



CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DAS PROPRIEDADES DE CONCRETO ADITIVADO PARA USO EM AQUECEDOR SOLAR

ARTIGO ORIGINAL

DUARTE, Stefano Ribeiro¹, MARTINS, Silvana de Abreu², BERNADÁ, Gabriel Mario Guerra³

RIBEIRO, Viviane Pinto Alves. **Caracterização termomecânica das propriedades de concreto aditivado para uso em aquecedor solar**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano. 08, Ed. 08, Vol. 05, pp. 202-227. Agosto de 2023. ISSN: 2448-0959, Link de acesso: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/concreto-aditivado>, DOI: 10.32749/nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/concreto-aditivado

RESUMO

A demanda global de energia aumenta a cada ano, motivando pesquisadores em todo planeta a buscar fontes mais sustentáveis e menos onerosas. Em relação ao uso residencial, o maior consumo de energia ocorre no processo de aquecimento de água. Sendo assim, desenvolveu-se neste trabalho um estudo de um material de baixo custo, à base de cimento e areia, que aqui será denominado concreto, para uso na construção de um painel solar para aquecimento de água para uso residencial. Neste trabalho foi adicionado um material aditivo no concreto com a função de melhorar suas propriedades térmicas. Este aditivo, chamado material de mudança de fase *Phase Change Material* (PCM), é composto por sebo de boi e tem a função de melhorar as propriedades do concreto como armazenador de calor latente. Foram adicionadas frações crescentes do PCM no concreto e a partir daí feito ensaios para avaliar as características termo mecânicas do concreto aditivado. Os ensaios realizados foram especificamente o Teste de difusividade térmica/Condutividade térmica; Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC - *Differential Scanning Calorimeters*), Análise Termogravimétrica (TGA - *Thermogravimetric Analyzers*) assim como os ensaios de compressão e a modelagem mecânica do painel. Os resultados mostraram que o aditivo melhora a capacidade do material absorver e reter o calor e assim armazenar a energia por mais tempo. Porém, em relação ao ensaio de compressão foi observada uma diminuição da resistência e módulo de elasticidade com o incremento de aditivo, contudo este efeito não comprometeu a função estrutural do material no painel.

Palavras-chave: Aquecedor Solar, Concreto Aditivado, Material de mudança de fase, painel solar.



1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda mundial por energia, a possibilidade de reduzir ao máximo os custos de sua obtenção traz, além do ganho econômico, a possibilidade de dar acesso à uma parte da população, excluída por diversos fatores, à utilização desses recursos com menores custos.

O maior consumo de energia nas residências da população em geral, está ligado ao aquecimento de água, sendo que a energia elétrica é a mais utilizada (SILVA, 2012). Por este aspecto, um sistema de aquecimento solar de baixo custo seria uma tecnologia para obtenção de energia a ser popularizada em meio às populações de baixa renda. Motivo pelo qual torna-se de extrema relevância a pesquisa de alternativas que possam auxiliar na superação destes problemas.

O *Phase Change Material* (PCM), utilizado como aditivo, é uma classe de materiais que vem sendo estudada devido as suas aplicações na área de energia térmica, como mostra Costa (2014), com características de armazenar uma maior quantidade de energia térmica em uma faixa curta de temperatura, próprio do calor latente, o material armazena energia a temperatura constante (CUNHA, 2016). A diversidade de PCMs com diversas faixas de temperatura de calor latente desperta interesses na elaboração de sistemas para acúmulo de energia térmica, tanto para isolamento de ambientes quanto para uso no aquecimento, como mostra Trindade (2018), eles podem ser incorporados em outros materiais de forma direta, imersão ou encapsulamento (ZHOU *et al.*, 2012). Em projetos de sistemas de aquecimentos, como aquecedores solares para água, Khalifa (2012) usando uma camada de cera de parafina, um tipo de PCM, sem inserção em outro material, verificou que em comparação com um sistema sem PCM em dias semi nublados a temperatura média da cera, estava maior que o restante do equipamento, atestando a conservação de energia, como também constatado por Douvi *et al.* (2021) em uma revisão geral das tecnologias relacionadas a armazenamento térmicos por diversos PCMs em coletores comerciais modificados, mas Cellat *et al.* (2015) faz uma inserção direta de uma mistura de PCM de ácidos graxos em uma matriz de concreto e também observa ganho térmico, sendo possível a construção de um coletor solar de concreto com este



tipo de PCM. Os ácidos graxos são materiais de base biológica ou orgânicos, produzidos a partir de matérias-primas que seriam descartadas como exemplo óleos de palma, coco, soja e o sebo bovino, nosso aditivo, a vantagem destes materiais em relação aos parafínicos está no fato de serem menos inflamáveis, conforme Jeong (2013) e estabilidade de oxidação depois de vários ciclos térmicos (KHALIFA, 2012). Então os ácidos graxos estão dentro do quadro de grandes características importantes para aplicação de aquecedores solares com baixo custo e seguros.

2. METODOLOGIA

O concreto foi obtido pela mistura de cimento Portland CP III-32 RS, da fabricante Votoran, areia peneirada seca e água na proporção 1:3:0.5, mais o aditivo de sebo bovino industrial.

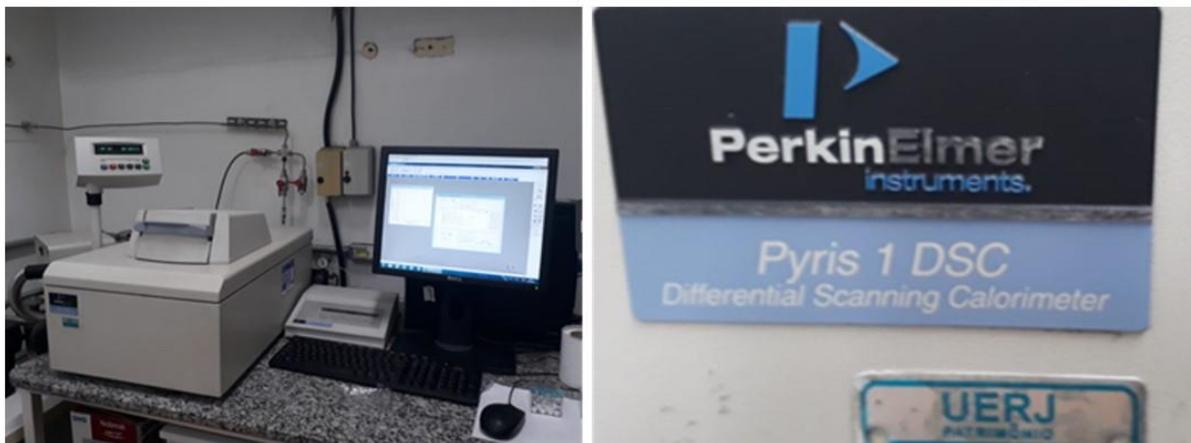
Todos os ensaios e testes foram realizados em amostras de concreto com 1% e 2% de PCM em peso e amostra sem PCM.

2.1 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC)

Foi realizado no Laboratório de Caracterização Instrumental do Departamento de Processos Químicos da UERJ. O equipamento utilizado foi o modelo *Pyris 1 DSC* da fabricante *Perkin Elmer Instruments*. O ensaio começou com o ajuste da atmosfera no compartimento da amostra, onde foi utilizado o gás Nitrogênio, N_2 , como gás inerte a uma vazão de 50,0 ml/min. Os parâmetros de processo para um grupo de amostras seguiram os seguintes passos: primeiramente, foi estabelecida uma isotérmica a 55°C durante 2 minutos com um fluxo de calor inicial de 20,00 mW, em seguida foi aumentada a temperatura de 55°C até 100°C na taxa de 10,00 °C/min, em um terceiro processo foi estabelecida uma isotérmica a 100°C durante 2 minutos, logo depois a temperatura foi elevada para 55°C a uma taxa de 10°C e na última etapa do programa de temperatura, esta foi elevada de 55°C até 100°C com taxa de 10,00 °C/min. Este ciclo térmico foi estabelecido para desenhar um perfil térmico no material, conforme também estudado por Jeong *et al.* (2013). De acordo com a norma ASTM E794-06. Na figura 1 pode-se observar o equipamento utilizado neste ensaio.



Figura 1- Equipamento utilizado no ensaio DSC

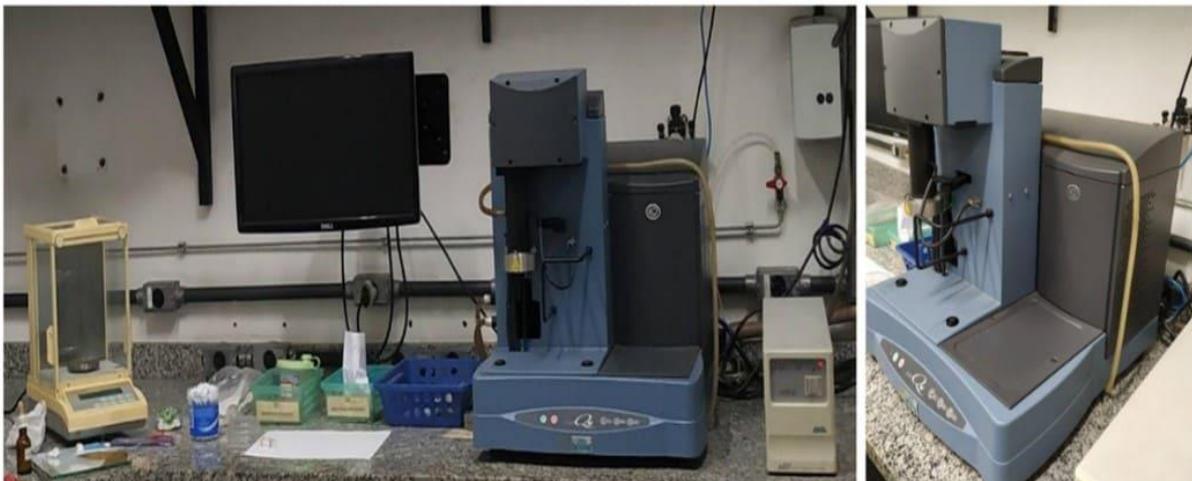


Fonte: autor (2022).

2.2 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA- THERMOGRAVIMETRIC ANALYZERS)

Realizado no Laboratório de Caracterização Instrumental do Departamento de Processos Químicos da UERJ. Esta análise seguiu a metodologia da Norma ASTM E1131-8, onde obteve-se um gráfico, da variação da massa da amostra em função do tempo e da temperatura, assim como de sua derivada DTGA (*Derivative Thermogravimetry Analyzers*). A variação considerada nesta análise foi de 25 a 800 °C, com a taxa de 15 °C/min. A figura 2 mostra o equipamento utilizado nesta análise.

Figura 2 - Equipamento do TGA utilizado neste trabalho



Fonte: autor (2022).

2.3 TESTE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA

Este teste foi realizado no Laboratório de materiais do Departamento de Materiais e Mecatrônica (DMM) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica do Sistema Eletrobrás (CEPEL), utilizando o equipamento LFA 447 Nano Flash® (fabricante NETZSCH). A análise baseia-se no princípio da determinação da difusividade térmica a partir do monitoramento da evolução de temperatura da superfície de um material com o tempo, após a superfície oposta à monitorada ser submetida a um pulso de laser. (referência padrão de procedimento de ensaio do CEPEL PR/MA1.81). Na figura 3, observa-se o laboratório e equipamentos utilizados neste teste.

Figura 3 - Imagens do laboratório e equipamentos utilizados no ensaio de difusividade térmica realizado no CEPEL



Fonte: autor (2022).

2.4 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A confecção dos corpos de prova para os ensaios de compressão foi realizada conforme NBR 5738 e os testes foram realizados de acordo com a norma ASTM C39 / C39M-21, no laboratório de ensaios mecânicos da Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica da UFF em Volta Redonda. O equipamento para realizar os ensaios foi o EMIC modelo DL 60000 com capacidade máxima de 600kN. Os corpos de provas foram fixados e alinhados, no eixo com o centro de aplicação da carga a uma taxa de aproximadamente 0,6 MPa/s até que nenhuma carga adicional possa ser carregada pelo corpo de prova e ocorre a falha, Cellat *et al.* (2015). As figuras 4 e 5 mostram o ensaio.

Figura 4 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: autor (2022).

Figura 5 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: autor (2022).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

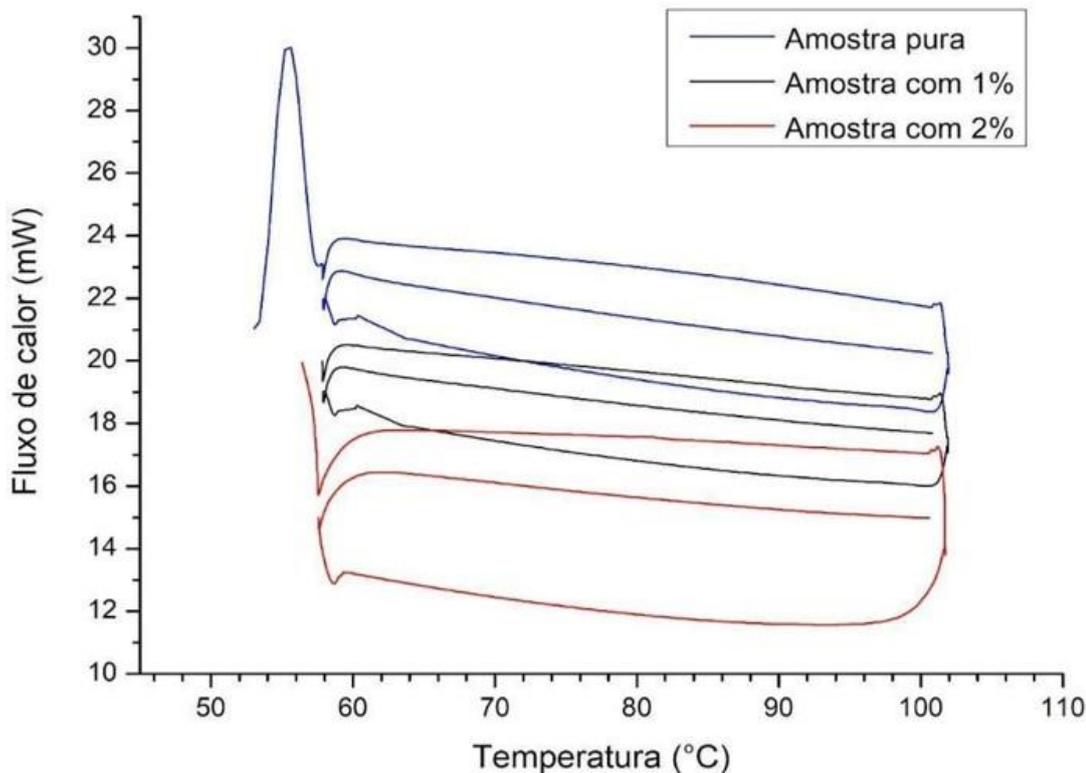
A seguir serão apresentados os resultados e análise dos ensaios e testes realizados neste trabalho.



3.1 CALORIMETRIA EXPLORATÓRIA DIFERENCIAL (DSC - DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETERS)

Nesta análise é interessante observar que por não ser um ensaio típico para material cerâmico, a curva apresenta uma aparência diferente das obtidas em materiais utilizados frequentemente em DSC. Nas amostras com o aditivo houve um menor fluxo de calor como mostra a Figura 6, e, portanto, haverá maior tempo de conservação do calor no aquecedor. O cimento Portland endurecido, além de ser formado por silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio e sulfoaluminato de cálcio hidratado, possui em sua composição grande quantidade de água livre e água capilar, além de água adsorvida Majora *et al.* (2003b), o que afeta tanto as propriedades térmicas quanto mecânicas do concreto durante o aquecimento, tanto em condições de superfície impermeáveis quanto permeáveis. Em condições impermeáveis, a água atua favorecendo as reações de hidratação, abaixo de 100°C, e as reações higrotérmicas, em elevadas temperaturas. Em condições permeáveis, a perda da água evaporável influencia a retratação, a perda de resistência, a condutividade e as expansões térmicas. A perda da água quimicamente combinada, que ocorre acima de 100°C, influencia praticamente todas as propriedades do concreto (MAJORA *et al.*, 2003b).

Figura 6 - Comparação entre as curvas DSC dos três tipos de amostras

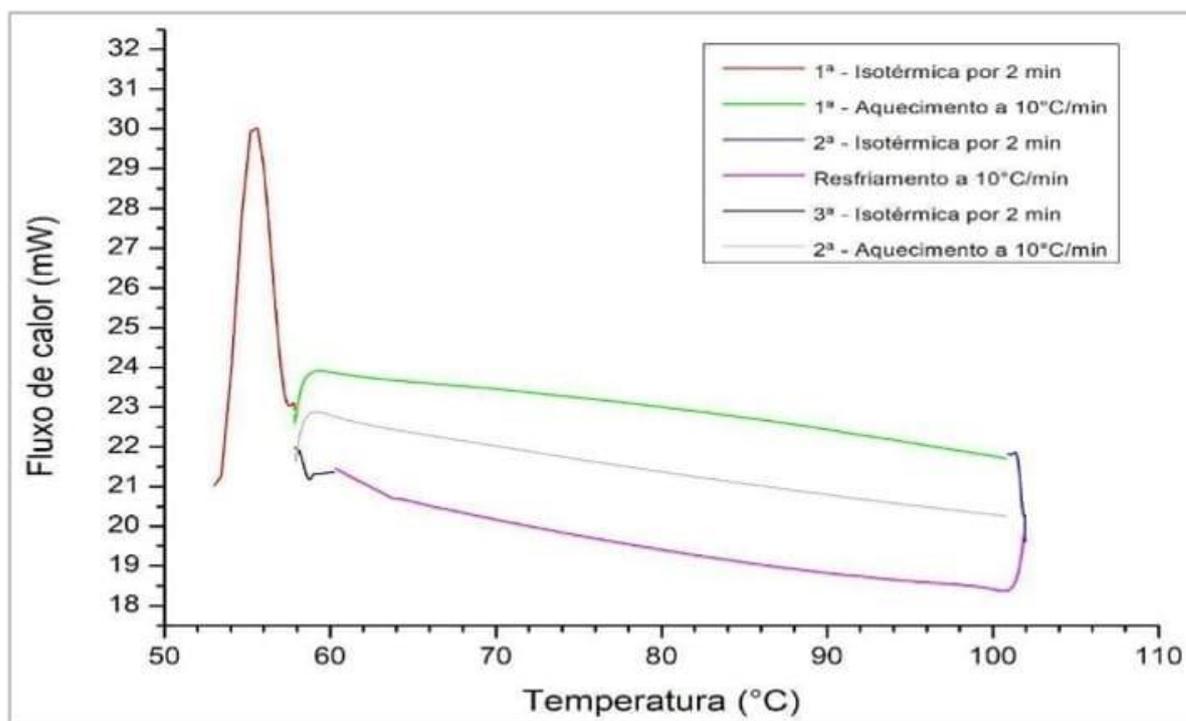


Fonte: autor (2022).

Na figura 7, sem aditivo, podemos observar que durante toda a curva isotérmica ocorreu uma reação de hidratação, liberando calor, por isso observamos um evento exotérmico com pico de fluxo de calor até 30 mW (HORTA *et al.*, 2022). Logo em seguida ocorre um processo de absorção de calor pela água presente, na faixa de 55°C a 60°C final da isotérmica e inicia da fase de aquecimento. Ainda no aquecimento até 100°C ocorre perda de água adsorvida e interlamelar, segundo Lima (2005), assim sendo a curva apresenta uma inclinação para baixo, visto que conforme perde água, também perde poder calorífico de armazenamento. No final do aquecimento, já na isotérmica a 100°C começa ocorrer um evento, exotérmico, de decomposição do silicato de cálcio hidratado, conforme Lima (2005), mas como a temperatura se mantém constante o evento que prevalece é a evaporação da água com consequente perda de calor e por seguinte ocorre o resfriamento até a próxima isotérmica. Entre as temperaturas de 60°C e 64°C há uma liberação de calor, ainda no resfriamento, e em

seguida na isotérmica ocorre a reidratação da cal livre (LIMA, 2005). A amostra é novamente aquecida e a curva de aquecimento tem o mesmo perfil da primeira, mas em uma faixa de fluxo de calor mais abaixo devido à perda de água da argamassa de cimento puro.

Figura 7 – Curva DSC com as fases do programa térmico da amostra pura



Fonte: autor (2022).

Quando comparamos os três tipos de amostras podemos observar os efeitos do aditivo no gráfico da curva com a amostra com um por cento, percebemos que não ocorre a reação de hidratação, visto que o aditivo oriundo do sebo bovino, que é composto por ácidos graxos, funciona como superplastificantes do tipo éter tardio policarboxílico (PCE) (CELLAT *et al.*, 2015). Os superplastificantes também são conhecidos como redutores de água, trabalham na redução da relação água cimento, melhoram a trabalhabilidade da mistura (BASTOS, 2016). Em sua cadeia existe um grupo funcional de carboxilato (COOH), o mesmo encontrado nos ácidos graxos na qual ocupa uma de suas extremidades de uma longa cadeia de hidrocarbonetos. Estes grupos funcionais têm como mecanismo a repulsão estérica, regularmente



propiciam uma melhor dispersão das partículas devido a atenuação de tensões superficiais da água de amassamento (RIBERO *et al.*, 2020). A existência destes aditivos que, ocasionam dispersão, tem o efeito de reduzir núcleos de floculação de compostos organizados exclusivamente no cimento e água (BASTOS, 2016). Sendo assim existe um retardo na hidratação do cimento devido à uma camada que se molda nos seus grãos impedindo contato direto com a água (BASTOS, 2016). Portanto, a amostra com um por cento tem menos quantidade de água na sua formação, o que se observa na sua curva do gráfico 2 devido a menor perda de água no aquecimento. Assim, a curva necessita de uma quantidade de calor menor para atingir as mesmas temperaturas em comparação a amostra pura, o que mostra que o material obteve uma melhora nas suas características térmicas.

Na curva do gráfico da amostra com dois por cento podemos observar um comportamento endotérmico, como encontrado por Jeong *et al.* (2013), quando submete amostras de ácidos graxos em análises térmicas, ocorre no aquecimento uma reação endotérmica quando o material aditivo se funde e no resfriamento a cristalização ocorre em uma temperatura menor do que a de fundição, no gráfico da amostra de dois por cento, gráfico 2, vemos o evento de fundição, o sebo bovino em seu estado puro tem seu ponto de fusão em torno de 48°C, segundo Varão *et al* (2017), logo ocorre de forma coerente o evento térmico, mas não percebemos a cristalização já que a amostra foi resfriada até 55°C, temperatura superior a possível cristalização. Também percebemos uma completa estabilização da curva plotada, que está mais paralela ao eixo das temperaturas, demonstrando pouquíssima capilaridade para água armazenada. Esta amostra apresenta uma melhora ainda melhor em comparação a amostra de um por cento, visto que precisa de um fluxo de calor menor para as mesmas temperaturas, como podemos ver no gráfico da figura 7.

Nas curvas de DSC é possível determinar a capacidade calorífica e específica, uma propriedade de grande importância para o estudo térmico de materiais. A capacidade calorífica, C , é expressa em unidades de J/K e demonstra a capacidade de um material para absorver energia em forma de calor de um ambiente no seu exterior, de forma geral representa a energia necessária para aumentar a temperatura do material em uma unidade. A capacidade calorífica específica, c , que representa a energia



necessária para aumentar uma unidade de temperatura quando se tem uma unidade de massa é relacionada ao aproveitamento da energia térmica em aquecimento. Resumindo, há uma mudança maior de temperatura no material quanto menor for os valores da capacidade térmica calorífica (SÁ,2017). O material, que é sujeito a um plano de temperatura linear, na análise de DSC, quando verificamos seu instantâneo percebemos que é proporcional ao fluxo de calor que é submetido a amostra e é dado pela equação (1):

$$\frac{dH}{dt} = \left(\frac{dT}{dt} \right) \cdot \left(\frac{dH}{dT} \right) \quad (1)$$

Na norma ISO 11357-4 os dados de fluxo de calor de dois materiais são comparados para obtenção da capacidade calorífica específica, onde um dos materiais é a amostra e outro material é um padrão, usados para calibração, com capacidade calorífica conhecida na qual usamos o zinco que tem estabilidade térmica até 210 °C e sua escolha é empírica, e ponto de fusão a 419,5°C conforme manual do equipamento (IONASHIRO, 2004; BERNAL *et al.* 2002). As curvas são obtidas com o mesmo perfil de análise, onde começa com uma isotérmica, depois uma rampa de aquecimento e termina com uma isotérmica. Para os cálculos as curvas são retificadas através de uma linha base gerada com cápsulas vazias no forno em ambos lugares da amostra e referência, com o mesmo programa de aquecimento, conforme ASTM-E1269-11.

Logo c_p da amostra pode ser calculado pela seguinte equação (2):

$$c_{p,amostra} = \left(\frac{m_{padrão}}{m_{amostra}} \right) \cdot \left(\frac{[\varphi_{amostra}(T) - \varphi_0(T)]}{[\varphi_{padrão}(T) - \varphi_0(T)]} \right) \cdot (c_{p,padrão}) \quad (2)$$

onde,

$c_{p,amostra}$ e $c_{p,padrão}$ – capacidade calorífica específica.

$m_{padrão}$ e $m_{amostra}$ – massa.

$\varphi_{amostra}(T)$, $\varphi_{padrão}(T)$ e $\varphi_0(T)$ – fluxo de calor da amostra, padrão e linha de base.



Na tabela 1 de resultado dos cálculos de capacidade calorífica, percebemos que ocorreu uma melhora com o aumento no percentual de aditivo, demonstrando que começam a ocorrer modificações nas características térmicas. A figura 8 apresenta o gráfico do Fluxo de calor por grama do grupo 1 em comparação com o padrão Zinco.

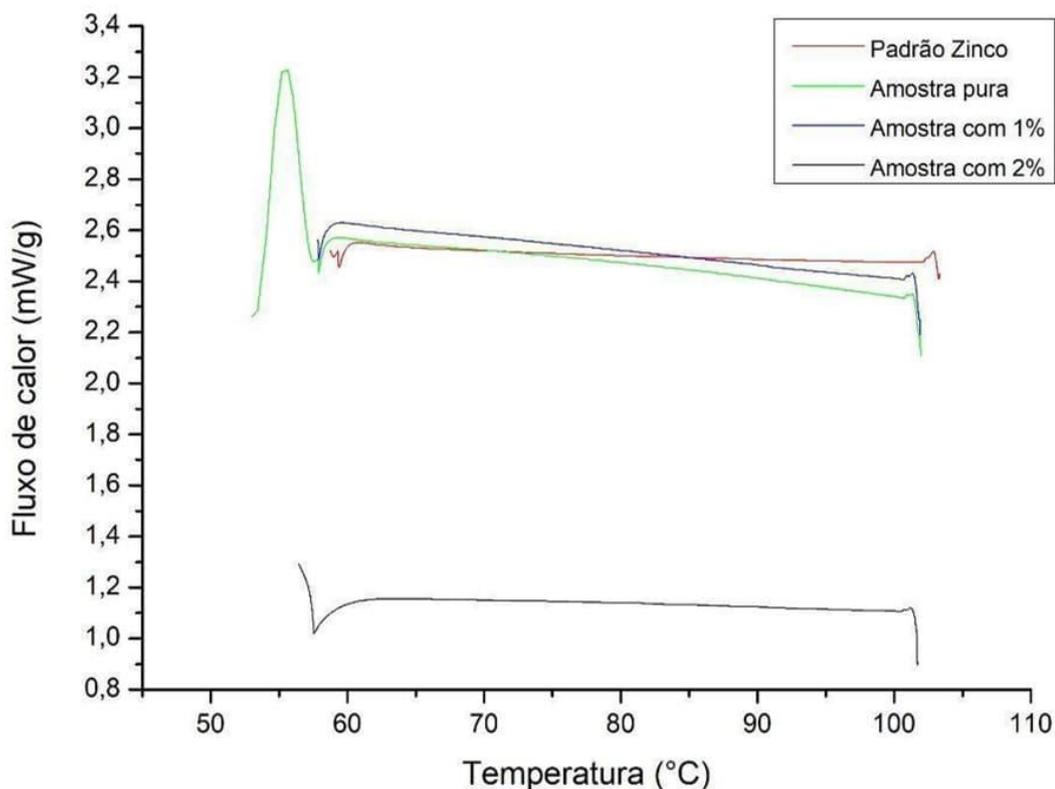
Tabela 1 - Capacidade calorífica calculada através da curva DSC de cada amostra dos dois grupos

Grupo 1	Zinco	Amostra pura	Amostra com 1%	Amostra com 2%
Temperatura (°C)	67	67	67	67
Fluxo de calor (mW)	19.90	20.18	11.25	23.55
Massa (mg)	7.90	7.80	8.30	10.50
Capacidade calorífica (J/g K)	0.385	0.809	0.929	1.104

Grupo 2	Zinco	Amostra pura	Amostra com 1%	Amostra com 2%
Temperatura (°C)	70	70	70	70
Fluxo de calor (mW)	19.90	24.75	23.55	22.75
Massa (mg)	7.90	15.40	9.30	8.50
Capacidade calorífica (J/g K)	0.385	0.876	1.248	1.217
Capacidade calorífica média (J/g K)		0.843	1.089	1.161

Fonte: autor (2022).

Figura 8 - Fluxo de calor por grama do grupo 1 em comparação com o padrão Zinco



Fonte: autor (2022).

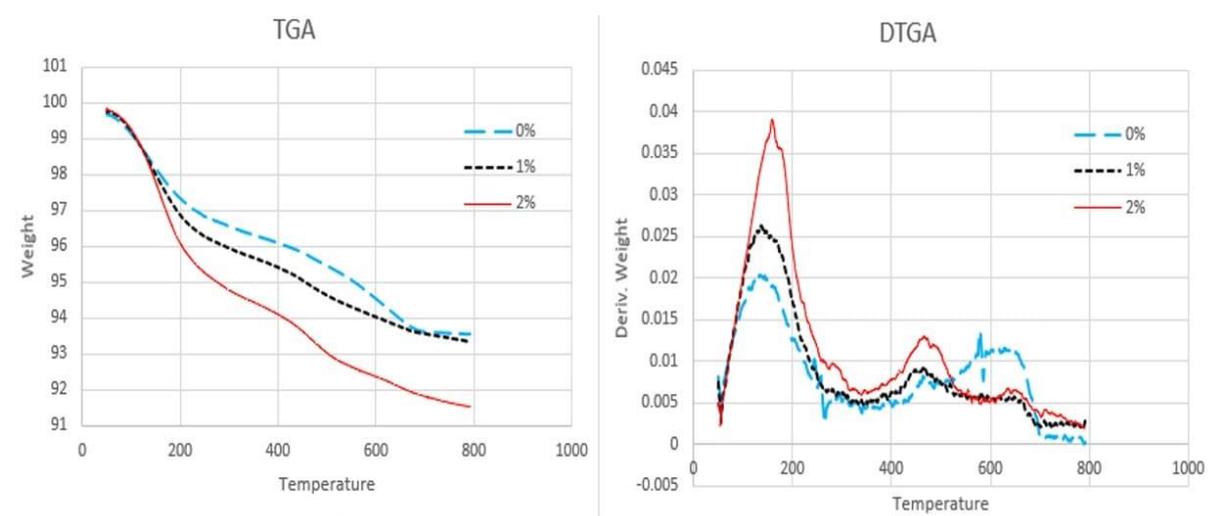
O gráfico da figura 8 faz uma análise do fluxo de calor por grama de cada amostra e também do padrão de Zinco, percebemos a melhora na capacidade térmica da amostra, além de comprovar graficamente a coerência dos cálculos da tabela 1, onde para o grupo 1, amostra pura e com um por cento são bem próximos seus valores de capacidade calorífica e a amostra com dois por cento tem redução em torno de 40 por cento.

3.2. ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA (TGA- *THERMOGRAVIMETRIC ANALYZERS*)

Esta análise foi realizada em faixas de temperatura de decomposição inicial do material. A faixa de temperatura da análise considerada foi de 25 a 800 graus Celsius, até essa temperatura máxima houve uma degradação de menos de 10% do material, com 1% de aditivo e amostra sem aditivo a perda de massa foi de menos de 6,5%

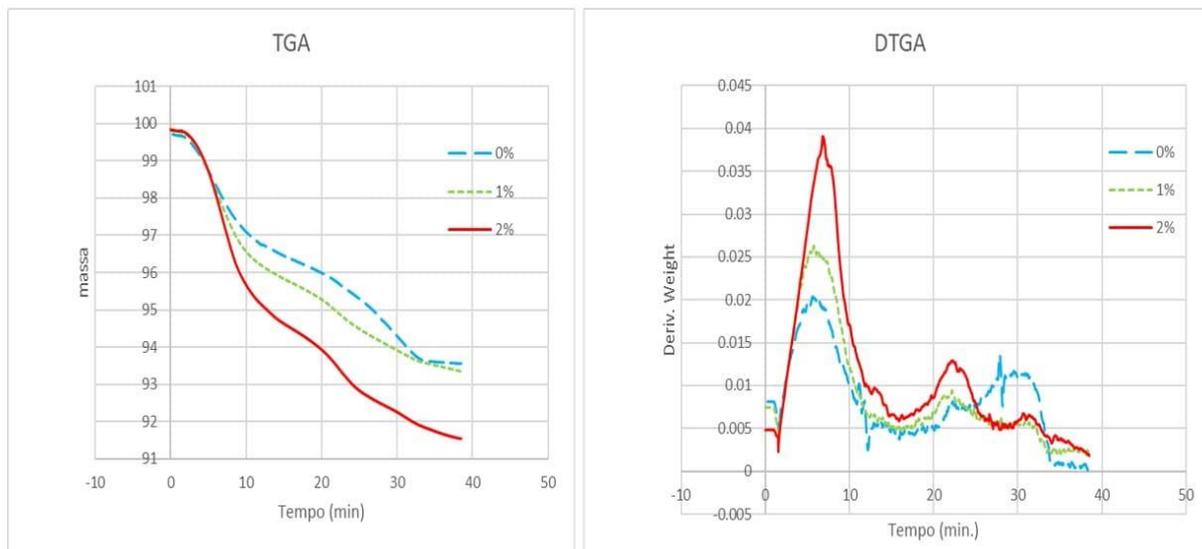
como se observa no gráfico das figuras 9 e 10, devido à característica refratária do material cerâmico. Mas foi possível observar que o material sofreu perda de massa devido à evaporação de água capilar com cerca de 100 graus, logo em seguida ocorreu o pico de decomposição do composto C-S-H, conforme Lima (2005). As diferenças entre os picos estão associadas ao aditivo com grandes cadeias de carbonos e grupos carboxílicos, conforme o aumento percentual maior o pico da curva. Acima de 374°C, dito por Lima (2005) não existe água livre. Outro pico de mudança ocorreu entre 400°C e 600°C que é a dissociação de C-S-H em CaO e água, nas amostras com aditivos este pico foi maior devido sua composição química, como já explicado. (LIMA, 2005). A partir desta temperatura observa-se que praticamente todo o aditivo foi volatilizado. Ainda na curva da amostra sem aditivo, em torno de 700°C a 720°C ocorre a decomposição do C-S-H em C2S e CS, conforme Lima (2005). Foi observado, como se esperava, uma maior degradação até 800 graus na amostra com 2% de PCM, onde verificamos nos gráficos 4 e 5 uma perda de quase 9%. Pelos resultados, confirmamos que na faixa de temperatura de uso do painel, que não vai ultrapassar 80°C não haverá alteração significativa, por degradação do material aditivado em função da temperatura.

Figura 9 - Comparação entre os gráficos TGA e DTGA do material sem aditivo, 0%, e com aditivo 1% e 2%, em função da temperatura



Fonte: autor (2022).

Figura 10 - Comparação entre os gráficos TGA e DTGA do material sem aditivo, 0%, e com aditivo 1% e 2%, em função do tempo



Fonte: autor (2022).

3.3 TESTE DE DIFUSIVIDADE TÉRMICA/CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A difusividade está relacionada com tempo e a área, enquanto a condutividade está relacionada com o fluxo de calor e a temperatura, mas as duas se relacionam e não independentes uma da outra, a equação (3) indica esta relação.

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_p} \quad (3)$$

A difusividade térmica α está em [mm²/s]; condutividade térmica κ em [W/mK]; densidade do material ρ em [g/mm³]; capacidade calorífica c_p [J/g K]. A tabela 2 apresenta os resultados do teste de difusividade térmica e os dados das amostras, e os resultados da condutividade térmica obtidos a partir da difusividade térmica. Como pode-se observar, foi maior na amostra sem PCM, mais uma vez confirmando o efeito do armazenamento do calor, mesmo essa diferença sendo pequena, já é uma importante informação visto o baixo custo do sebo bovino e o efeito cumulativo que



este armazenamento pode trazer, a quantidade de energia que poderá ser armazenada quando aumentamos o volume cumulativo devido às dimensões do equipamento. Utilizando os dados de difusividade, foi calculada a condutividade térmica, e como era de se esperar pela relação direta entre estes dois parâmetros, a condutividade térmica foi maior no concreto sem o PCM, indicando maior capacidade de perda de calor, e com isso o efeito positivo do PCM, no acúmulo de energia térmica. Já era esperado que a condutividade térmica diminuísse, pois PCMs de base biológica têm reduzida condutividade térmica, como também os PCMs orgânicos não biológicos (JEONG *et al.*, 2013).

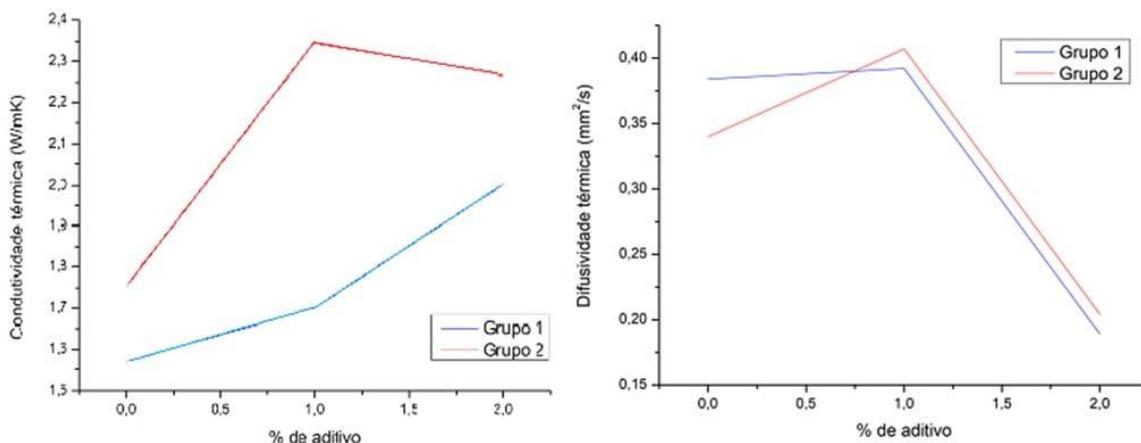
Tabela 2 - Dados, propriedades do ensaio de difusividade térmica e cálculo de condutividade térmica

Grupo de amostras	Propriedades	Unidades	Porcentagem de aditivo		
			0%	1%	2%
1	Massa	m [g]	1.40	1.10	1.20
	Altura	h [mm]	4.61	3.48	3.68
	Comprimento	l [mm]	12.0	13.10	13.20
	Largura	w [mm]	13.0	12.9	12.9
	Densidade	ρ [(g/mm ³)]	0.001931	0.001870	0.001915
	Capacidade calorífica	C _p [(J/g.K)]	0.809	0.929	1.104
	Difusividade (CEPEL)	α [(mm ² /s)]	1.005	0.979	0.947
	Condutividade térmica	κ [(W/m.K)]	1.570	1.701	2.002
2	Massa	m [g]	1.10	1.00	1.10
	Altura	h [mm]	3.88	3.47	3.73
	Comprimento	l [mm]	12.5	12.3	13.2
	Largura	w [mm]	12.2	12.8	12.8
	Densidade	ρ [(g/mm ³)]	0.001859	0.00183	0.001745
	Capacidade calorífica	C _p [(J/g.K)]	0.876	1.248	1.217
	Difusividade (CEPEL)	α [(mm ² /s)]	1.077	1.028	1.067
	Condutividade térmica	κ [(W/m.K)]	1.754	2.348	2.266

Fonte: autor (2022).

A figura 11 mostra a comparação de dois grupos de amostras para a condutividade e difusividade térmica.

Figura 11 - Comparação de dois grupos de amostras para a condutividade e difusividade térmica

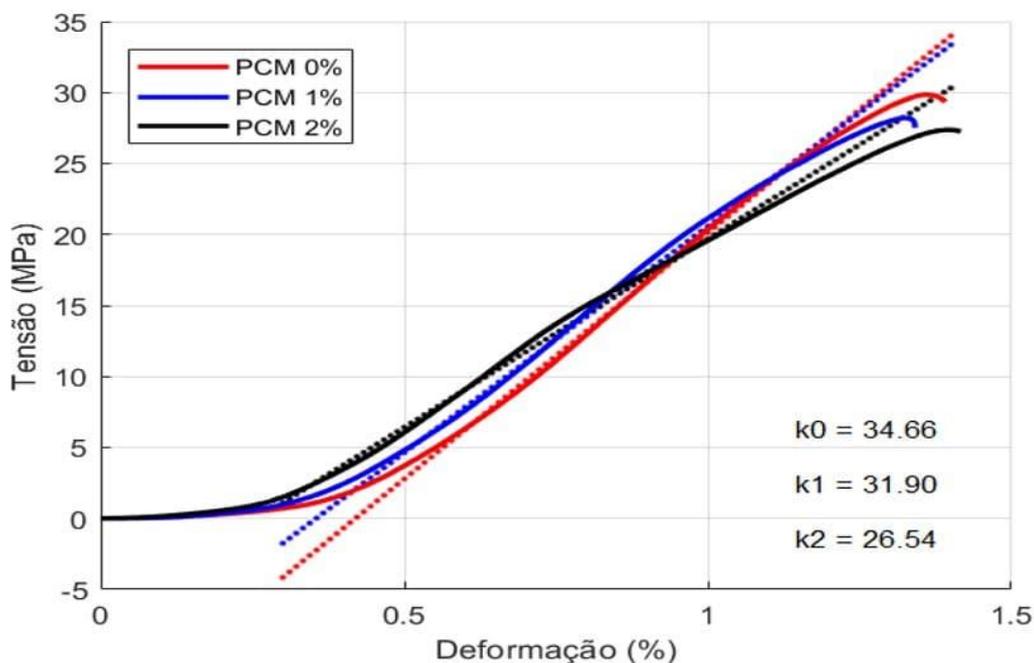


Fonte: autor (2022).

3.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO E ANÁLISE ESTRUTURAL

Objetivando analisar a resistência estrutural de um módulo do aquecedor solar foi realizada uma simulação aplicando um carregamento distribuído e calculando máximos esforços e deflexão máxima na placa utilizando o software de análise por elementos finitos COMSOL Multiphysics v4.4. O cálculo do módulo de elasticidade do material foi estimado com os resultados dos ensaios de compressão, aplicando o método dos mínimos quadrados para aproximar o módulo de elasticidade k às curvas dos ensaios. A Figura 12 mostra estes resultados, pode-se observar que com o aumento da adição do PCM houve uma tendência à redução da resistência à compressão, assim como também do módulo de elasticidade. A Tabela 3 apresenta de forma resumida os dados considerados para a análise estrutural.

Figura 12 - Curvas tensão versus deformação dos valores médios dos ensaios de compressão nos espécimes, (0%) vermelho, (1%) azul e (2%) preto, junto a estimativas do módulo de elasticidade k



Fonte: autor (2022).

Tabela 3 - Propriedades mecânicas obtidas a partir dos gráficos tensão x deformação

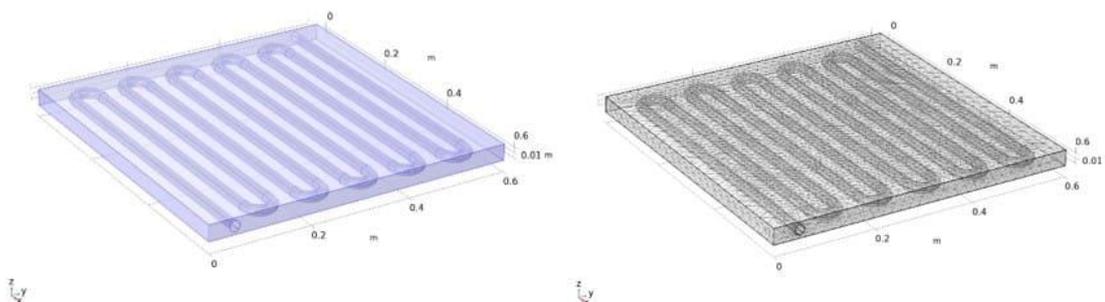
Propriedades	Porcentagem de aditivo (PCM)		
	0%	1%	2%
Limite de resistência (MPa)	29.84	28.21	27.37
Módulo de elasticidade (GPa)	34.66	31.90	26.54
Coefficiente de Poisson	0.2	0.2	0.2

Fonte: Autor (2022).

O módulo do painel destinado ao aquecedor está tem dimensões de (600mm x 600mm x 100mm) junto a um arranjo de serpentina para a passagem do cano de PVC como mostra a figura 12 a)

Logo, a simulação de um ensaio de flexão foi realizada considerando um carregamento de 500 [kg/m²] distribuídos como mostra a figura 14 a) considerando deslocamento nulo nas bordas. A malha, mostrada na Figura 12 b), possui 505136 nós e as simulações foram realizadas num PC com processador Intel(R) Core(TM) i9-10900 CPU @ 2.80GHz, 2801 Mhz, 16Gb de memória.

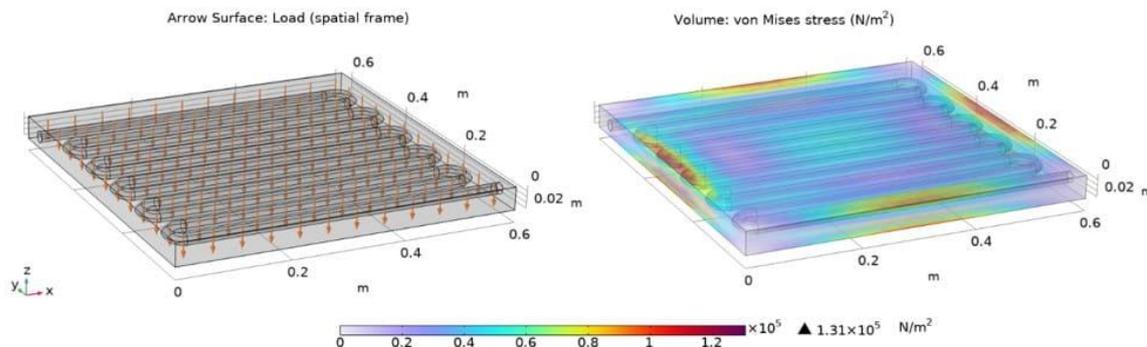
Figura 13 - a) Geometria do painel considerada 600x600x30 mm b) Malha da geometria para análise por elementos finitos (MEF) com 50513 nós



Fonte: Autor (2022).

Os resultados das simulações mostraram uma diminuição pequena da resistência à compressão com o aumento do aditivo, apresentando assim, uma queda nos valores do módulo de elasticidade como mostra a tabela 3. Este resultado leva a um aumento da flexão da linha central do módulo mas em comprometimento estrutural quando submetido a uma carga distribuída de compressão sobre sua superfície, como mostra a Figura 15 com as adições de aditivo. Já a distribuição de tensões de equivalente de Von Mises para o módulo de painel é apresentado na Figura 14 b) permanecendo dentro do limite de resistência do concreto de 27 GPa com valores máximos de 0.13 GPa. Portanto, o fator de segurança das placas é de $F_s = 208$, o que assegura resistência estrutural do mesmo para as condições consideradas.

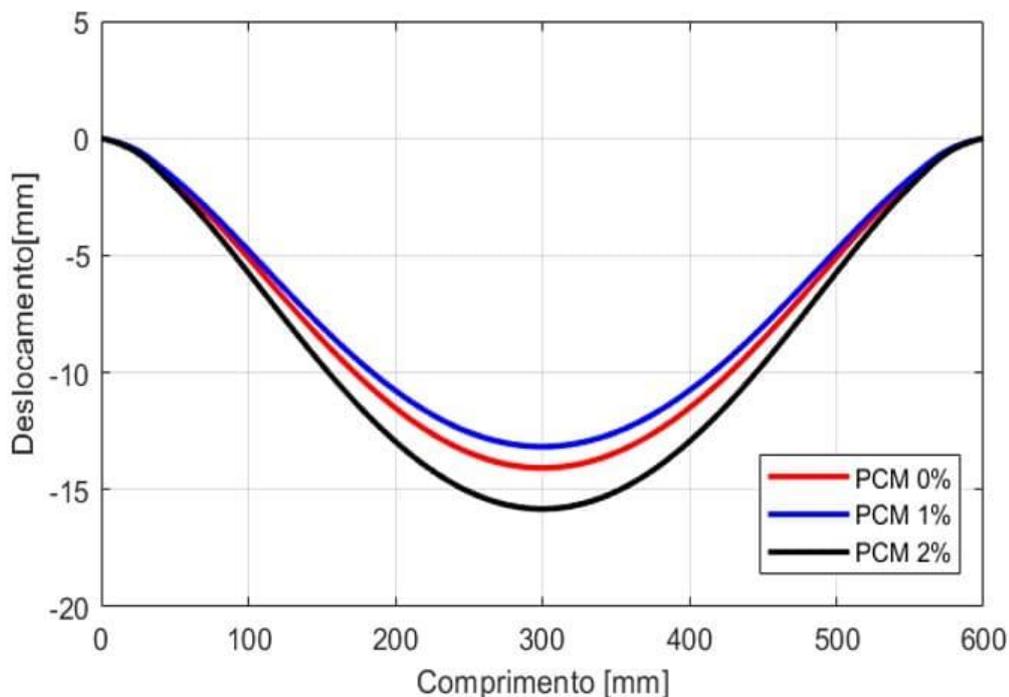
Figura 14 - a) Condições de contorno consideradas na análise numérica do painel b) Resultados das tensões equivalente de Mises para a carga considerada



Fonte: Autor (2022).

O valor pode ser um indicativo que a estrutura está superdimensionada. Conforme mostrado na Figura 15. Os deslocamentos máximos sofridos pela placa não superam os 15 mm pelo que sua função não estaria comprometida como mostra gráfico mesmo com o aumento de aditivo. Assim, desde o ponto de vista estrutural o aditivo não afeta em maior medida as propriedades mecânicas e para geometria considerada.

Figura 15 - Curvas de deformação na linha central do painel para diferentes concentrações de aditivo considerado, (0%) linha vermelha, (1%) linha azul e (2%) linha preta



Fonte: Autor (2022).

O objetivo de projetar uma placa apta a suportar uma carga importante, mas mantendo as propriedades térmicas é o objetivo deste trabalho. Para o futuro são recomendadas novas simulações para avaliação do comportamento de outros aspectos estruturais, assim como diferentes rearranjos da estrutura, objetivando a otimização. Esse estudo poderá indicar uma redução das tensões, diminuir a deflexão da placa.

4. CONCLUSÕES

Os resultados mostraram a melhoria na capacidade do concreto aditivado em reter o calor, propriedade relevante para a construção do painel para aquecimento de água. O concreto aditivado, à base de sebo bovino, constitui uma excelente opção, em termos de custo/benefício em virtude do baixo custo e fácil acesso a esses materiais.

No ensaio DSC pode-se observar que as curvas foram deslocadas para baixo com o aumento do percentual de aditivos e, portanto, a capacidade calorífica do material



aumentou. Assim, com dois por cento esta capacidade teve um salto de quase cinquenta por cento, demonstrando que o material aditivado apresenta uma melhora na capacidade de conservar a temperatura.

O TGA demonstrou que o material não apresenta considerável perda de massa, principalmente na faixa de temperatura de trabalho do aquecedor. Apenas houve pequenas perdas de massas em função principalmente da vaporização da água presente. As curvas apresentaram um perfil semelhante, apenas alteradas nos picos onde teve perdas de água capilar.

No teste de difusividade houve uma diminuição desta propriedade, assim como também na condutividade térmica. Com o aditivo o material adquiriu um perfil de acumulador de energia térmica.

Em relação aos ensaios de compressão e análise estrutural, o aditivo demonstrou que não afeta de forma significativa as propriedades mecânicas do material. Portanto, para geometria da placa estudada estes resultados mostram que as propriedades atendem às solicitações mecânicas a que placa poderá ser submetida em serviço.

Conclui-se também que o material aditivado com o PCM cumpre com as características desejadas para construção de um protótipo de painel para aquecimento de água de baixo custo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem ao programa de Pós-graduação de Ciência e Tecnologia em Materiais (PPGCTM) da UERJ, ao Professor Adjunto Rogério Itaborahy Tavares do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais, da EEIMVR da UFF em Volta Redonda, à Professora Ana Furtado, Luis Felipe Azeredo, Marina Barbosa do Laboratório de Caracterização Instrumental III do Instituto de Química da UERJ, ao Laboratório de Mecânica dos Sólidos da COPPE/UFRJ pela acesso a licença do COMSOL Multiphysics v4.4, ao Engenheiro Arthur de Castro Ribeiro do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) pela cooperação e à Faperj pelo apoio.



REFERÊNCIAS

ABNT NBR 5738. **Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**, 2015. Disponível em: <<http://www2.uesb.br/biblioteca/wp-content/uploads/2022/03/NBR-5738-CONCRETO-PROCEDIMENTO-PARA-MODELAGEM-E-CURA.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASTM - E1131-8. **Standard Test Method For Compositional Analysis By Thermogravimetry**, 2014. Disponível em: <10.1520/E1131-08>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASTM – C39/C39M-21. **Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens**, 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/c0039_c0039m-21.html>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASTM – E1269-11. **Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry**, 2018. Disponível em: <<https://www.astm.org/e1269-11r18.html>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ASTM – E794-06. **Standard Test Method for Melting And Crystallization Temperatures By Thermal Analysis**, 2018. Disponível em: <<https://www.astm.org/e0794-06r18.html>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BASTOS, Arthur Paulo Ozelame. **Análise da Influência de Aditivos Superplastificantes no Comportamento de Pastas de Cimento Portland com e sem Adição de Fíler Calcário**. 2016. TCC (Departamento de Engenharia Civil), UFRGS, [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/159631/001019348.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

BERNAL, Cláudia *et al.* Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, São Paulo, v. 25, n. 5, p. 849-855, set. 2002.

CELLAT, Kemal. *et al.* Thermal enhancement of concrete by adding bio-based fatty acids as phase change materials. **Energy and Buildings**, Turkey, 2015. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815300104>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

COSTA, Susana Pereira Lemos *et al.* **Armazenamento de energia térmica através de materiais de mudança de fase**. 162 p. Dissertação Mestrado - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2014.

CUNHA, Jose Pereira da; EAMES, Philip. Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials- A review. **Applied Energy**, v. 177, p. 227-238, 2016. Disponível em: <



<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261916306948>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

SILVA, Cláudio Homero Ferreira. **Alternativas energéticas: uma visão CEMIG**, 2012, Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG. Disponível em: <<https://www.solenerg.com.br/wp-content/uploads/2013/04/Alternativas-Energ%C3%A9ticas-Uma-Visao-Cemig.pdf>>. Acesso em: 26/10/2021.

DOUVI, Eleni *et al.* Phase change materials in solar domestic hot water systems: A review. **International Journal of Thermofluids**, [s. l.], ed. 10, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666202721000136?via%3Dihub>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

HORTA, Ricardo Augusto dos Santos *et al.* Avaliação do perfil térmico e calor de hidratação de pastas de cimento com adição de óxido de grafeno. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 27, ed. 3, 2022.

IONASHIRO, M. **Giolito: fundamentos da termogravimetria, análise térmica diferencial e calorimetria exploratória diferencial**. Araraquara, São Paulo: GIZ, p. 67-68, 2004.

ISO 11357-4:2021. **Plastics Differential scanning calorimetry (DSC), Part 4: Determination of specific heat capacity**, 2021. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/79998.html>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

JEONG, Su-Gwang *et al.* Improvement of the thermal properties of Bio-based PCM using exfoliated graphite nano platelets. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, Republic of Korea, v. 117, p. 87-92, 2013. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024813002596>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

KHALIFA, Abdul Jabbar N. *et al.* A storage domestic solar hot water system with a back layer of phase change material. **Experimental Thermal and Fluid Science**, [s. l.], v. 44, p. 174-181, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0894177712001707>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

LIMA, Rogério Cattelan Antochaves. **Investigação do comportamento de concretos em temperaturas elevadas**. 2005. DSc, UFRGS, 2005.

MAJORA, C. *et al.* Thermo-hydral behaviour (moisture). In: **Course on Effect of Heat on Concrete**, 2003, Udine, Itália: International Center for Mechanical Sciences, 2003b. 19p. Apostila.

RIBERO, André Valmir Saugo *et al.* Avaliação do desempenho de aditivos comerciais superplastificantes a base de policarboxilato nas propriedades mecânicas e



microestruturais de pastas de cimento Portland. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, ed. 4, 2020.

SÁ, Helena Isabel Oliveira. **Determinação da condutividade e difusividade térmica de materiais por análise de DSC**. 2017. Escola de Ciências, Universidade do Minho, [S. l.], 2017.

TRINDADE, Joana Isabel Cortez *et al.* **Projeto, construção e teste de um módulo de acumulação de energia térmica usando material de mudança de fase**. 2018. 172 p. Dissertação Mestrado - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, [S. l.], 2018. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/154836066.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

VARÃO, Leandro Henrique Ribeiro *et al.* Vantagens e limitações do sebo bovino enquanto matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. **Holos**, UFU, v. 07, 2017. Disponível em: <<https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/5010>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

ZHOU, D. *et al.* Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications. **Applied Energy**, [s. l.], v. 92, p. 593-605, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261911005216>>. Acesso em: 19 jun. 2023.

Enviado: 22 de março 2023.

Aprovado: 25 de abril, 2023.

¹ Graduação. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5047-6535>. Currículo Lattes: <https://lattes.cnpq.br/3555389717470259>.

² Orientadora. ORCID: 0000-0002-3974-5283.

³ Coorientador. ORCID: 0000-0002-5430-3475.