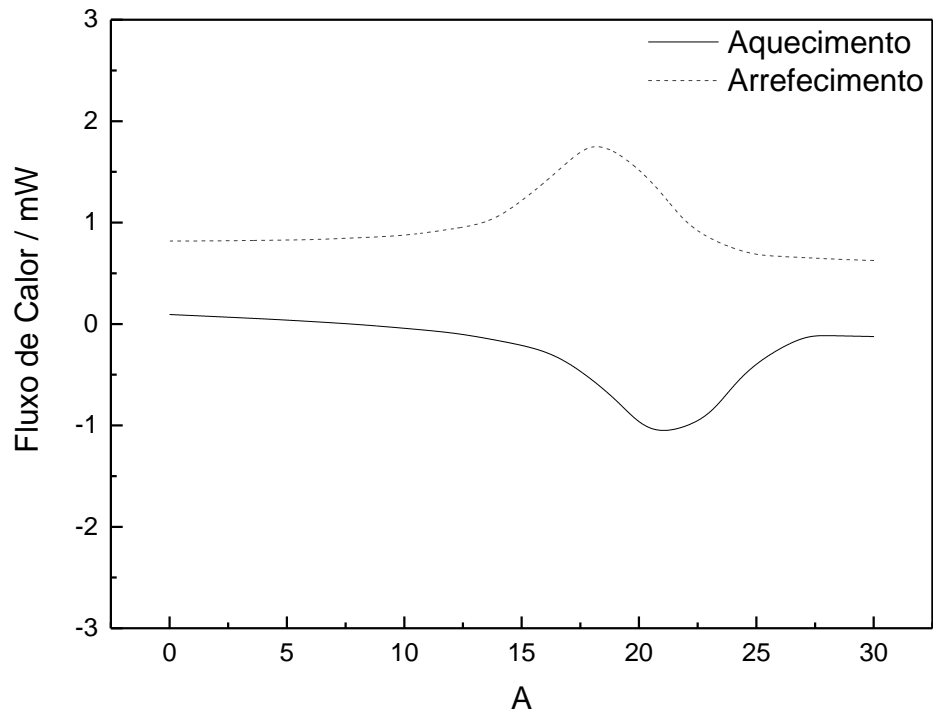


Fig. 44. Fluxo de calor na formulação LA.

B.2 - Entalpias de fusão e solidificação

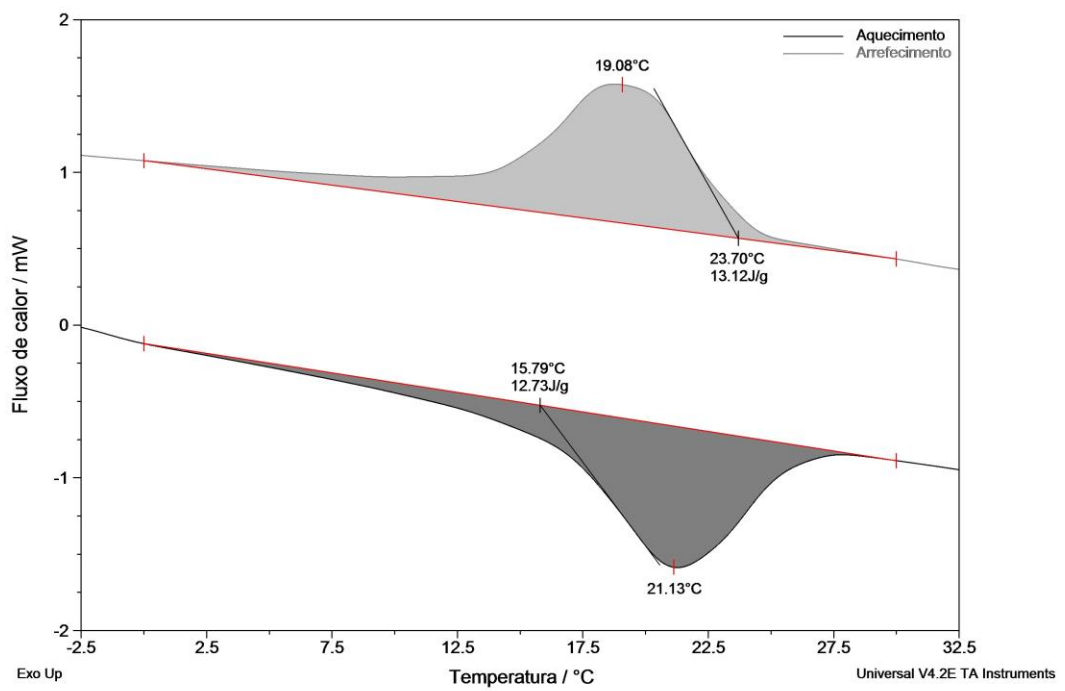


Fig. 45 Entalpia de fusão da amostra XS01A.

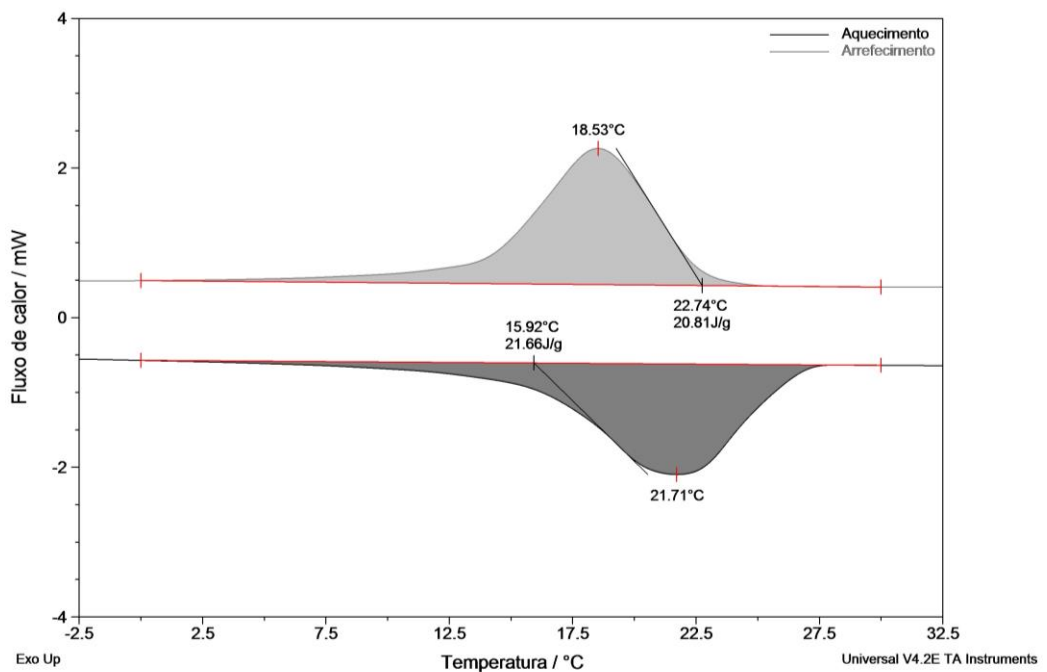


Fig. 46. Entalpia de fusão da amostra S01NA.

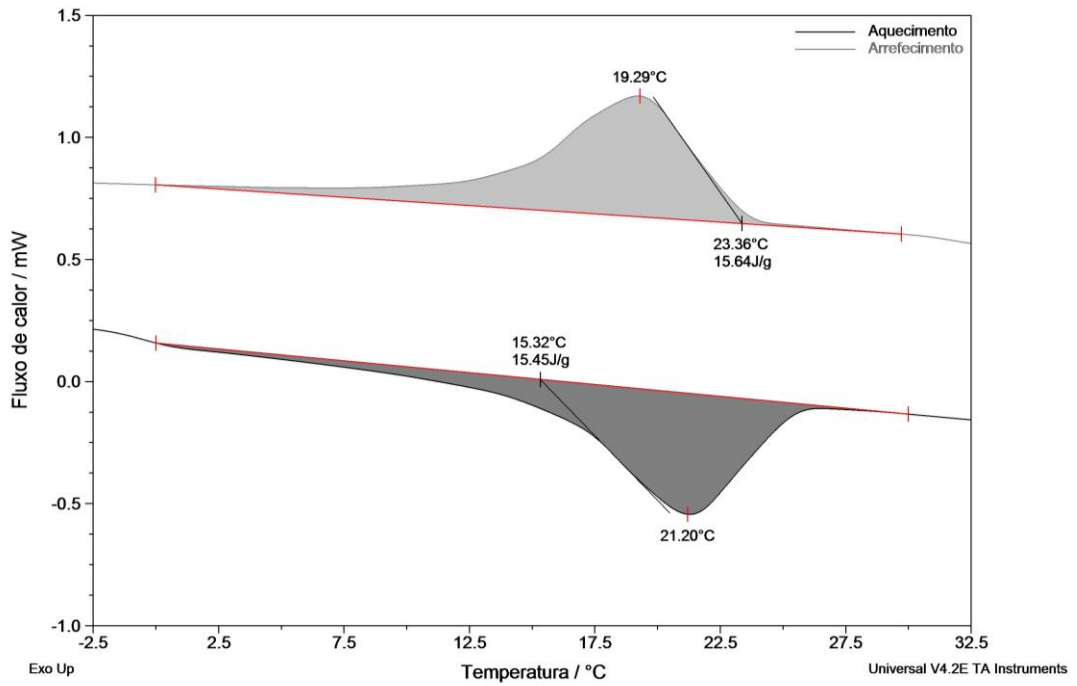


Fig. 47. Entalpias de fusão e solidificação da amostra S01A.

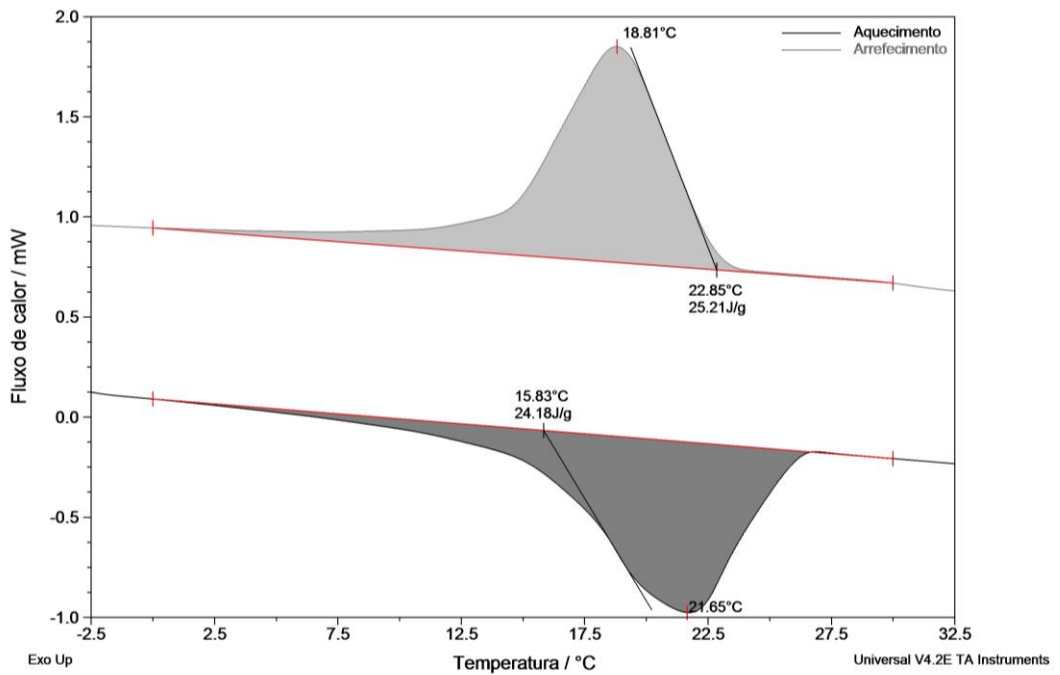


Fig. 48. Entalpias de fusão e solidificação da formulação LNA.

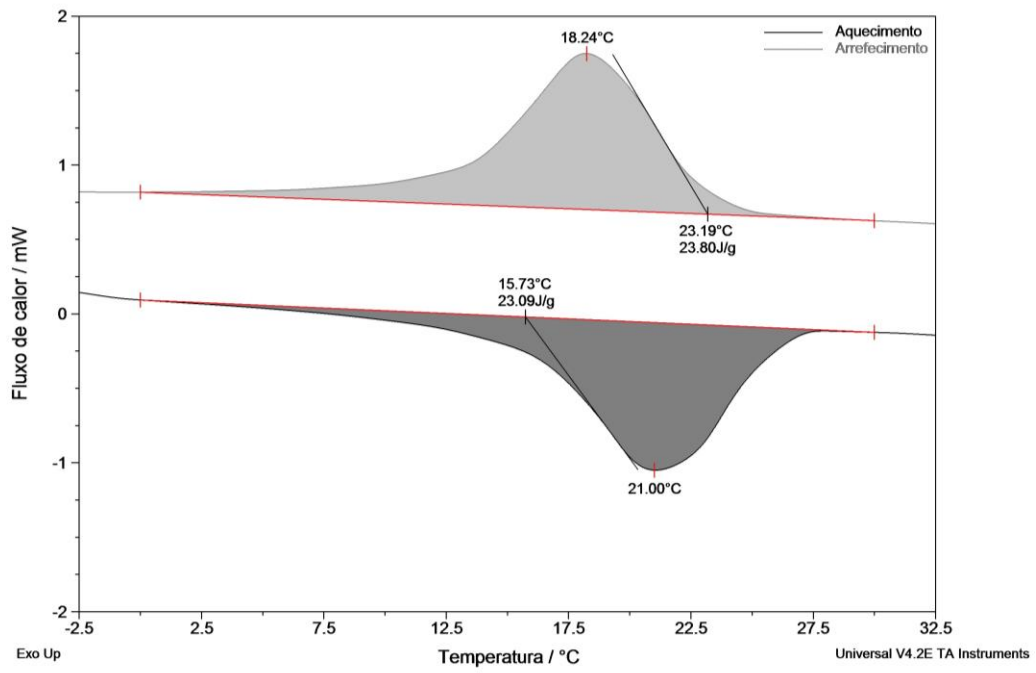


Fig. 49. Entalpias de fusão e solidificação da formulação LA.

B.3 - Calor específico das amostras de Leca® S e formulação L

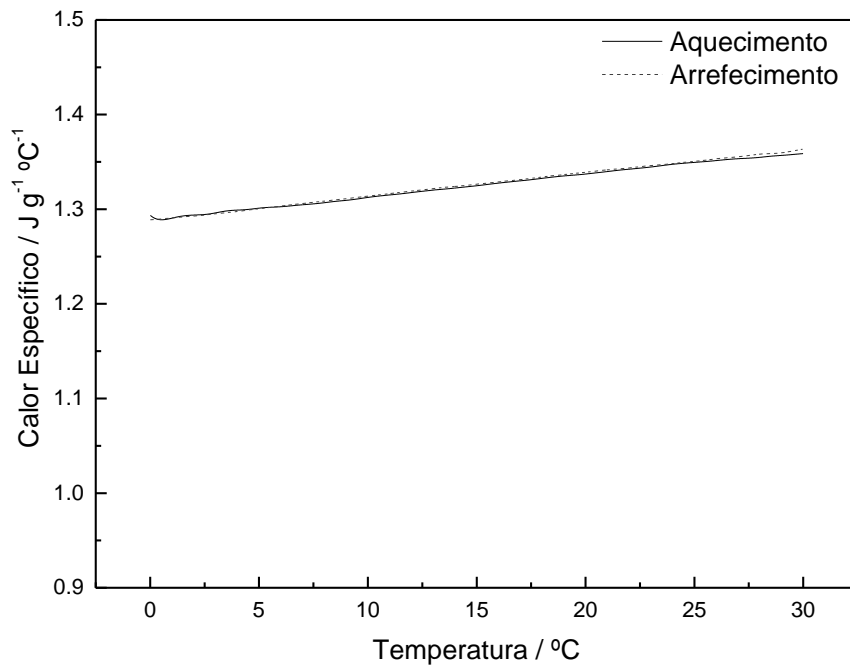


Fig. 50. Calor específico da amostra LS00.

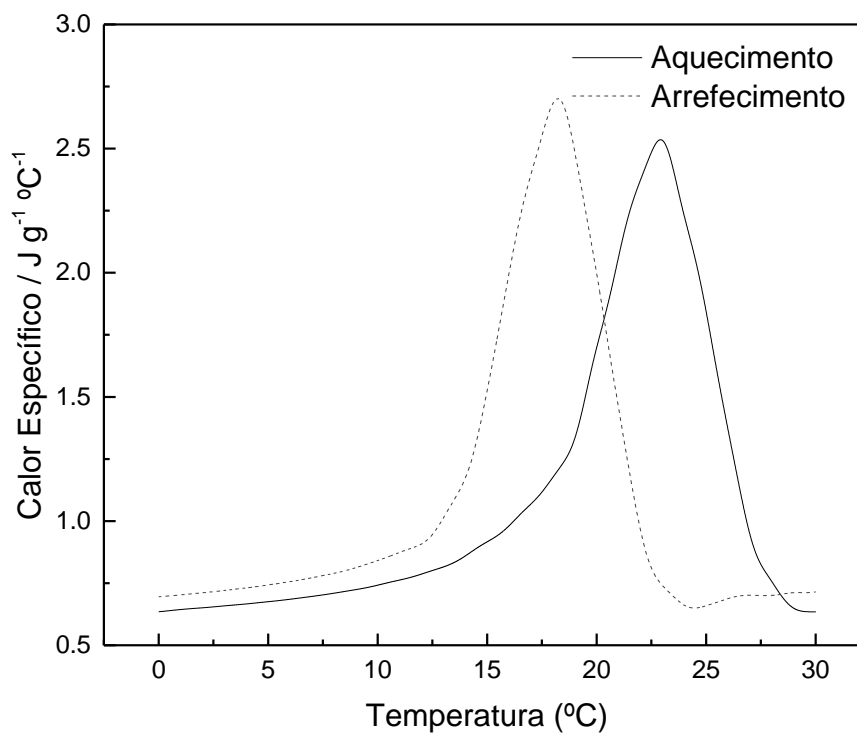


Fig. 51. Calor específico da amostra S01NA.

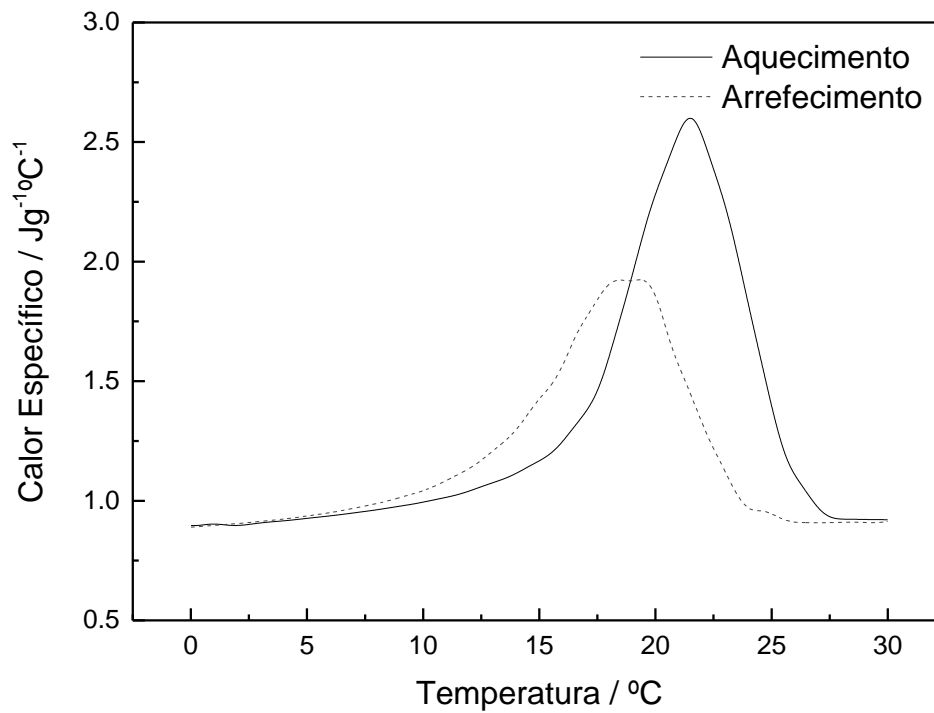


Fig. 52. Calor específico da amostra S01A.

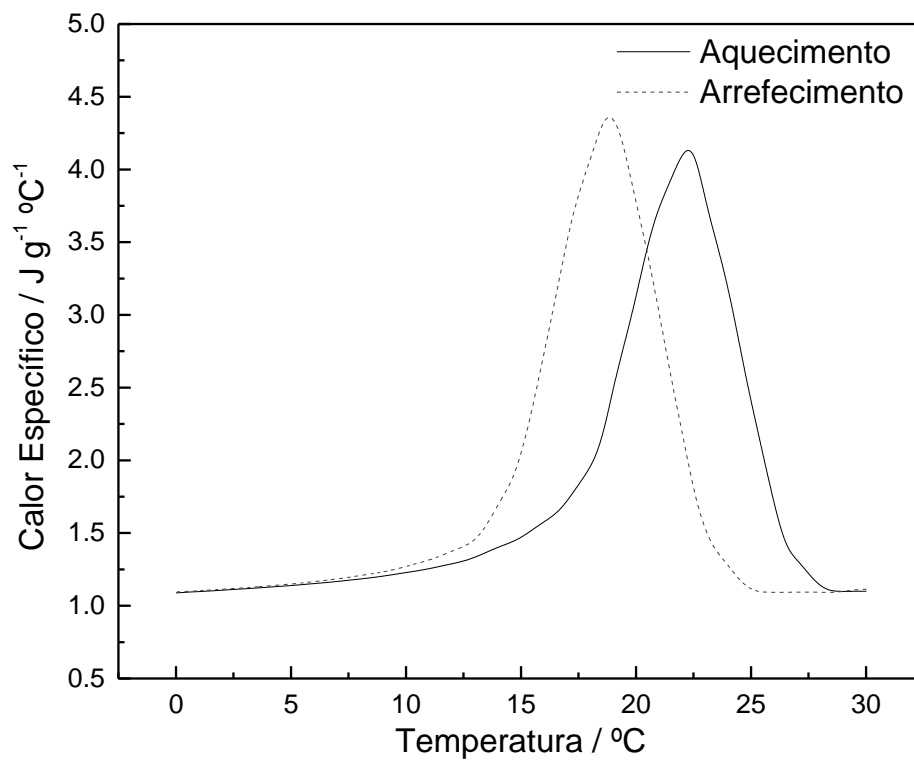


Fig. 53. Calor específico da formulação LNA.

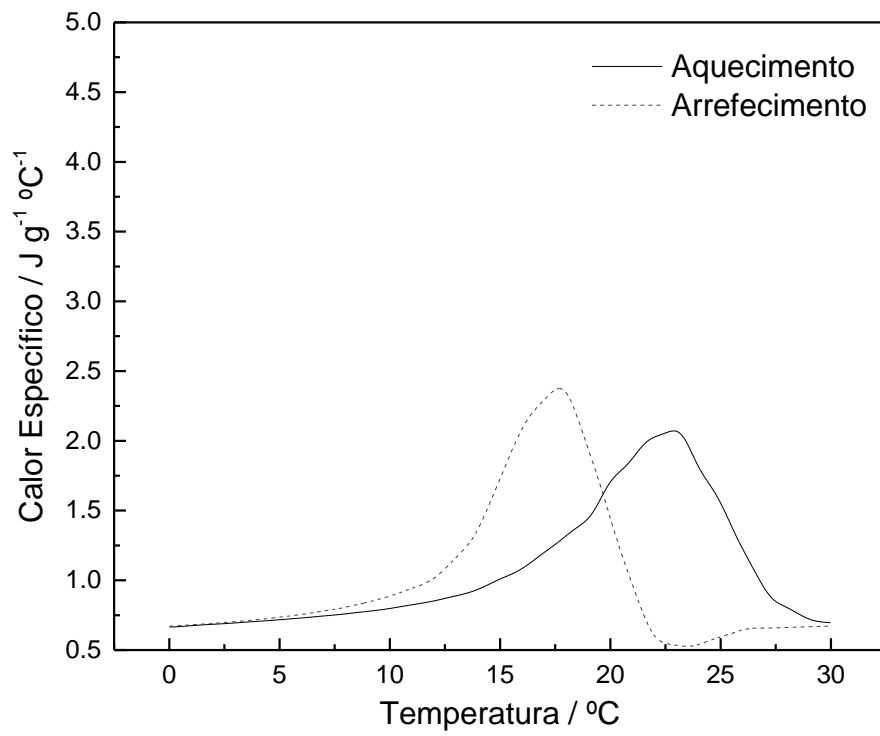


Fig. 54. Calor específico da formulação LA.

B.4 - Entalpia das amostras de Leca® S e formulação L

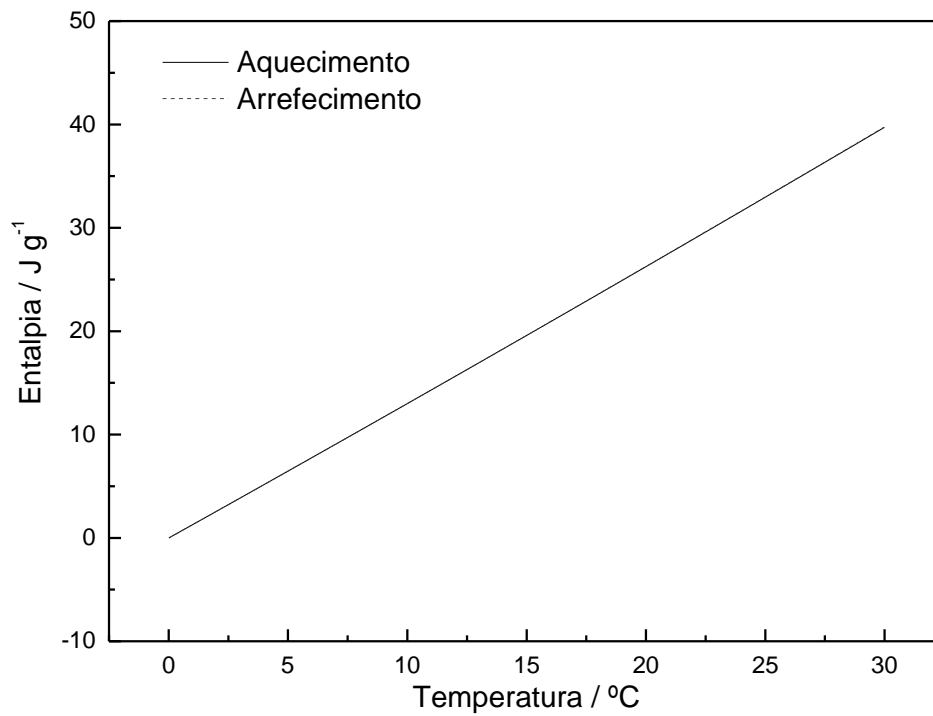


Fig. 55. Entalpia da amostra LS00.

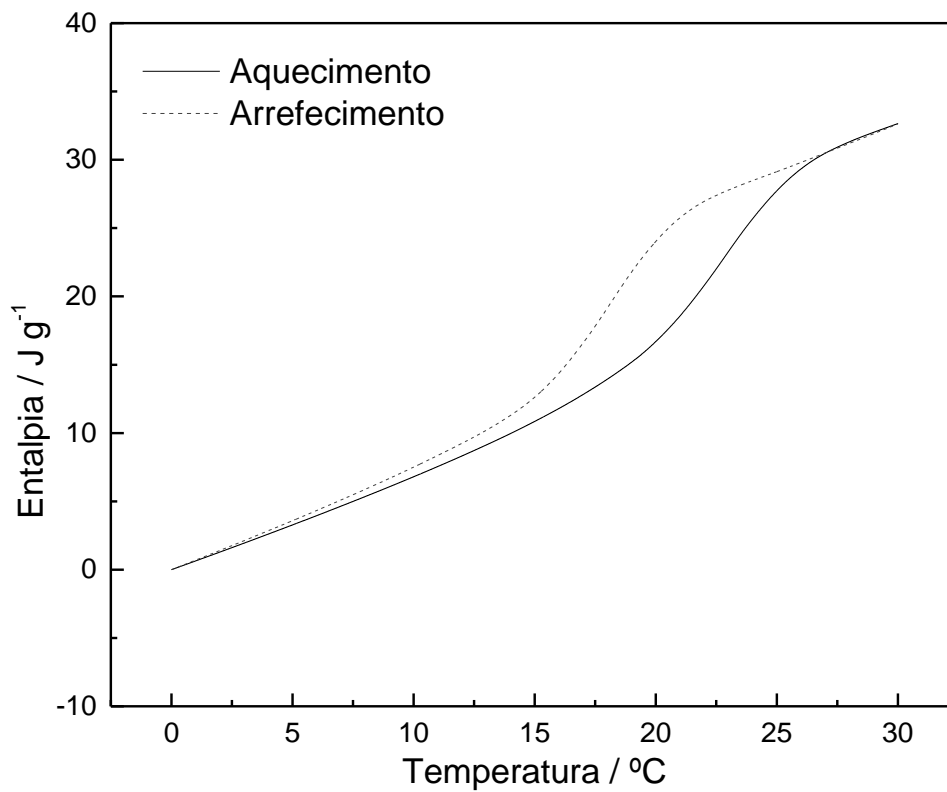


Fig. 56. Entalpia da amostra S01NA.

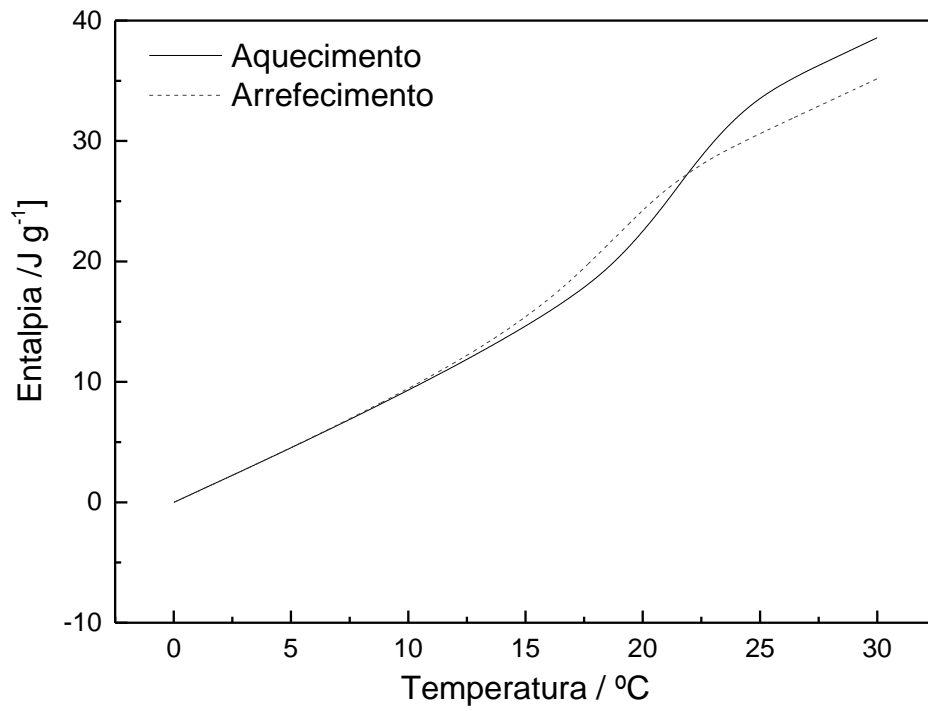


Fig. 57. Entalpia da amostra S01A.

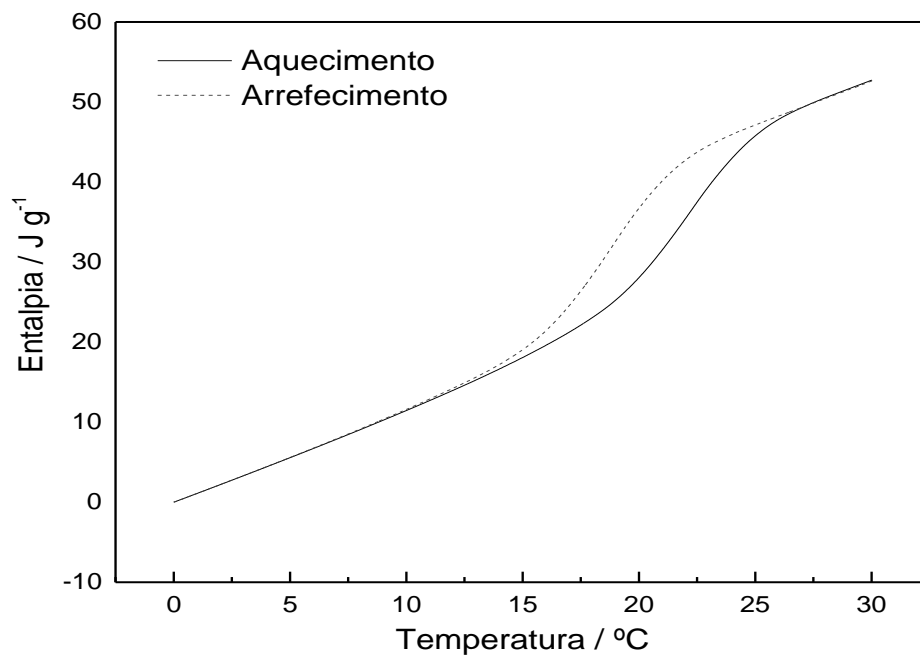


Fig. 58. Entalpia da formulação LNA.

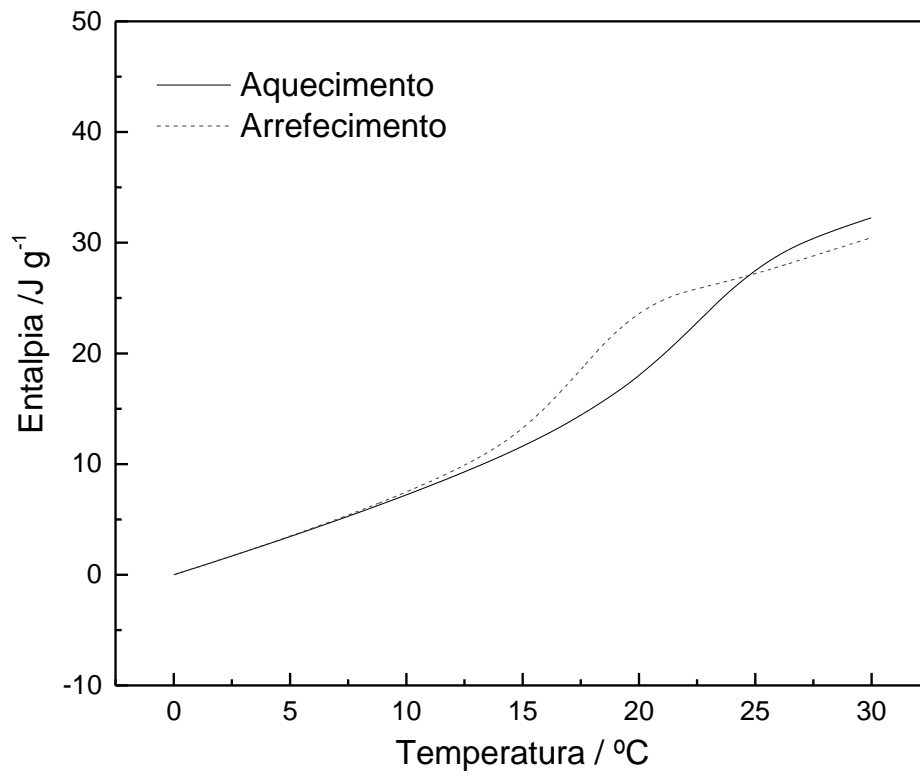


Fig. 59. Entalpia da formulação LA.

C.1 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para o PCM Puro

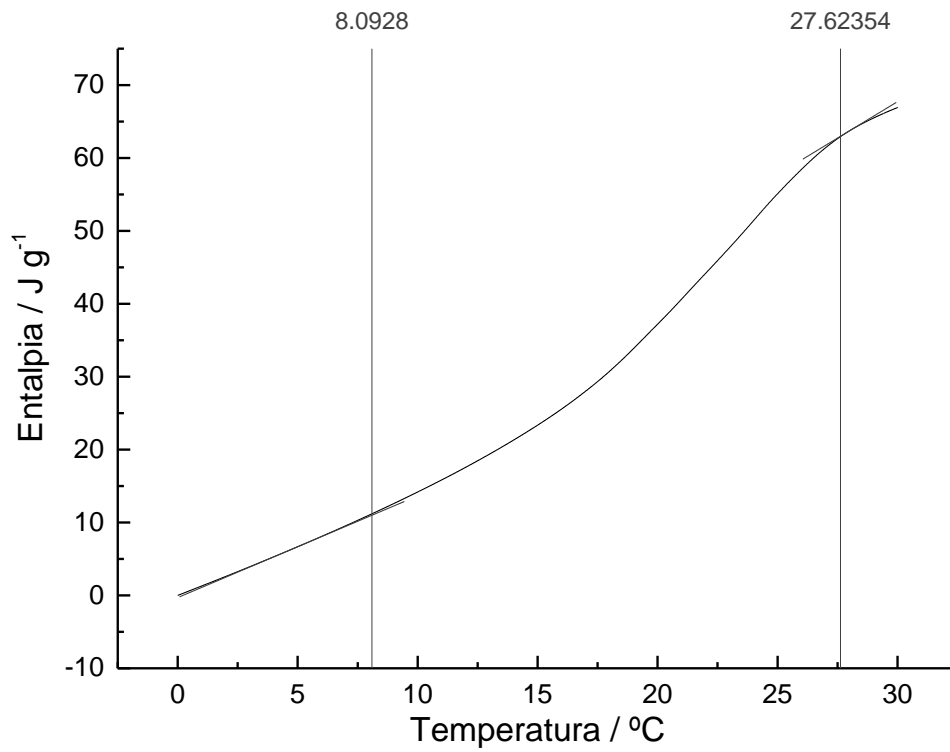


Fig. 60. Entalpia de fusão da amostra de PCM puro, em função de temperatura.

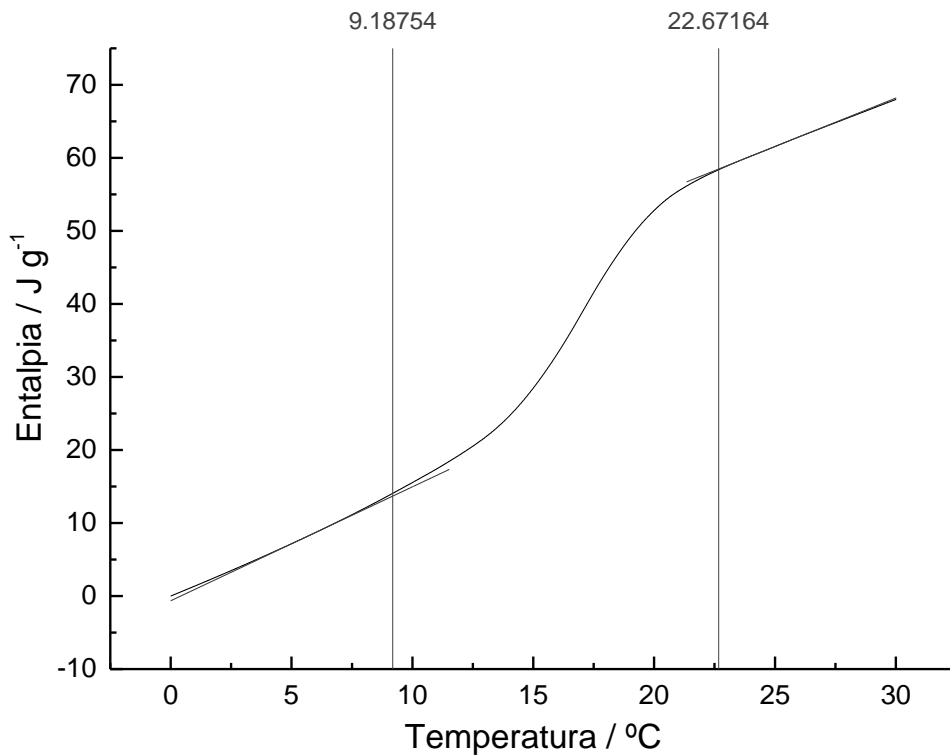


Fig. 61. Entalpia de solidificação da amostra de PCM puro, em função da temperatura.

C.2 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz XS01NA

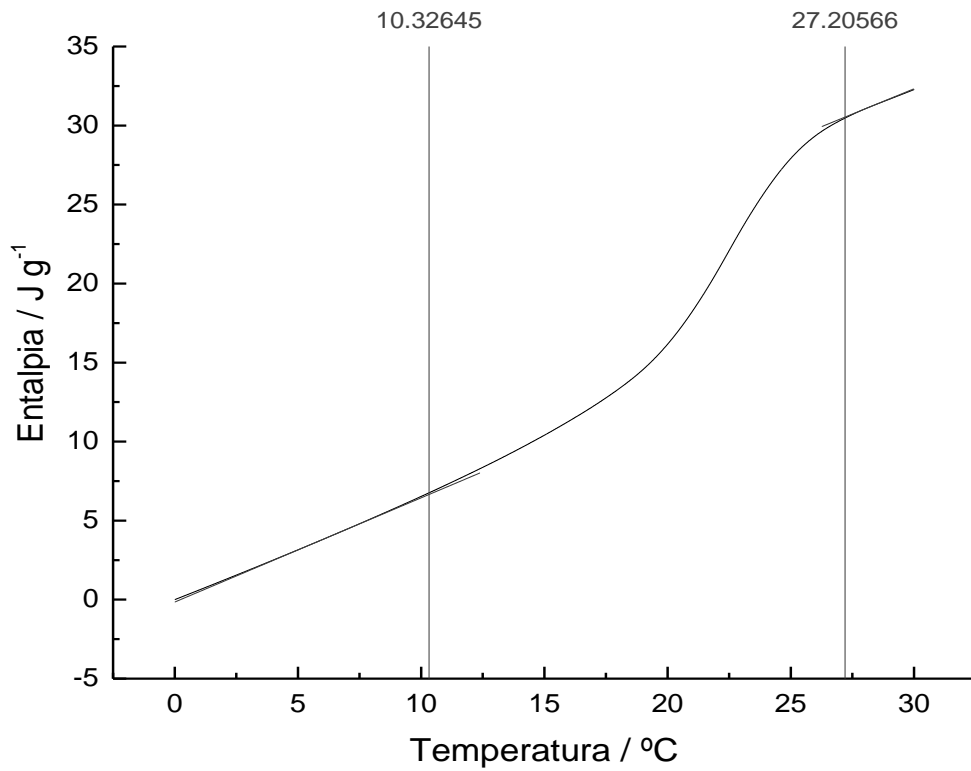


Fig. 62. Entalpia de fusão da amostra XS01NA, em função de temperatura.

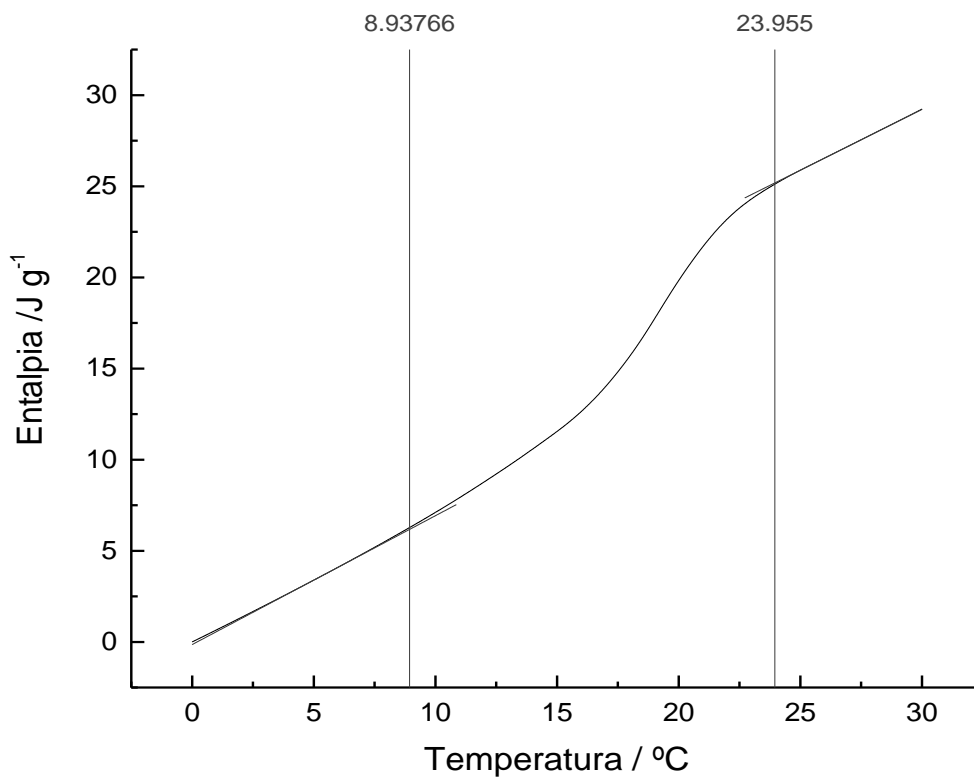


Fig. 63. Entalpia de solidificação da amostra XS01NA, em função de temperatura.

C.3 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz XS01A

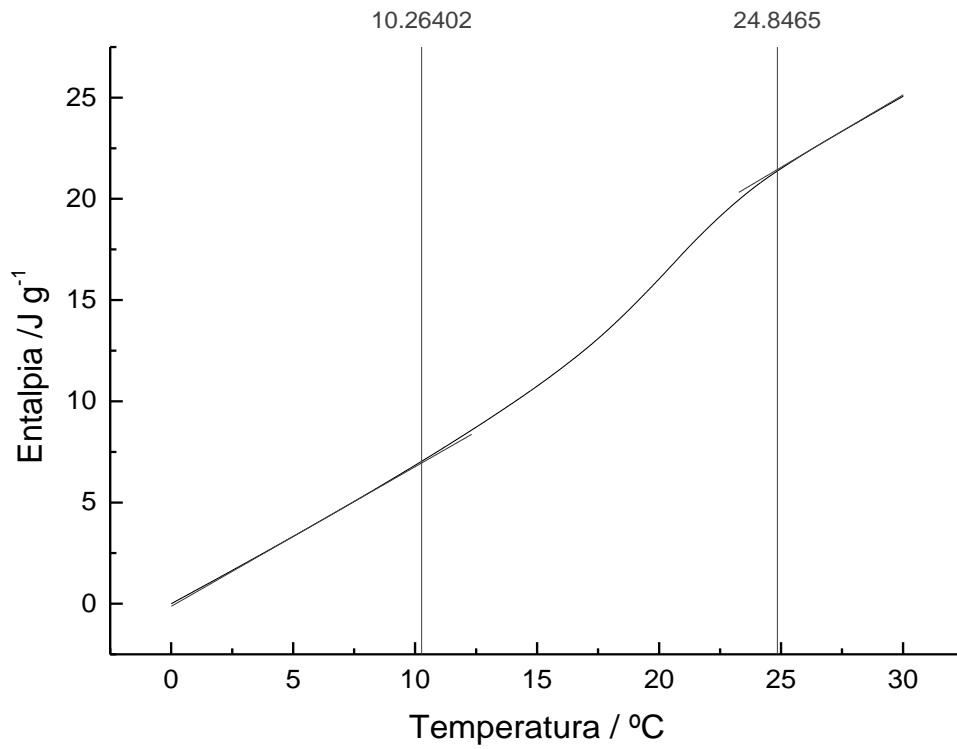


Fig. 64. Entalpia de fusão da amostra XS01A., em função de temperatura.

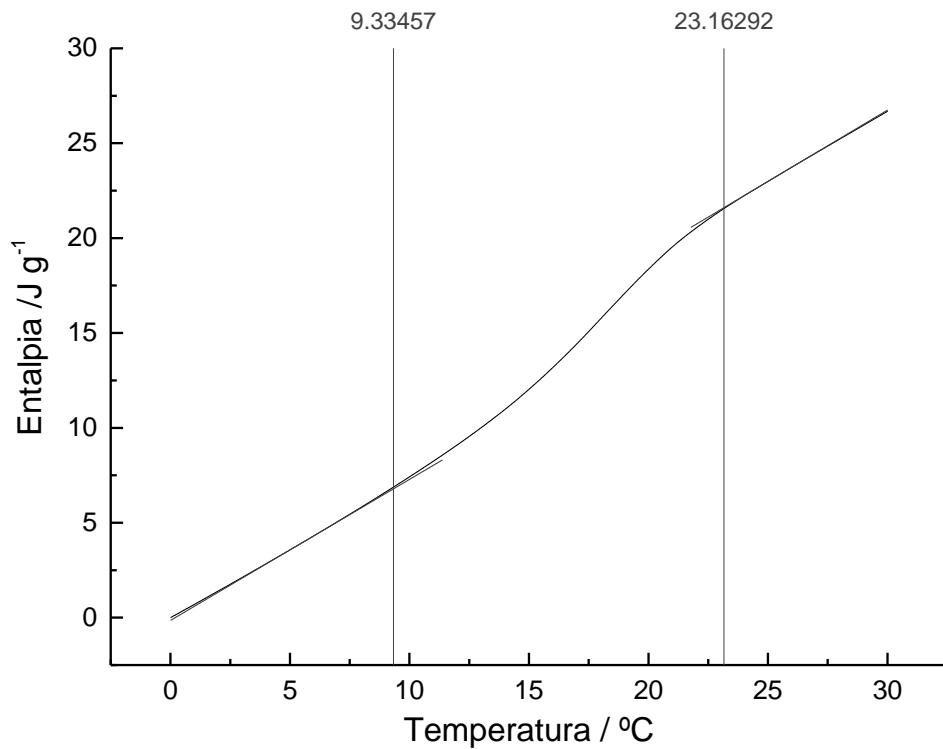


Fig. 65. Entalpia de solidificação da amostra XS01A., em função de temperatura.

C.4 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz S01NA

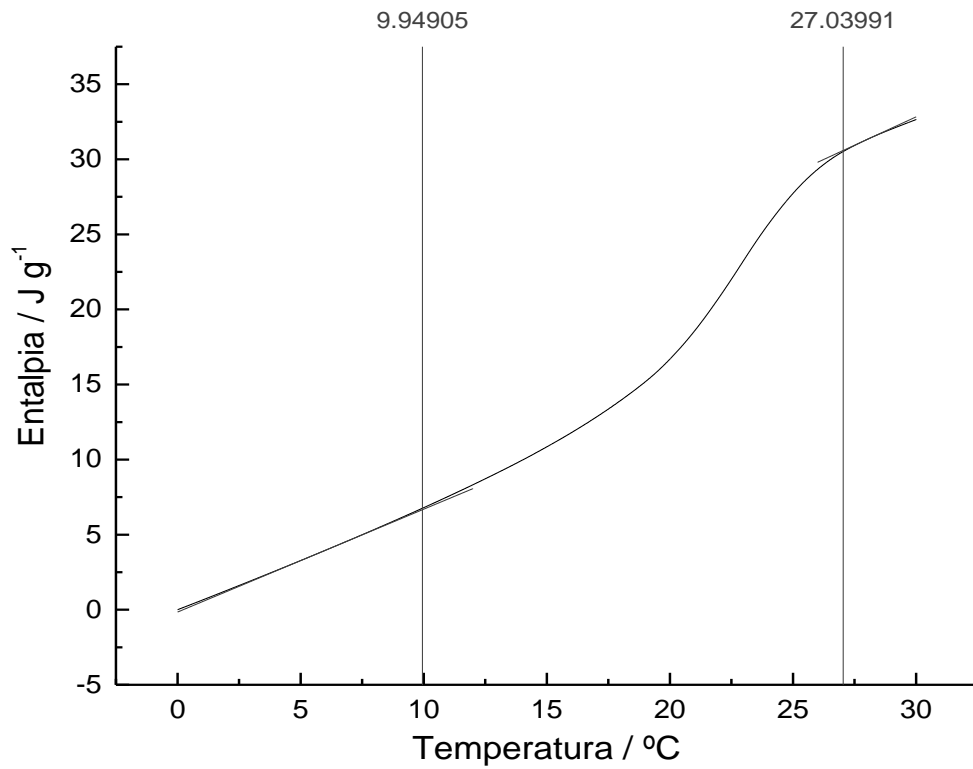


Fig. 66. Entalpia de fusão da amostra S01NA, em função de temperatura.

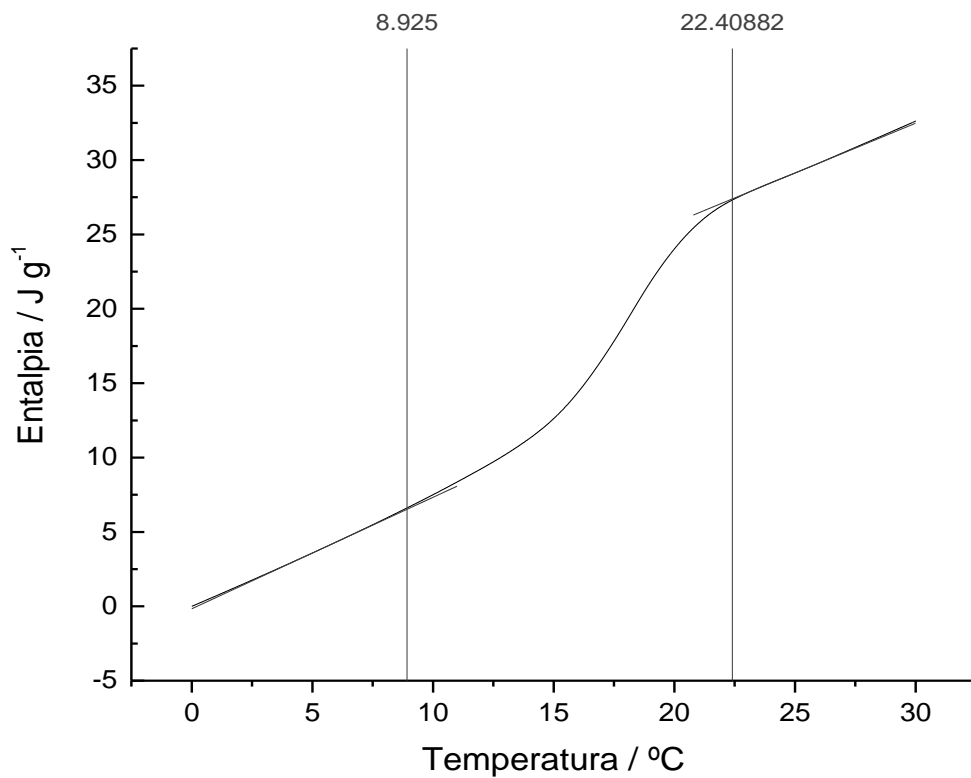


Fig. 67. Entalpia de solidificação da amostra S01NA, em função de temperatura.

C.5 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz S01A

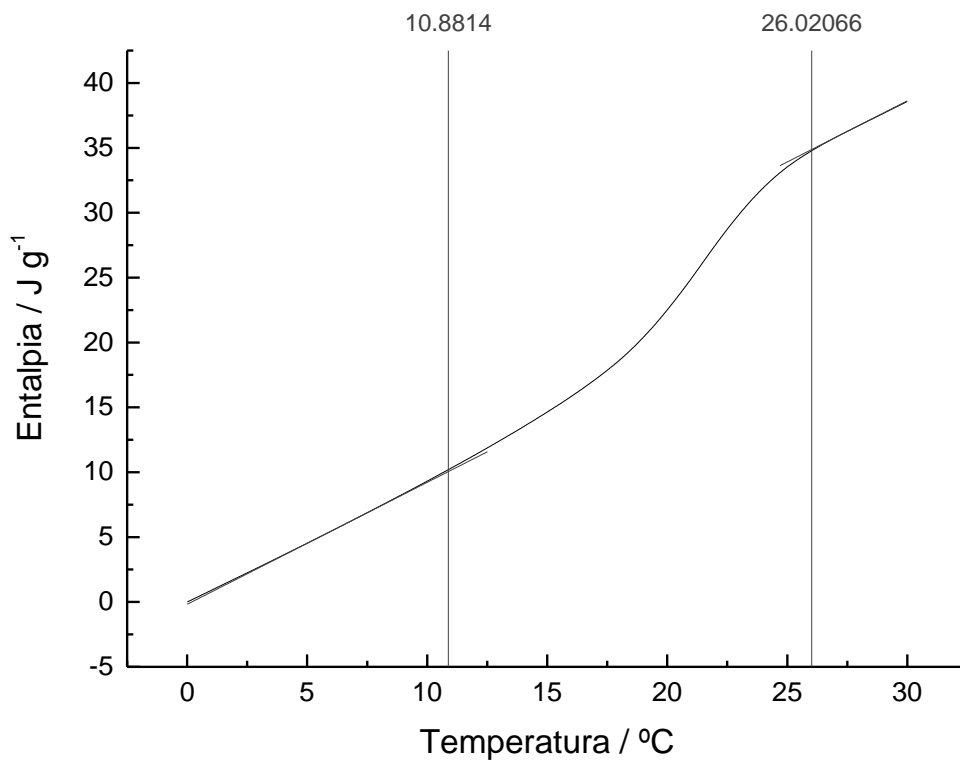


Fig. 68. Entalpia de fusão da amostra S01A, em função de temperatura.

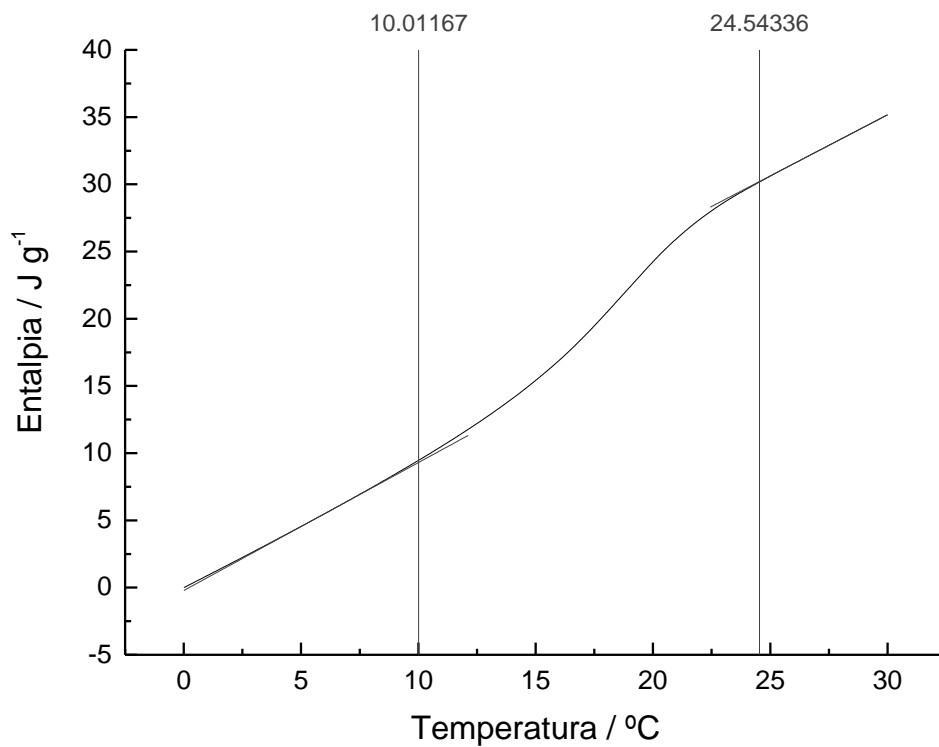


Fig. 69. Entalpia de solidificação da amostra S01A, em função de temperatura.

C.6 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz LNA

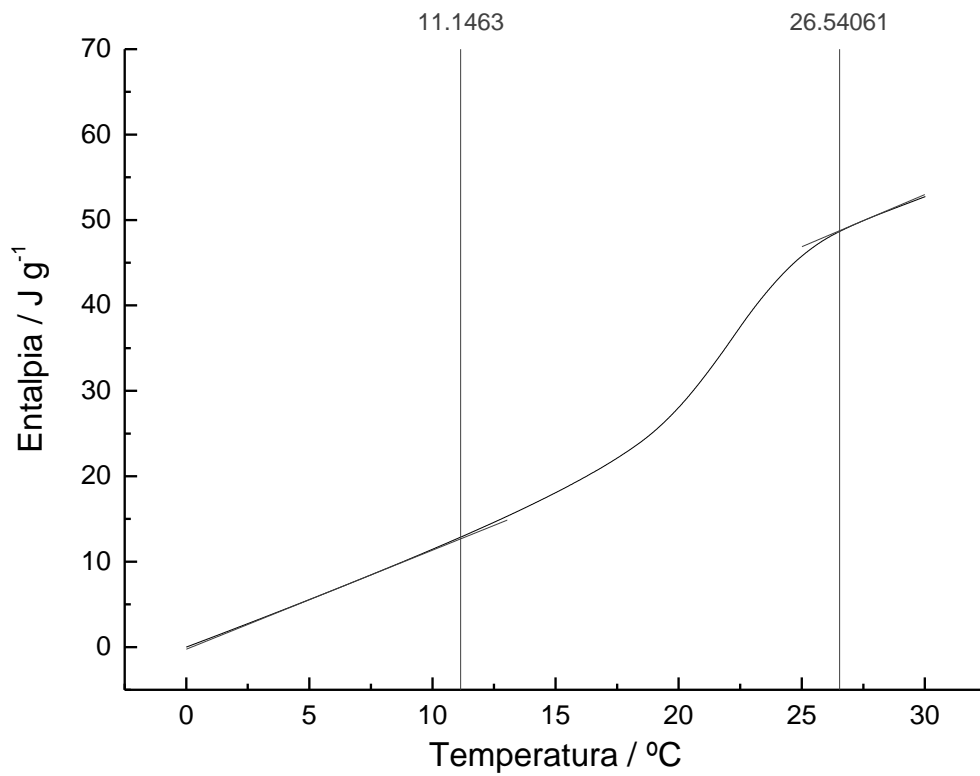


Fig. 70. Entalpia de fusão da amostra LNA, em função de temperatura.

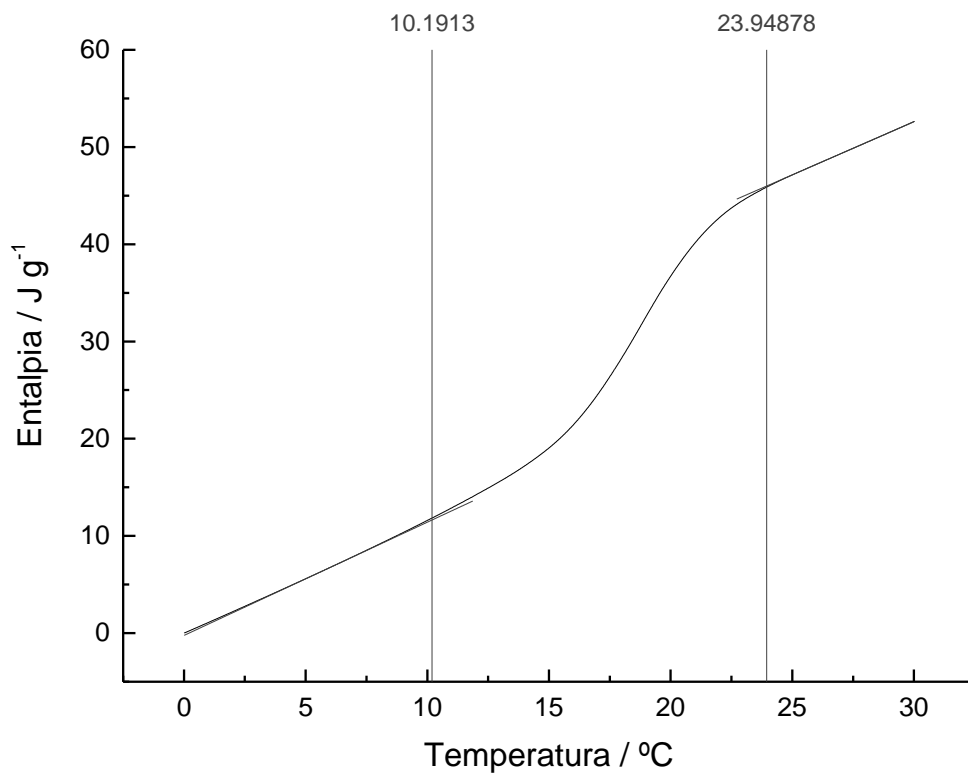


Fig. 71. Entalpia de solidificação da amostra LNA, em função de temperatura.

C.7 - Determinação dos intervalos de mudança de fase para a matriz LA

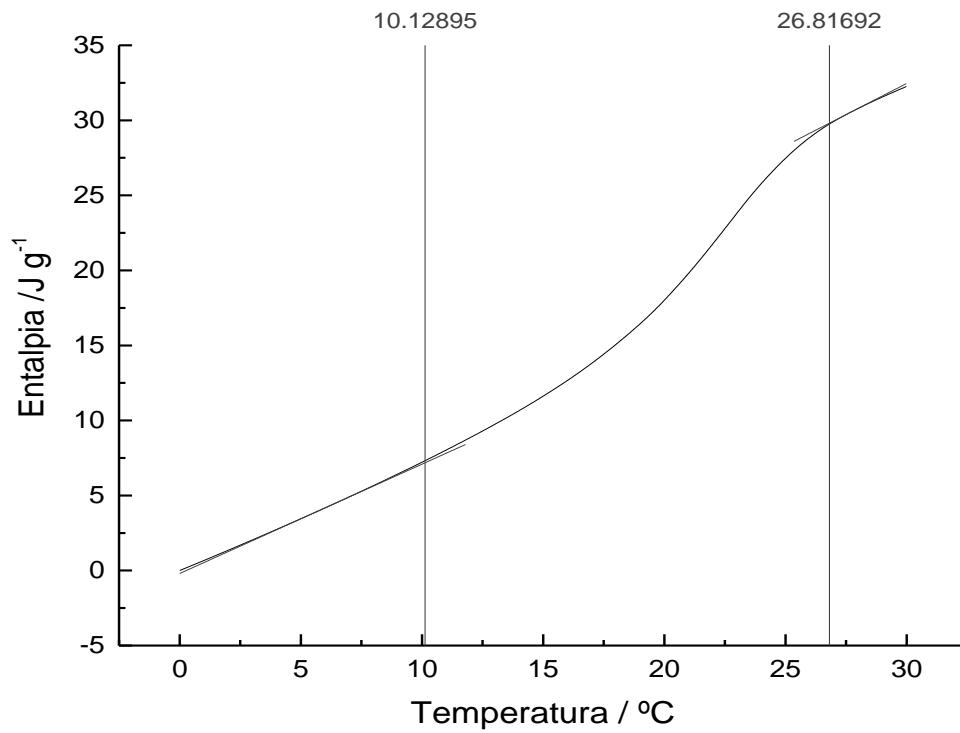


Fig. 72. Entalpia de fusão da amostra LA, em função de temperatura.

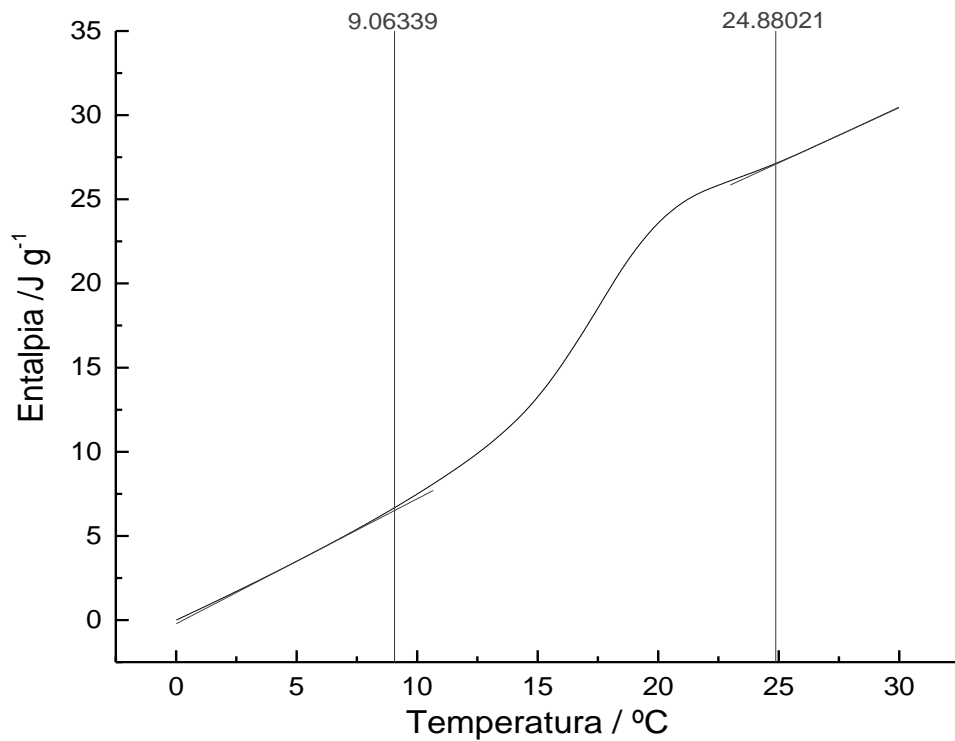


Fig. 73. Entalpia de solidificação da amostra LA, em função de temperatura.