2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais
Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

ANÁLISE DO IMPACTO DE MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE NO CONFORTO TÉRMICO DE ESCOLA PÚBLICA ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL[1]

FILIPPINI, Lorenzo O. (1); SARTORI, Gabriela (2); DANILEVICZ, Ângela de M. F. (3); TORRES, Maurício C. A. (4)

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lofilippini1@gmail.com
(2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gabriela.sartori2@gmail.com
(3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, angelamfd@producao.ufrgs.br
(4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mauricio.torres@ufrgs.br

RESUMO

O Programa Proinfância do Governo Federal envolve a construção de um projeto padrão em escala nacional, o qual é aplicado a todas as oito zonas bioclimáticas descritas pela ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005). O uso de projetos padrão pode negligenciar aspectos relativos ao clima, prejudicando o desempenho térmico da edificação e reduzindo os níveis de conforto térmico. Materiais de mudança de fase (PCMs) têm potencial para alcançar, passivamente, melhores níveis de conforto térmico em edificações. Assim, o presente trabalho objetiva-se por avaliar o impacto de diferentes aplicações de distintos materiais de mudança de fase em um projeto padrão de uma pré-escola pública do Programa Proinfância, na zona bioclimática 3. Para isso, foram realizadas simulações computacionais considerando a histerese dos materiais, utilizando o programa EnergyPlus, e seus resultados analisados conforme o Modelo Adaptativo da ASHRAE 55. Verificou-se reduções de dias em condições de desconforto térmico ao longo de um ano de referência e melhora da temperatura operativa horária média nos dias típicos de verão e de inverno, evidenciando a capacidade dos materiais de mudança de fase em aumentar os níveis de conforto térmico dos usuários e, potencialmente, em reduzir o consumo energético com climatização.

Palavras-chave: *PCM. EnergyPlus. Conforto Térmico. Zoneamento Bioclimático.*

ABSTRACT

The Federal Government' Program Proinfância is based on the construction of a standardized design with a country-wide distribution. It is applied in all the eight different bioclimatic zones described by the ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Standardized designs can overlook some aspects concerning the local climate, harming the building's thermal performance, and reducing thermal comfort levels. When applied in buildings, Phase Change Materials (PCMs) show potential to increase thermal comfort in a passive way. This paper has the objective to evaluate the impact of the application of different types of PCMs within a standardized design of a public preschool from the Proinfância program, located in the bioclimatic zone 3. Computational simulations considering the hysteresis of the material were performed using the software EnergyPlus, and their results were analyzed according to the Adaptative Method from

[1] FILIPPINI, Lorenzo O.; SARTORI, Gabriela; TORRES, Maurício C. A.. Análise do Impacto de Materiais de Mudança de Fase no Conforto Térmico de Escola Pública através de Simulação Computacional. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais** [...] Porto Alegre: ANTAC, 2020.

ASHRAE 55. Reductions of days in thermal discomfort conditions were perceived during the reference year, besides, the improvement of the average hourly operative temperature during summer and winter design days, thus, showing the capacity from the PCMs to increase the thermal comfort levels and, potentially, decrease energy consumption when air conditioning the building.

***Keywords**: PCM. EnergyPlus. Thermal Comfort. Bioclimatic Zoning.*

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico de uma construção gera impactos humanos e ambientais notáveis, seja afetando drasticamente a produtividade, seja pela intensificação do uso de sistemas de climatização, aumentando o consumo de energia. O emprego de novas tecnologias de materiais construtivos para proporcionar conforto térmico em edificações é uma tendência na construção civil. PCMs (*Phase Change Materials*) ou Materiais de Mudança de Fase, são materiais que têm a capacidade de mudarem de estado físico em uma ampla faixa de temperaturas. Recentemente vêm sendo estudados e testados a fim de alcançar melhores níveis de desempenho térmico e também, potencialmente, reduzir o consumo energético de sistemas de climatização artificial, como evidenciado por Pons (2017).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da aplicação de diferentes PCMs no Projeto Padrão Tipo 2 de pré-escola do Programa Proinfância nos níveis de conforto térmico através de simulação computacional em uma zona bioclimática brasileira.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Materiais de mudança de fase podem derreter e solidificar em uma ampla faixa de temperaturas. No momento específico da mudança de fase, este material funciona como um armazenador de energia térmica por meio de calor latente, visto que não haverá mudança de temperatura ao longo dele, mas um aumento de sua entalpia. Os PCMs são divididos em 3 grandes grupos, de acordo com Paroutoglou et al. (2019): orgânicos, inorgânicos e eutéticos. A aplicação do PCM na construção civil varia conforme tipo de encapsulamento do material, que pode ser macroencapsulado, como uma placa ou tubo, ou micro ou nanoencapsulado, onde o PCM é adicionado a outro material que faz parte da edificação, por meio de pulverização (MAGENDRAN et al., 2019). O funcionamento de um PCM se dá por ciclos de derretimento e solidificação, constituindo a histerese[2] do material. Este é um fenômeno de extrema importância na performance energética e na própria durabilidade do material. Segundo Al-Janabi e Kavgic (2019), o software *EnergyPlus* é uma das poucas ferramentas de simulação de edificações capazes de modelar PCM.

Sartori (2019) realizou um estudo de desempenho e conforto térmico no Projeto Padrão Tipo 2 do Programa Proinfância para todas as 8 zonas bioclimáticas brasileiras através de simulações no software *EnergyPlus* e usando o Método Adaptativo da ASHRAE 55 (2013). Segundo a autora, o projeto padrão está mais adaptado, em termos de conforto térmico, às zonas de temperaturas mais elevadas.

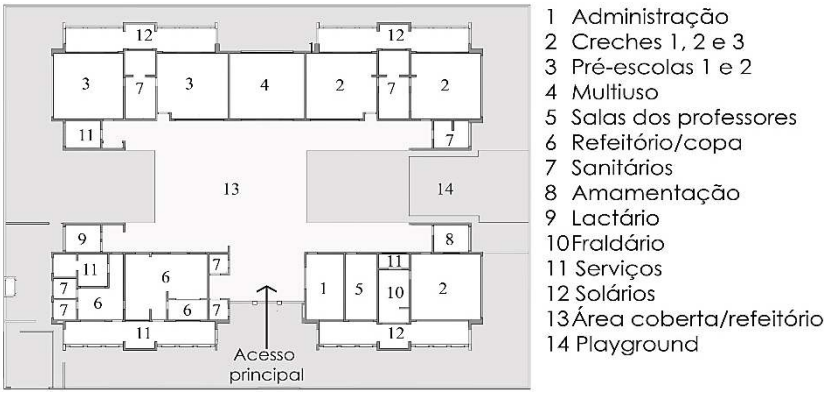
[2] A histerese de um material é um fenômeno físico que constitui no retorno deste material a um estado inicial, de forma espontânea, após um determinado estímulo que o levou a outro estado, desenvolvendo um ciclo de estados, conforme frequência de atuação do estímulo.

Pons (2017) realizou uma pesquisa avaliando a aplicação de PCM macroencapsulado nas zonas bioclimáticas brasileiras, com variações de espessura, alocando-o em uma sala comercial modelo, em apenas uma parede voltada para o norte e considerando todas as outras – teto, piso e paredes adjacentes – adiabáticas. O material em questão se tratava de um PCM de origem orgânica, com temperatura de fusão de 26,5°C. Seu estudo tinha o objetivo de avaliar a possível economia de energia gerada com o sistema de climatização da sala através de simulações no software *EnergyPlus*, e obteve os melhores resultados em Curitiba, na zona bioclimática 1.

3 MÉTODO

O presente trabalho tem origem no estudo realizado por Sartori (2019), que analisou o impacto da orientação solar no conforto térmico do Projeto Padrão Tipo 2 de pré-escola do Programa Proinfância nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras, através de simulações computacionais. O modelo térmico tridimensional utilizado neste estudo é o mesmo modelo desenvolvido pela referida autora. O modelo foi construído no software *SketchUp Make 2017*, com *plug-ins* do software *OpenStudio*, versão 2.9.1. Todos as especificações de dimensões, materiais e elementos contidas no projeto arquitetônico da edificação foram observadas. Para calcular as propriedades térmicas dos elementos construtivos da edificação a autora utilizou métodos contidos na norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005) e dados do projeto padrão, obtidos através do Memorial Descritivo disponibilizado pelo Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (2013). De acordo com o FNDE, o Projeto Padrão Tipo 2 possui 775,85 m², distribuídos em um único pavimento, com capacidade máxima de 188 crianças (Figura 1).

Figura 1 – Planta baixa do Projeto Padrão Tipo 2



Fonte: Os autores

A versão 9.3.0 do software *EnergyPlus* foi utilizada para realizar as simulações térmicas dos vários cenários de instalação e características dos PCMs em Porto Alegre, cidade representativa da zona bioclimática (ZB) 3. O Modelo Adaptativo da ASHRAE 55 (2013) foi utilizado como método de classificação dos níveis de conforto obtidos, para fins comparativos entre os modelos simulados com PCMs e o projeto original da escola.

3.1 Seleção dos PCMs

Baseado nas estratégias sugeridas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005) para a zona bioclimática 3, o aumento de massa térmica das superfícies pode ser uma solução

passiva para o conforto térmico, tanto no inverno como no verão. Nesse sentido, o uso de PCMs pode ser benéfico, por aumentar naturalmente a inércia térmica enquanto sólido, sendo uma camada extra de parede e, durante a mudança de fase, absorver calor sem alterar a temperatura. A partir dos dados do INMET, para a cidade de Porto Alegre, observa-se que, no período de verão dos anos 2018 e 2019 (20 de dezembro de 2018 a 20 de março de 2019) a temperatura média neste período variou de 19,65 °C a 32,45 °C. Esses valores foram selecionados como condicionantes na escolha dos PCMs. Também foram contemplados aspectos como: calor latente, capacidade térmica, toxicidade e estabilidade química, densidade e condutividade térmica, características evidenciadas por Akeiber et al. (2016) e Magendran et al. (2019). Em virtude da aplicação micro ou nanoencapsulada alterar as propriedades do material no qual o PCM é aplicado, optou-se pela escolha do macroencapsulamento pela preservação das propriedades e a consolidação das mesmas segundo os fabricantes. Após pesquisa na literatura, considerando os critérios citados acima e comparando os trabalhos de Veerakumar e Sreekumar (2016), Cui et al. (2017), Al-Janabi e Kavgic (2019) e Weinläder, Beck e Fricke (2005), foram escolhidos os seguintes PCMs (Tabela 1):

Tabela 1 – PCMs selecionados e propriedades

PCM	Tipo	Temperatura de Fusão	Fonte de dados
PureTemp23	Orgânico	23°C	PureTemp (2014)
RT25HC	Orgânico	25°C	RubiTherm (2020)
S27	Inorgânico	27°C	Weinläder, Beck e Fricke (2005) e PCMProducts (2018)

Fonte: Os autores

3.2 Definição dos Parâmetros de Simulação

3.2.1 Cargas térmicas, ventilação natural e materiais

A configuração dos horários se baseou no período de funcionamento da pré-escola durante um ano letivo: segunda-feira a sexta-feira, das 7h às 18h. As cargas térmicas provenientes de iluminação e equipamentos elétricos foram estabelecidas de acordo com o projeto elétrico do projeto padrão fornecidas pelo FNDE (2013). Todas as dependências foram modeladas, totalizando 24 zonas térmicas (ZTs). Para as simulações, foram utilizados arquivos climáticos desenvolvidos com dados obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), para a cidade de Porto Alegre.

A ventilação natural foi configurada através da ferramenta *Airflow Network* e o controle de aberturas adotado foi o *ASHRAE55Adptative* (ASHRAE, 2013). Através de uma *schedule*, que possibilita a abertura ou fechamento das janelas toda a vez que a temperatura interna ultrapassar o limite de conforto térmico, sempre que a temperatura externa não for maior que este limite e não esteja chovendo.

Os materiais que compõe as paredes externas e a cobertura estão listados no quadro abaixo (Quadro 1), que agrega resultados calculados por Sartori (2019) e dados originais do Memorial Descritivo disponibilizado pelo FNDE (2013). A ordem de listagem apresentada é do exterior para o interior da edificação. Esses sistemas construtivos são destacados pois são os locais de aplicação de PCM escolhidos, detalhados no item 3.2.2.

Quadro 1 – Descrição de materiais das paredes externas e forro

Parede Externa		Cobertura	
Material	**Espessura (m)**	**Material**	**Espessura (m)**
Argamassa externa	0,03	Aço	0,005
Cerâmica tijolo	0,0249	Espuma rígida de Poliisocianurato	0,03
Câmara ar tijolo	0,09	Aço	0,005
Cerâmica tijolo	0,0249	Câmara de ar	0,045
Argamassa interna	0,03	Gesso	0,016

Fonte: Os autores

3.2.2 PCM

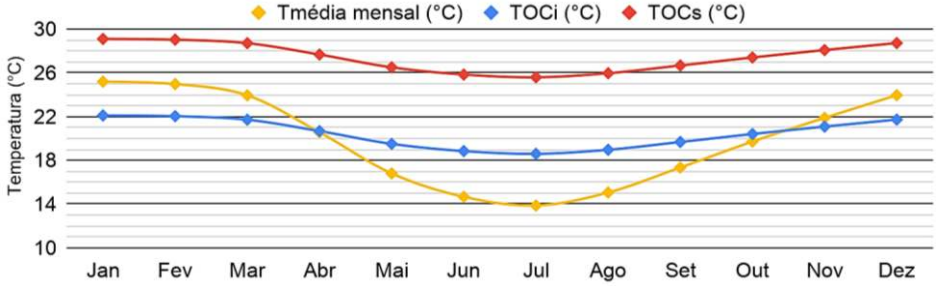
Para a simulação de cada PCM, fez-se uso do método da histerese do material, conforme comentado anteriormente. O *EnergyPlus* apresenta um objeto configurável para histerese de PCM que requer propriedades dos estados sólido e líquido do material, sendo necessário que os fabricantes forneçam tais informações. No caso do PCM S27, o catálogo fornecido não está completo e os dados exigidos para a simulação foram complementados pelo trabalho de Weinläder, Beck e Fricke (2005), que mediram tais propriedades. Para a utilização deste método, o *EnergyPlus* exige configurações mais específicas. No objeto *HeatBalanceAlgorithm*, onde determina-se o algoritmo global de transferência de calor, deve ser selecionado o algoritmo *CondFD* (Condução por Diferenças Finitas). Este algoritmo ainda necessita a seleção de uma constante de discretização do espaço, para alterar a quantidade de nós por material (consequentemente o tamanho do elemento), além da quantidade de cálculos por hora (*timesteps*). Foram selecionados os valores de 0,3 para a constante e 60 cálculos por hora, de acordo com Tabares-Velasco, Christensen e Bianchi (2012).

Os PCMs foram simulados com espessuras de 2,5 e 5 cm, variando também o elemento de aplicação do material: paredes externas e cobertura - seguindo a ordem do Quadro 1 - anterior à argamassa interna e acima do forro de gesso.

3.3 Referências de Conforto Térmico

Na escola, as zonas de permanência prolongada são: a administração, as creches 1, 2 e 3 e as pré-escolas 1 e 2, conforme Sartori (2019). Para a etapa de referências de conforto térmico, utilizou-se o Modelo Adaptativo da ASHRAE 55 (2013), que determina padrões de conforto térmico para ambientes naturalmente ventilados. O modelo baseia-se na aceitação de conforto para 80% dos ocupantes entre 2 limites de temperatura operativa. Para a cidade de Porto Alegre, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 2, onde T_{OCi} e T_{OCs} representam as temperaturas limite: a temperatura operativa inferior e a temperatura operativa superior, respectivamente:

Figura 2 – Temperaturas Mensais Médias e Limitantes para Conforto Térmico



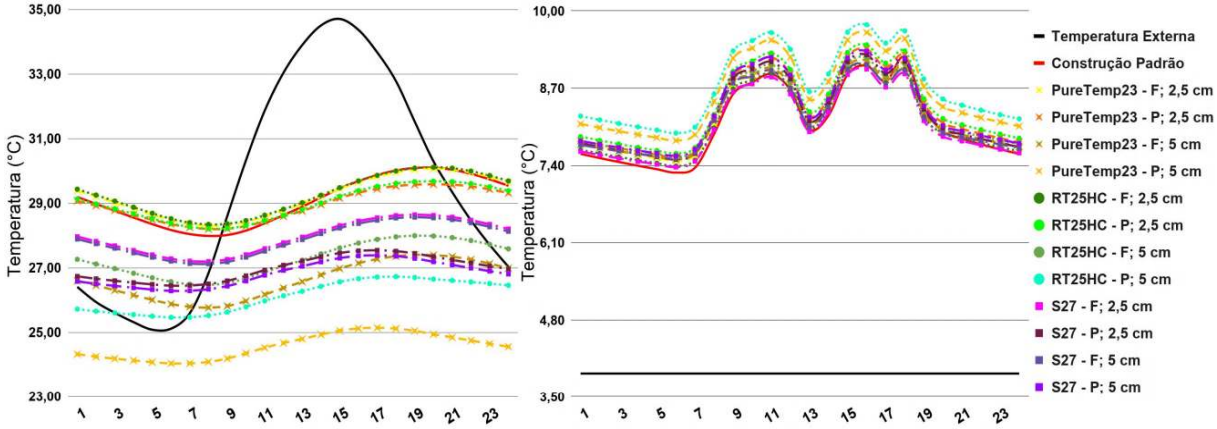
Fonte: Adaptado de Sartori (2019)

Foram desenvolvidas comparações horárias nos dias típicos da temperatura operativa média da edificação e comparações percentuais dos resultados das simulações com e sem PCM, avaliando a quantidade absoluta de dias em desconforto térmico nas zonas de permanência prolongada. O funcionamento dos PCMs envolve os ciclos de fusão e solidificação. Os ciclos de histerese são processos transientes de efeitos cumulativos, e a quantidade limitada desses ciclos pode ser melhor controlada se os dados e resultados forem apresentados diariamente.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

A Figura 3, abaixo, apresenta a variação horária da temperatura operativa média de toda a edificação, medida nos dias típicos de verão (esquerda) e inverno (direita), evidenciando, de maneira precisa, como cada PCM impacta nesta medida.

Figura 3 – Variação horária da temperatura operativa média da edificação e da temperatura externa em um dia típico de verão (esquerda) e um dia típico de inverno (direita)

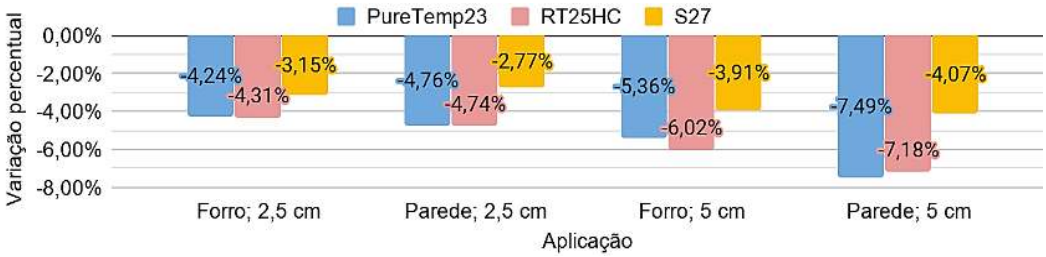


Fonte: Os autores

No gráfico da esquerda, percebe-se a redução na temperatura operativa média da edificação provocada pelos PCMs, destacando o PureTemp23 aplicado na parede, com 5 cm de espessura, apresentando uma redução média de 4,49°C. No dia de inverno, o PCM que se destaca é o RT25HC, com as mesmas características de aplicação do material destacado no dia de verão. Nesse caso, o aumento médio de temperatura, em relação à construção sem PCM, foi de 0,63°C.

A Figura 4 apresenta um gráfico contendo o efeito de cada PCM durante todo o ano de referência somente nas zonas térmicas de permanência prolongada: administração, creches 1, 2 e 3 e pré-escolas 1 e 2. Nota-se maior efeito dos PCMs PureTemp23 e RT25HC nessas zonas, ambos localizados no interior das paredes externas e com 5 cm de espessura. A diferença entre as variações é de 0,31 pontos percentuais. A maior variação ocorre na simulação com o PCM PureTemp23, de 7,49% de redução na quantidade de dias em condições de desconforto térmico.

Figura 4 – Variação percentual média anual da quantidade de dias em condições de desconforto térmico entre a construção original e o projeto com PCM, nas zonas térmicas de permanência prolongada



Fonte: Os autores

Os efeitos dos PCMs são, principalmente, percebidos na redução de desconforto térmico por calor. Nos meses de inverno, as reduções percentuais são menos significativas do que nos meses de verão. Novamente, em consonância com Sartori (2019), as discrepâncias do desempenho térmico do Projeto Padrão Tipo 2 estar mais adequado às zonas com temperaturas elevadas, mantiveram-se nesse estudo. A possível solução para isso seria a aplicação simultânea do PCM nas paredes e no forro, aumentando, assim, a capacidade térmica dos sistemas construtivos com maior impacto na carga térmica das ZTs durante todo o ano.

5 CONCLUSÕES

Foram realizadas simulações térmicas paramétricas de 3 tipos de PCMs aplicados ao Projeto Padrão Tipo 2 de pré-escola do Programa Proinfância para avaliar seus impactos no conforto térmico. Baseando-se no Modelo Adaptativo da ASHRAE 55 (2013), verificou-se menos dias em condições de desconforto térmico por calor nos casos em que o material é aplicado com espessura de 5 cm nas paredes externas. O fato de a edificação contar com mais área de paredes externas que de forro pode explicar esses resultados. Ainda nessas condições de aplicação, os PCMs que obtiveram melhores resultados para a ZB 3 foram aqueles com pontos de fusão de 23°C (PureTemp23) e 25°C (RT25HC). Os PCMs simulados demonstraram potencial para aumentar o nível de conforto térmico em edificações não climatizadas na zona bioclimática 3, indicando que também poderiam contribuir na redução do consumo de energia em edificações climatizadas. A efetiva instalação de um desses PCMs na pré-escola estudada dependeria ainda de uma análise de viabilidade econômica. Por fim, sugere-se a análise da aplicação desses PCMs na tipologia estudada nas demais zonas bioclimáticas brasileiras, com e sem climatização artificial, a fim de avaliar o potencial de uso desses materiais em todo o território nacional. O estudo com PCMs de temperatura de derretimento menores dos que os selecionados no presente trabalho, direcionados à aplicação em zonas térmicas de menores temperaturas, também deve ser considerado.

REFERÊNCIAS

AKEIBER, Hussein et al. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 60, p.1470-1497, jul. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.036.

AL-JANABI, Ali; KAVGIC, Miroslava. Application and sensitivity analysis of the phase change material hysteresis method in EnergyPlus: A case study. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 162, p.1-19, nov. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114222.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS - ASHRAE. **ANSI/ASHRAE 55**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **ABNT. NBR 15220-2**: Desempenho Térmico de Edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 15220-3:** Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005c.

BRASIL. Ministério da Educação. **Memorial Descritivo**. Projeto Proinfância Tipo 2. Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação – FNDE. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.fnde.gov.br/programas/proinfancia/areas-para-gestores/manuais>. Acesso em: 28/02/2020.

CUI, Yaping et al. A review on phase change material application in building. **Advances In Mechanical Engineering**, [s.l.], v. 9, n. 6, p.1-15, jun. 2017. SAGE Publications. http://dx.doi.org/10.1177/1687814017700828.

MAGENDRAN, Suhanyaa S. et al. Synthesis of organic phase change materials (PCM) for energy storage applications: A review. **Nano-structures & Nano-objects**, [s.l.], v. 20, p.1-18, out. 2019. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoso.2019.100399.

PAROUTOGLOU, Evdoxia et al. A PCM based cooling system for office buildings: a state of the art review. **E3s Web Of Conferences**, [s.l.], v. 111, p.1-8, 2019. EDP Sciences. http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/201911101026.

PCMPRODUCTS. **PlusICE Hydrated Salt (S) Range**. 2018. Disponível em: http://www.pcmproducts.net/files/S%20range-2018.pdf. Acesso em: 16 mar. 2020.

PONS, VinÍcius. **ESTUDO DO POTENCIAL DOS MATERIAIS COM MUDANÇA DE FASE PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA MANUTENÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO.** 2017. 112 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

PURETEMP. **PURETEMP 23 TECHNICAL DATA SHEET**. 2014. Disponível em: https://www.puretemp.com/stories/puretemp-23-tds. Acesso em: 15 mar. 2020.

RUBITHERM. **Data sheet**. 2020. Disponível em: https://www.rubitherm.eu/media/products/datasheets/Techdata_-RT25HC_EN_15012020.PDF. Acesso em: 15 mar. 2020.

SARTORI, Gabriela. **AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA ORIENTAÇÃO SOLAR NO CONFORTO E DESEMPENHO TÉRMICO DE PROJETO PADRÃO DE PRÉ-ESCOLA DO PROGRAMA PROINFÂNCIA NAS ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

TABARES-VELASCO, Paulo Cesar; CHRISTENSEN, Craig; BIANCHI, Marcus. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building And Environment**, [s.l.], v. 54, p. 186-196, ago. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.02.019.

VEERAKUMAR, C.; SREEKUMAR, A.. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications – A review. **International Journal Of Refrigeration**, [s.l.], v. 67, p.271-289, jul. 2016. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2015.12.005.

WEINLÄDER, Helmut; BECK, Andreas; FRICKE, Jochen. PCM-facade-panel for daylighting and room heating. **Solar Energy**, [s.l.], v. 78, n. 2, p. 177-186, fev. 2005. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2004.04.013