

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
MATERIAIS DE TROCA DE FASE EM EDIFICAÇÕES

por

Augusto Majolo

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2015



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉRMICO DE
MATERIAIS DE TROCA DE FASE EM EDIFICAÇÕES

por

Augusto Majolo

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Paulo Smith Schneider

Prof. Thamy Cristina Hayashi

Porto Alegre, 17 de novembro de 2015.

Ao professor Beyer, pelo humor e disposição.
Ao Eduardo e ao Rafael, pela camaradagem.
Ao Maurício, pelo timbre; à Jéssica, pela sintonia.
À Judite, pelas xícaras; ao Régis, pelas cuias; e à Gdza, pelas xizzas.

MAJOLO, A. **Avaliação do desempenho térmico de materiais de troca de fase em edificações**. 2015. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

Investiga-se o desempenho de materiais de troca de fase (PCMs) na melhoria do conforto térmico de edificações multipiso em Porto Alegre. Seguiram-se procedimentos da ABNT 2013 e da ASHRAE 2004. Realizaram-se simulações numéricas em software EnergyPlus 8.1. Com os resultados, avaliou-se a quantidade de horas de desconforto térmico apresentadas pelo modelo. O uso de PCMs nas paredes e forros externo de edifícios tem condições de melhorar o conforto térmico em construções em Porto Alegre, mesmo que possa produzir resultados contraditórios frente à ABNT NBR 15575. Foi possível reduzir em 50% a quantidade de horas de desconforto térmico de calor e em 9% a quantidade de horas de desconforto térmico de frio. Outros estudos são necessários para avaliar com maior precisão o efeito dos PCMs em ambientes brasileiros, principalmente considerando a presença de fontes de calor internas.

PALAVRAS-CHAVE: Materiais de troca de fase, conforto térmico, edificações.

MAJOLO, A. **Evaluation of the thermal performance of phase-change materials in edifications**. 2015. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The performance of phase-change materials (PCMs) on the improvement of thermal comfort of edifications in Porto Alegre was investigated. Procedures from ABNT 2013 and from ASHRAE 2004 were followed. Numerical simulations on EnergyPlus 8.1 were performed. With the results, the quantity of hours of thermal discomfort showed by the virtual model were evaluated. The incorporation of PCMs on the external walls and roofs showed conditions of improving the thermal comfort of buildings in Porto Alegre, even though it may produce contradictory results regarding ABNT NBR 15575. It was possible to reduce by 50% the amount of hours of heat discomfort and by 9% the amount of hours of cold discomfort. Further studies are necessary to evaluate with greater precision the effect of PCMs in Brazilian ambients, especially modeling the presence of internal sources of heat.

KEYWORDS: Phase-change materials, thermal comfort, edifications.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
5. METODOLOGIA.....	4
5.1 Normatização e critérios de avaliação	4
5.2 EnergyPlus.....	6
5.3 Modelo	6
5.4 Simulações	9
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	10
7. CONCLUSÕES	14
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
9. APÊNDICES.....	16
9.1 APÊNDICE I: Propriedades do PCM 20 modelado.....	16

1. INTRODUÇÃO

A demanda energética é uma das principais preocupações de qualquer país hoje em dia. Conforme as proporções da economia nacional aumentam, também aumenta a demanda energética para o suprimento das necessidades do mercado de trabalho. E conforme a população e seu padrão de vida cresce, sua busca por conforto acaba por exigir maior consumo de energia com fins de, entre outros, climatização.

Uma alternativa para a redução do consumo energético na climatização de edificações é a incorporação de materiais de troca de fase (*Phase-change materials* – PCMs). Tratam-se de materiais colocados na construção externa dos edifícios, capazes de armazenar energia em forma latente ao passo em que mudam de estado físico, reduzindo a carga térmica àqueles imposta. Examinando-se a literatura científica recente, percebe-se um crescente interesse no uso de tais materiais, que prometem redução de cargas de resfriamento e aquecimento e melhoria de conforto térmico em edificações, reduzindo a flutuação da temperatura interna e atrasando a ocorrência de picos.

Os PCMs podem ser utilizados de várias formas: incorporados em materiais porosos, tais quais painéis de gesso e concretos, ou encapsulados em maior escala em filmes que podem ser anexados a paredes e forros já construídos. Não se sabe, todavia, que impacto a adoção de PCMs poderia causar no contexto brasileiro. Deseja-se realizar um estudo que permita avaliar de forma preliminar o desempenho destes materiais em Porto Alegre.

2. OBJETIVOS

Avalia-se o desempenho dos materiais de troca de fase (PCMs) na melhoria do conforto térmico de edificações multipiso em Porto Alegre, seguindo procedimentos da ABNT 2013 e da ASHRAE 2004.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os materiais de troca de fase já são produzidos e comercializados em alguns países. Empresas como a alemã Rubitherm e a norte-americana Entropy Solutions estão no mercado há algumas décadas desenvolvendo PCMs em diversas formas e temperaturas de troca de fase e para diversas aplicações.

O princípio de funcionamento dos materiais de troca de fase é simples: conforme sua temperatura aumenta, estimulada pelo ambiente em aquecimento, o material muda de fase sólida para líquida através processo endotérmico, absorvendo calor na forma latente. Similarmente, quando sua temperatura diminui (comumente à noite), o material muda de fase líquida para sólida em processo exotérmico, devolvendo o calor para o ambiente. A integração de PCMs em paredes de edificações é uma maneira de melhorar sua capacidade de armazenamento de energia e, com isso, reduzir as flutuações da temperatura interna e atrasar os picos de temperatura nela desenvolvidos.

Os benefícios proporcionados pelos PCMs variam conforme alguns parâmetros, principalmente temperatura de troca de fase e capacidade de armazenamento de energia. No que se refere ao uso de PCMs em edificações, faz mais sentido o emprego de materiais que mudam de fase a temperaturas próximas às do conforto térmico idealizado. Desta forma, o material amortece oscilações e atrasa a mudança de temperatura do ambiente. Quanto maior o calor latente do material, maior seu desempenho. Outro detalhe importante é o comportamento histerético apresentado por alguns materiais, por vezes indesejado ou de difícil previsão.

A Figura 3.1 apresenta um gráfico simples que ilustra o comportamento de materiais de troca de fase ideais (que trocam de fase à temperatura constante T_{TF}) e reais (que trocam de fase entre $T_{TF} - \Delta T$ e $T_{TF} + \Delta T$). Em ambos os casos, desconsidera-se a ocorrência de histerese. A capacidade de armazenamento de calor do material é quantificada pelo calor latente (L), definido pela Equação 3.1 para materiais ideais e pela Equação 3.2 para materiais reais.

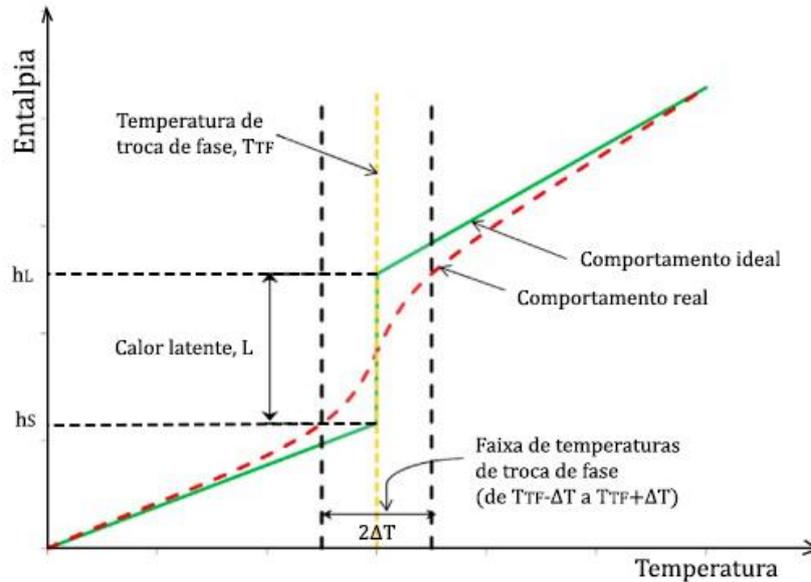


Figura 3.1 – Comportamento de materiais de troca de fase ideais e reais (fonte: adaptado de Al-Saadi *et al.*, 2015).

$$L = h_L (T_{TF}^+) - h_S (T_{TF}^-) \quad (3.1)$$

Onde L é o calor latente, h_L é a entalpia de líquido saturado, h_S é a entalpia de sólido saturado, T_{TF}^+ é temperatura infinitesimalmente superior à temperatura de troca de fase T_{TF} , T_{TF}^- é temperatura infinitesimalmente inferior à temperatura de troca de fase T_{TF} .

$$L = h_L (T_{TF} + \Delta T) - h_S (T_{TF} - \Delta T) \quad (3.2)$$

Onde T_{TF} é a temperatura de troca de fase, ΔT é tanto a diferença de temperatura entre a temperatura de início do processo de troca de fase e T_{TF} quanto a diferença entre esta e a temperatura de término do processo.

Os principais PCMs são materiais orgânicos e inorgânicos. PCMs orgânicos são parafinas e ácidos graxos: solidificam com pouca histerese e são recicláveis, mas são inflamáveis. PCMs inorgânicos são sais inorgânicos: possuem alta condutividade térmica e não inflamam, mas apresentam maiores variações de volume com a troca de fase e solidificam com muita histerese.

Algumas das formas de contenção de PCMs são o micro- e o macroencapsulamento. Inicialmente, realizava-se impregnação direta do PCM em substratos porosos, tais quais gessos e concretos, durante seu processo de fabricação. Outra prática consistia na imersão destes materiais porosos prontos em PCMs para incorporação. Ambos os

métodos apresentaram grandes problemas com o vazamento do PCM em fusão. Para evitar tal problema, pode-se realizar a impregnação do PCM previamente microencapsulado em materiais poliméricos que não tenham afinidade química com este. A Figura 3.2 (a) apresenta um quadro de gesso ThermalCORE da empresa National Gypsum impregnado de PCM microencapsulado da empresa Micronal.

Já o macroencapsulamento é realizado em recipientes rígidos ou painéis e filmes de material termicamente condutivo, como o alumínio. A Figura 3.2 (b) exhibe a aplicação de PCM macroencapsulado da empresa Phase Change Energy Solutions no forro de uma residência.

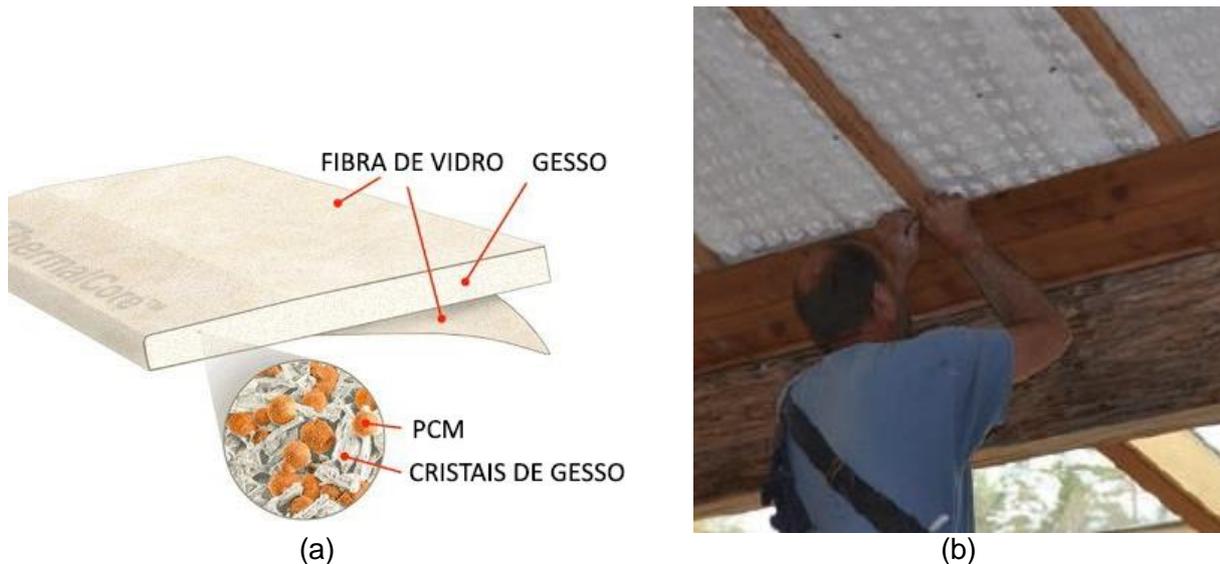


Figura 3.2 – (a) Quadro de gesso impregnado de PCM microencapsulado (fonte: adaptado de Zhou, 2012); (b) Aplicação de PCM macroencapsulado em forro de residência (fonte: material publicitário da Phase Change Energy Solutions).

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com Kuznik *et al.*, que fizeram uma revisão da produção científica sobre materiais de troca de fase até 2011, o interesse em tais materiais data da virada da década de 1980, mas se acentuou a partir dos anos 2000.

Shilei *et al.*, 2006, conduziram investigações experimentais em cubículos de 5 x 3,3 x 2,8 m³ com o uso de ácido graxo como PCM, e conseguiram reduzir a flutuação da temperatura interna em seus modelos em 1,15°C e o fluxo térmico máximo em 8 W/m². Os experimentos foram feitos em 3 dias contínuos de inverno em Shenyang, China.

Já Ahmad *et al.*, 2006, não conseguiu bons resultados de atenuação da amplitude de temperatura em seus experimentos. Os autores compararam o desempenho de painéis de policarbonato impregnados de parafina granular da empresa Rubitherm com materiais isolantes ordinários. Realizaram também experimentos com parafina granular e polietilenoglicol preenchendo painéis de PVC, e com os últimos conseguiram atrasos superiores nos fluxos de ondas térmicas. Os painéis foram estudados isoladamente (não aplicados a edificações), sofrendo carregamento térmico oriundo de trocadores de calor estimulados com variação senoidal de temperatura (simulando a variação de temperatura ao longo de um dia).

Ascione *et al.*, 2014, analisou um edifício de escritórios em condições realistas de uso (ganhos de calor internos, ocupação e sistemas de condicionamento de ar) nas estações de resfriamento em cinco cidades de clima mediterrâneo – Ancara (Turquia), Atena (Grécia), Nápoles (Itália), Marselha (França) e Sevilha (Espanha) – e calculou, através de simulação numérica horária, a energia de resfriamento economizada com a implementação de placas de PCM no lado interno dos fechamentos externos. Estudaram a influência da temperatura de troca de fase, espessura e localização da placa de PCM. Foi possível reduzir a demanda de aquecimento em 7,2% em Ancara, mas em menos de 3% em Sevilha e Nápoles. Além disso, calcularam as horas de conforto térmico para o edifício sem condicionamento de ar, e o uso de PCM aumentou em 93% as horas de conforto em Nápoles.

Alguns fatores que influenciam o desempenho térmico de PCMs não vêm sendo muito intensamente investigados, como apontam Evola *et al.*, 2013. Os autores propõe uma metodologia para a condução de estudos sobre o grau de utilização da capacidade de armazenamento latente dos PCMs, sobre os efeitos da posição e temperatura de troca de fase dos PCMs sobre esta, e sobre a correlação entre as condições climáticas de um ambiente e as propriedades termofísicas ótimas para PCMs nele atuantes.

Conforme constatou-se da literatura, o maior efeito alcançado com o uso de PCM é a redução das flutuações de temperatura com atraso mais ou menos significativo do pico de temperatura. Deseja-se, neste trabalho, observar a ocorrência de tais efeitos em simulação e avaliar sua influência na melhoria do conforto térmico.

5. METODOLOGIA

Para nortear o estudo, seguiram-se orientações das ABNT NBR 15575 e NBR 15220 em conjunto com os critérios de conforto térmico da ASHRAE 2004. Com o intuito de coletar dados de horas de desconforto anuais, entre outros, realizaram-se simulações numéricas em software EnergyPlus 8.1 de edifício modelo virtual foi construído em software Google SketchUp 8, com e sem implementação de PCMs. Detalham-se os procedimentos nos subcapítulos a seguir.

5.1 Normatização e critérios de avaliação

Tratando de desempenho térmico de edificações no Brasil, vigoram, entre outros, a ABNT NBR 15220 e a NBR 15575. Considerou-se, inicialmente, utilizar esta última para avaliar o desempenho térmico dos PCMs. A NBR 15575 trata especificamente sobre edifícios habitacionais e apresenta orientações para a simulação computacional de edificações térreas e multipiso, estabelecendo critérios para avaliação de desempenho mínimo, intermediário e superior desejados, e apresentando 3 sugestões de solução para conforto térmico. Ela considera dois ambientes do edifício, um para avaliação do desempenho no verão e outro no inverno:

1.
 - Verão – em um dia de projeto de verão, compara a temperatura interna máxima com a temperatura externa máxima (temperaturas de bulbo seco - T_{BS}), devendo aquelas ser sempre inferiores a estas;
 - Inverno – em um dia de projeto de inverno, compara a temperatura interna mínima com a temperatura externa mínima (temperaturas de bulbo seco - T_{BS}), devendo aqueles ser sempre superiores a estas acrescidas de 3°C.

Julgou-se que a avaliação do desempenho dos PCMs somente sob tais critérios seria um tanto superficial, uma vez que estes fazem análise somente de dias de projeto e ignoram o desempenho térmico anual do edifício (dias de projeto são dias representativos padronizados para avaliação termoenergética de edificações.). Assim, optou-se por seguir as orientações de modelagem e simulação da NBR 15575, mas adotou-se para a avaliação do desempenho dos PCMs também os seguintes critérios de conforto térmico:

2. horas de desconforto térmico anuais (abreviadas para h_D);
 calor: $h_{D,C} = \sum h$, para $T_i > T_{SUP}$
 frio: $h_{D,F} = \sum h$, para $T_i < T_{INF}$
3. graus-hora de desconforto térmico anuais (*graus-hora*);
 calor: $graus.hora_C = \sum_{i=1}^{h_{D,C}} (T_i - T_{SUP})$, para temperaturas horárias $T_i > T_{SUP}$
 frio: $graus.hora_F = \sum_{i=1}^{h_{D,F}} (T_{INF} - T_i)$, para temperaturas horárias $T_i < T_{INF}$
4. diferenças de temperatura de desconforto médias, ou grau-médio ($\Delta T_{D,M}$).
 calor: $\Delta T_{D,M,C} = graus.hora_C / h_{D,C}$
 frio: $\Delta T_{D,M,F} = graus.hora_F / h_{D,F}$

onde T_{INF} e T_{SUP} são os limites inferior e superior da faixa de conforto térmico considerada e T_i é a temperatura interna.

Os dados de desconforto supracitados são levantados segundo a faixa de temperaturas operativas de conforto com 80% de aceitabilidade para ambientes não climatizados da ASHRAE 2004 (apresentada na Figura 5.1). Foram levantados dados de temperatura operativa (T_{OP} , média entre temperatura radiante média e temperatura de bulbo seco) e temperatura de bulbo seco (T_{BS} , avaliada pela NBR 15575).

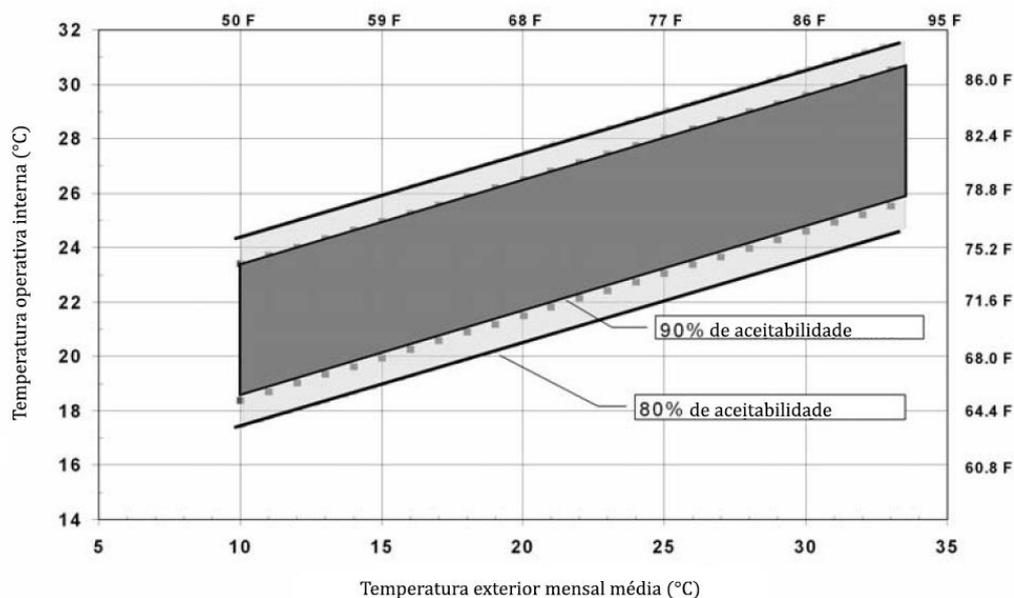


Figura 5.1 – Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados (fonte: adaptado de ASHRAE 2004).

Com uso do gráfico da Figura 5.1, pode-se determinar as faixas de conforto mensais para Porto Alegre. Para isso, é necessário conhecer a temperatura mensal média na cidade em cada mês. Extraíram-se tais dados do arquivo climático disponibilizado *online* pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE, vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina). A Tabela 5.1 apresenta as faixas assim determinadas.

Tabela 5.1 – Faixas de temperatura de conforto térmico para ambientes naturalmente condicionados em Porto Alegre, determinados a partir da Figura 5.1.

Mês	Temperatura média (°C)	Limite inferior (°C)	Limite superior (°C)	Mês	Temperatura média (°C)	Limite inferior (°C)	Limite superior (°C)
JAN	25,33	22,10	29,10	JUL	17,50	19,73	26,69
FEV	24,32	21,79	28,79	AGO	14,94	18,96	25,90
MAR	23,61	21,58	28,57	SET	15,92	19,25	26,21
ABR	20,38	20,60	27,58	OUT	20,37	20,60	27,57
MAI	15,77	19,21	26,16	NOV	20,75	20,71	27,69
JUN	15,74	19,20	26,15	DEZ	24,84	21,95	28,95

5.2 EnergyPlus

Empregou-se o *software* EnergyPlus 8.1 na simulação numérica do edifício modelado. Trata-se de um *software* amplamente empregado e reconhecido pela comunidade científica. Tabares-Velasco *et al.*, 2012, verificaram e validaram o módulo de PCM do EnergyPlus 7 com abordagem semelhante à ASHRAE Standard 140, que consiste em verificação analítica, testes comparativos e validação empírica. Duas falhas foram identificadas e a versão 8.1 do software, utilizada neste trabalho, já apresenta o módulo corrigido.

5.3 Modelo

O modelo de estudo foi desenhado em Google SketchUp 8. Construiu-se um modelo simples, com aspectos construtivos coerentes com a realidade brasileira e condizente com as orientações da NBR 15575 e sugestões da NBR 15220.

O edifício possuiu 5 pavimentos e pé direito de 3m. Cada pavimento possui 4 ambientes com medidas 4m x 4m. Cada ambiente consiste em uma zona térmica e possui uma janela de medidas 2m x 1m. Pode-se visualizar a disposição dos ambientes em cada pavimento na Figura 5.2.

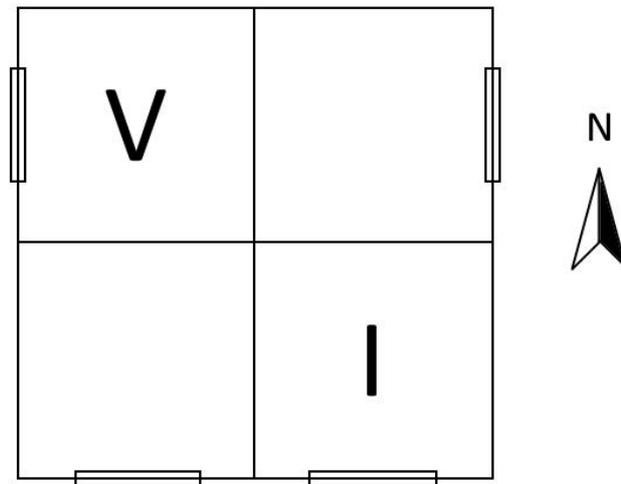


Figura 5.2 – Vista superior de um pavimento padrão do modelo construído.

Os ambientes e janelas foram posicionados de modo que houvesse ambientes orientados de maneira crítica do ponto de vista térmico (segundo a NBR 15575). Ou seja, (1) considera-se a cobertura do edifício; (2) o ambiente “V” (a noroeste) satisfaz as exigências de parede voltada ao norte e janela voltada a oeste e é considerado termicamente crítico no verão; e (3) o ambiente “I” (a sudeste) satisfaz as exigências de parede voltada ao leste e janela voltada ao sul e é considerado termicamente crítico no inverno. Demais decisões foram feitas buscando simplicidade e simetria.

A Figura 5.3 apresenta a construção dos fechamentos do modelo desenhado.

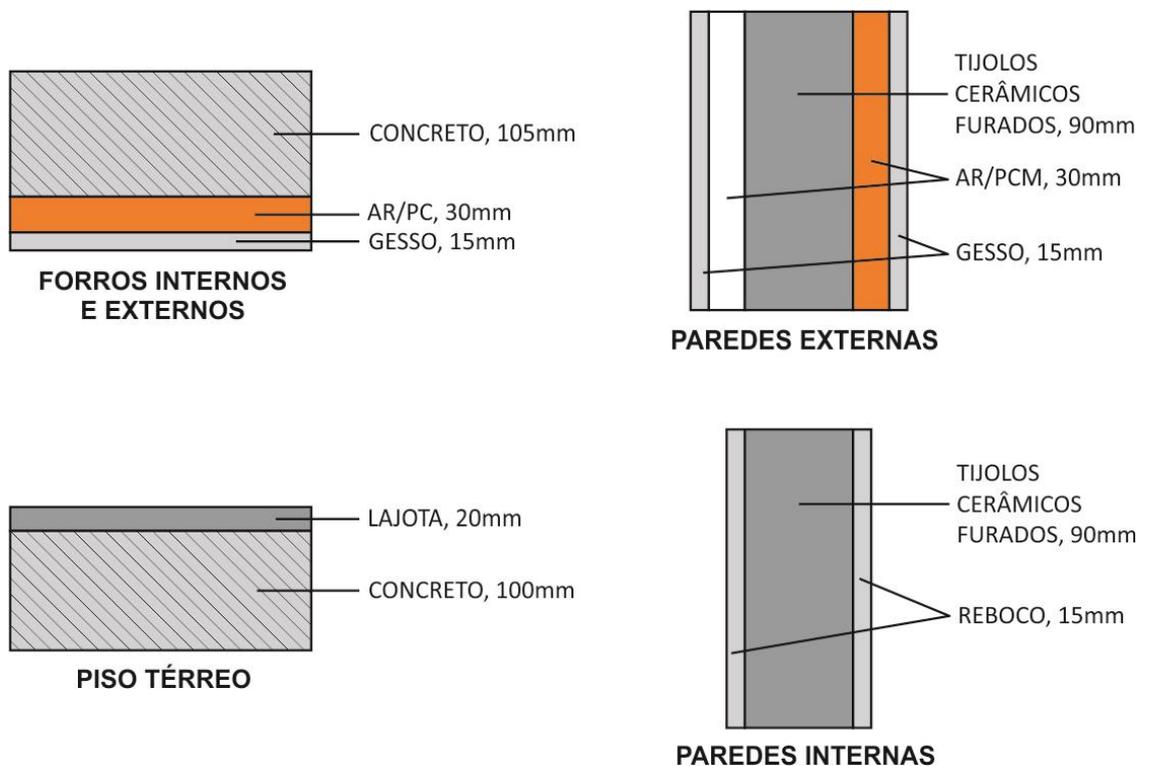


Figura 5.3 – Construção dos fechamentos do modelo.

A camada de ar do lado interno das paredes externas (em laranja) será destinada ao eventual posicionamento de PCM (considerou-se a colocação de PCM na camada de ar do lado externo, mas simulações preliminares revelaram inferior desempenho térmico). Na camada de ar dos forros externos também será posicionado PCM (também em laranja). Alimentou-se o modelo com dados de condutividade térmica, massa específica e calor específico coerentes com materiais reais, extraídos de ASHRAE 2009 e ABNT 2005. Adotou-se cor média para todas as superfícies radiantes internas e externas (coeficiente de absorvidade igual a 0,5). O modelo pode ser visualizado em perspectiva na Figura 5.4.

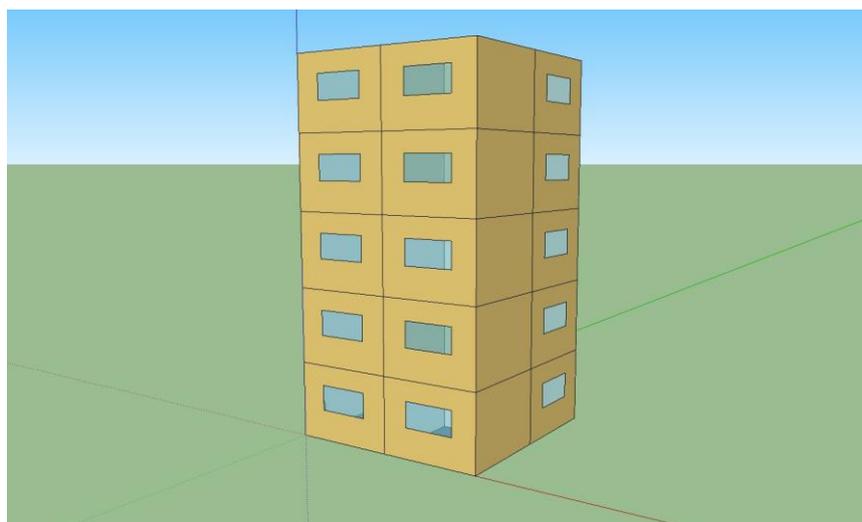


Figura 5.4 – Modelo construído, visualizado em perspectiva na interface do Google SketchUp.

Realizaram-se simulações com camadas de 30mm de PCMs com as seguintes temperaturas de troca de fase: 18°C, 20°C, 22°C, 24°C, 26°C, 28°C e 30°C. Os PCMs modelados serão denominados daqui em diante conforme sua temperatura de troca de fase, ou seja: PCM 18, PCM 20 e assim por diante. Utilizaram-se em sua modelagem os mesmos dados que Morshed *et al.*, 2014, referentes a um BioPCM da empresa Phase Change Energy Solutions, produzido com derivados de azeite de dendê (óleo de palma), coco e soja. Ou seja: condutividade térmica de 0,2 W/(m.K), massa específica de 860 kg/m³ e calor específico de 1,97 kJ/kg. Utilizou-se a curva de entalpia *versus* temperatura apresentada no supracitado artigo e adaptada na Figura 5.5 para modelar o comportamento do PCM 20. As demais curvas foram obtidas deslocando-se a curva do PCM 20 conforme a temperatura de troca de fase desejada. Vale ressaltar que tratam-se de aproximações para fins de simulação, e não representam o comportamento de outros produtos da mesma ou de outra empresa. Para todas as variações de PCMs, o calor latente é de 219kJ/kg e a troca de fase ocorre num intervalo de 4°C (inicia 2°C antes e completa 2°C depois da temperatura considerada). No EnergyPlus, o PCM é modelado como uma camada constante (o material produzido pela Phase Change Energy Solutions, todavia, é comercializado macroencapsulado conforme se vê na Figura 3.3).

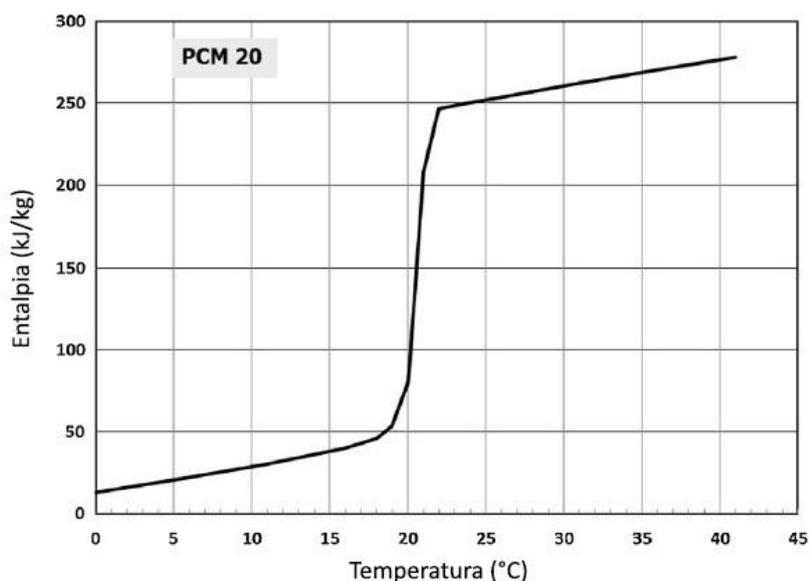


Figura 5.5 – Curva entalpia *versus* temperatura utilizada para o PCM 20 (fonte: adaptado de Morshed *et al.*, 2014).

5.4 Simulações

O modelo construído é importado no software EnergyPlus 8.1 para análise. É ainda necessário o fornecimento de dados referentes ao clima e à localização do modelo. Considera-se, para tal, a cidade de Porto Alegre.

Dados da localização geográfica da cidade (latitude, longitude, altitude e fuso horário) foram retirados da NBR 15575.

Como dias de projeto, consideraram-se os dias de projeto de Verão e Inverno em temperatura de bulbo seco com corte de frequência em 0,4% apresentados pela AHRAE 2009, atualizados com os dados de temperatura fornecidos pela NBR 15575 (bulbo seco máxima para verão, bulbo seco mínima para inverno, amplitude diária e bulbo úmido para ambos). Um dia de projeto com corte de frequência em 0,4% é elaborado ignorando as temperaturas horárias extremas apresentadas em 0,4% das horas totais (ou seja, ignorando as 35 temperaturas horárias máximas dentre um acervo de 8760 temperaturas horárias ao longo apresentadas ao longo do ano).

Para dados referentes ao clima anual de Porto Alegre, utilizou-se o arquivo climático disponibilizado pelo LabEEE e já citado anteriormente.

Conforme a NBR 15575, consideram-se totalmente desobstruídas por parte de outras edificações e vegetação as incidências de sol e de vento. Considera-se uma taxa de infiltração de 1 renovação do volume de ar por hora. Ainda conforme exigido pela NBR 15575, não foram modeladas fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas e outros equipamentos).

Para simular a troca de fase dos PCMs, deve-se utilizar o algoritmo de diferenças finitas para condução unidimensional do EnergyPlus. Tabares-Velasco *et al.*, 2012, recomendam o uso de *time steps* máximos de 3 minutos para otimizar a precisão horária nos resultados.

Simulou-se o modelo de edifício multipiso contruído das seguintes maneiras:

- sem PCMs instalados;
- com os 7 PCMs previamente descritos (com temperaturas de troca de fase entre 18°C e 30°C) instalados nos vãos internos das paredes e forros externos;
- com as 3 soluções para conforto térmico sugeridas pela NBR 15575: (A) 5 renovações do volume de ar por hora, (B) inserção de proteção solar externa da janela capaz de cortar 50% da radiação solar direta e (C) combinação destas duas.

Totalizam-se, assim, 11 configurações diferentes para o modelo de simulação.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 6.1 apresenta as horas de desconforto (h_D), graus-hora de desconforto e diferenças de temperatura de desconforto médias ($\Delta T_{D,M}$) para calor na zona V (ver Figura 5.2) apresentadas pelo modelo sem e com a instalação de PCMs. Destacados em cinza estão os melhores desempenhos segundo cada critério.

Tabela 6.1 – Desempenho dos PCMs – calor.

Critério de avaliação	SEM PCM	PCM						
		18	20	22	24	26	28	30
$h_{D,C}(T_{BS})$	975	893	871	809	690	508	483	649
Graus-hora $c(T_{BS})$	1875	1559	1536	1448	1303	922	626	696
$\Delta T_{D,M,C}(T_{BS})$	1,92	1,75	1,76	1,79	1,89	1,82	1,30	1,07
$h_{D,C}(T_{OP})$	1075	996	968	888	766	540	517	773
Graus-hora $c(T_{OP})$	2120	1791	1763	1659	1478	1019	661	763
$\Delta T_{D,M,C}(T_{OP})$	1,97	1,80	1,82	1,87	1,93	1,89	1,28	0,99

Percebe-se que os melhores PCMs para o verão são os 28 e 30, dependendo do critério observado. Consegue-se com o uso do PCM 28 uma redução de pouco mais de 50% na quantidade de horas de desconforto térmico de calor e em torno de 67% na quantidade de graus-hora de desconforto, analisando-se tanto temperaturas de bulbo seco quanto temperaturas operativas. Percebe-se também que a avaliação segundo a temperatura de bulbo seco é mais otimista que aquela segundo a temperatura operativa.

A Tabela 6.2 apresenta as horas de desconforto, graus-hora de desconforto e diferenças de temperatura de desconforto médias para frio na zona I (ver Figura 5.2) apresentadas pelo modelo sem e com a instalação de PCMs. Destacados em cinza estão os melhores desempenhos segundo cada critério. Escritos em vermelho estão os desempenhos inferiores ao modelo sem instalação de PCM.

Tabela 6.2 – Desempenho dos PCMs – frio.

Critério de avaliação	SEM PCM	PCM						
		18	20	22	24	26	28	30
$h_{D,F}(T_{BS})$	3937	4332	4076	3645	3652	3814	3881	3901
$Graus-hora_F(T_{BS})$	13298	12271	12014	12175	12586	12880	12994	13028
$\Delta T_{D,M,F}(T_{BS})$	3,38	2,83	2,95	3,34	3,45	3,38	3,35	3,34
$h_{D,F}(T_{OP})$	3885	4359	4015	3528	3613	3768	3835	3858
$Graus-hora_F(T_{OP})$	13073	11963	11673	11952	12406	12674	12777	12809
$\Delta T_{D,M,F}(T_{OP})$	3,36	2,74	2,91	3,39	3,43	3,36	3,33	3,32

Percebe-se que os melhores PCMs para o inverno são os 18, 20 e 22, dependendo do critério observado. Dessa vez, o uso de PCM não se mostrou tão eficiente: reduz-se a quantidade de horas de desconforto em torno de 7% para T_{BS} e 9% para T_{OP} (com o PCM 22) e reduz-se a quantidade de graus-hora de desconforto em torno de 10% (com o PCM 20). A avaliação segundo a temperatura de bulbo seco é mais pessimista que aquela segundo a temperatura operativa.

A Tabela 6.3 apresenta as horas de desconforto, graus-hora de desconforto e diferenças de temperatura de desconforto médias (tanto para calor quanto para frio) nas zonas V e I (ver Figura 5.2) apresentadas pelo modelo sem e com a instalação de PCMs. Destacados em cinza estão os melhores desempenhos segundo cada critério. Escritos em vermelho estão os desempenhos inferiores ao modelo sem instalação de PCM.

Tabela 6.3 – Desempenho dos PCMs – calor e frio.

Critério de avaliação	SEM PCM	PCM						
		18	20	22	24	26	28	30
$h_D(T_{BS})$	4919	5229	4951	4457	4346	4323	4365	4551
$Graus-hora(T_{BS})$	14692	13315	13047	13155	13458	13389	13211	13305
$\Delta T_{D,M}(T_{BS})$	2,98	2,55	2,64	2,95	3,10	3,10	3,03	2,92
$h_D(T_{OP})$	4966	5360	4989	4419	4381	4311	4352	4634
$Graus-hora(T_{OP})$	14666	13185	12891	13100	13420	13253	13005	13121
$\Delta T_{D,M}(T_{OP})$	2,95	2,46	2,58	2,96	3,06	3,07	2,99	2,83

Observa-se que os PCMs com melhor comportamento anual são os 18, 20 e 26, dependendo do critério preferido. Consegue-se reduzir em torno de 12% a quantidade de horas de desconforto (com o PCM 26) e de graus-hora de desconforto (com o PCM 20) ao longo de todo o ano.

Tanto na Tabela 6.2 quanto na Tabela 6.3 observa-se que os melhores desempenhos em horas de desconforto térmico coincidem com os piores desempenhos de $\Delta T_{D,M}$, e vice-versa.

Para analisar esse fenômeno, plota-se nas Figuras 6.1 e 6.2 a temperatura operativa ao longo do ano na zona I (SE, ver Figura 5.2) com uso dos PCMs 18 e 26, que apresentaram, respectivamente, os piores e melhores desempenhos de horas de desconforto térmico total. Traçam-se também, nas supracitadas figuras, as linhas referentes aos limites de conforto térmico mensais para ambientes não climatizados (calculados segundo ASHRAE 2004 e apresentados anteriormente) e uma linha de tendência para a temperatura (segundo um polinômio de grau 6).

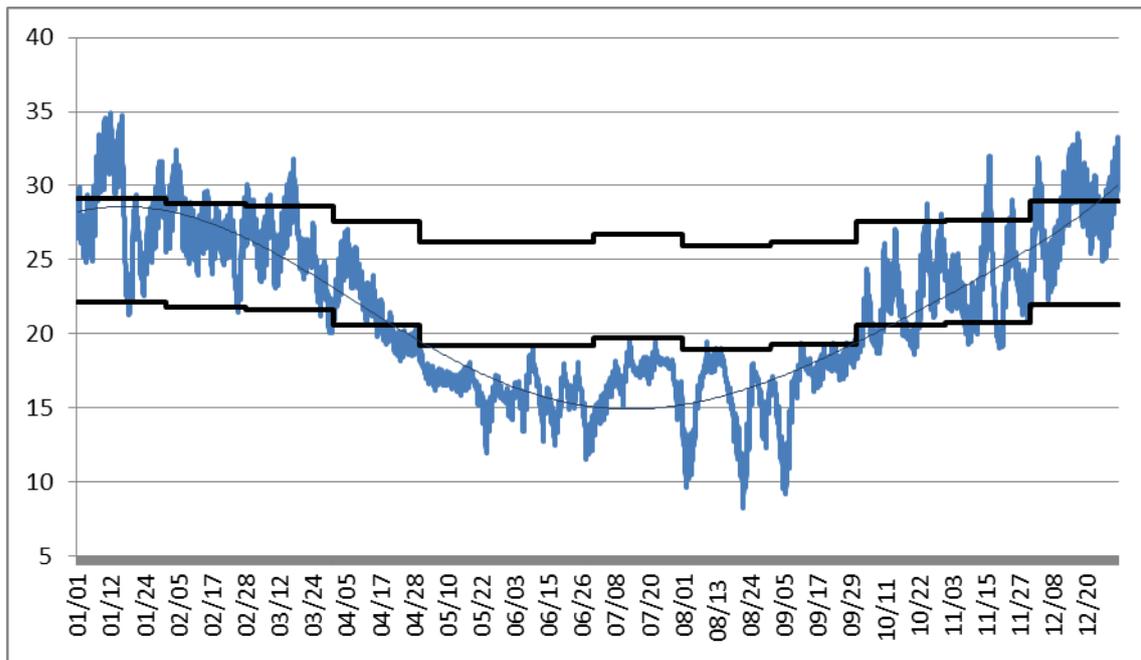


Figura 6.1 – Temperatura operativa ao longo do ano, zona I, com PCM 18 instalado.

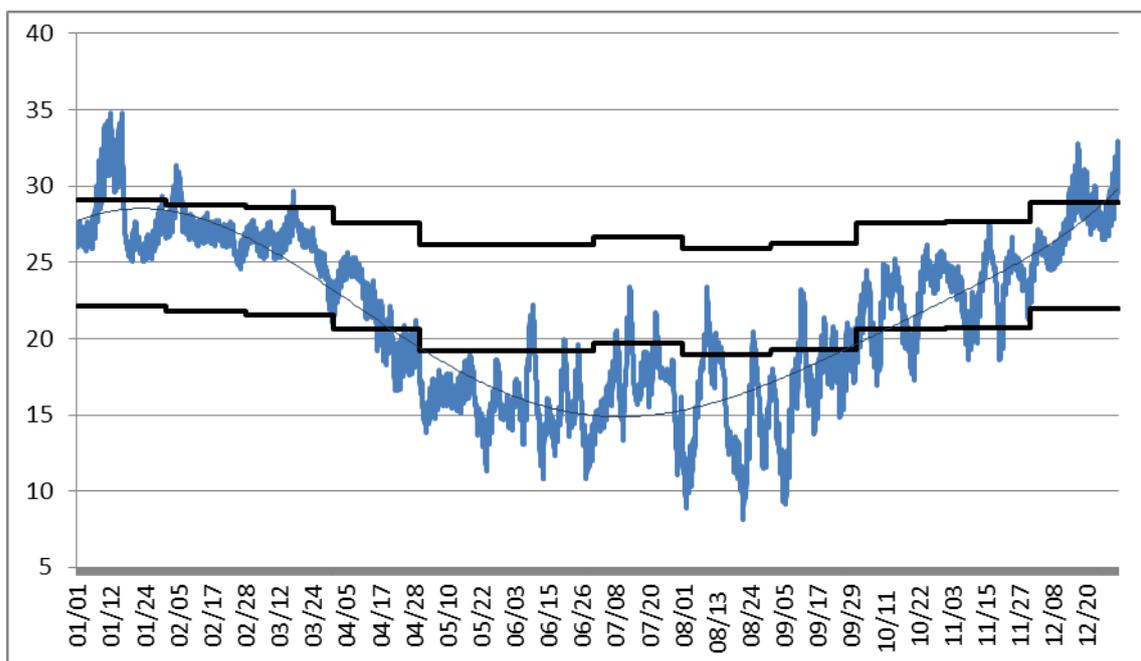


Figura 6.2 – Temperatura operativa ao longo do ano, zona I, com PCM 26 instalado.

Pode-se observar que tanto o PCM 18 quanto o PCM 26 amortecem as variações de temperatura nas suas faixas de troca de fase. O PCM 26 reduz as oscilações de temperatura em faixas próximas do limite superior de conforto térmico, e termina por reduzir as horas de desconforto de calor. Mas a consideravelmente maior fração das horas de desconforto corresponde a horas de frio. Nas estações mais frias, o PCM 18 (que troca de fase abaixo do limite inferior de conforto térmico) acaba por impedir oscilações que elevariam a temperatura à faixa de conforto térmico, apresentando assim mais horas de desconforto térmico de frio que o PCM 26, mesmo que reduzindo a $\Delta T_{D, M}$ em $0,62^{\circ}\text{C}$ em relação ao PCM 26.

É importante ressaltar que a grande quantidade de horas de desconforto de frio está justificada no fato de não terem sido modeladas cargas internas, em concordância com a NBR 15575. Caso fossem consideradas, essas cargas deslocariam os gráficos das figuras 6.1 e 6.2 para cima, aumentando consideravelmente as horas de conforto térmico apresentadas.

Por fim, desejou-se colocar o desempenho dos PCMs simulados à prova frente aos critérios da NBR 15575. Com este intuito, comparam-se nas tabelas 6.4 e 6.5 os PCMs e as soluções sugeridas pela NBR 15575 que apresentaram melhores desempenhos na redução de horas de desconforto de calor e de frio, respectivamente. Destacados em cinza estão os melhores desempenhos segundo cada critério.

Tabela 6.4 – Comparação entre o PCM 28 e a solução C da NBR 15575 (ver seção 5.4). Critérios de desconforto para calor e temperaturas máximas no dia de projeto de verão.

Critério de avaliação	SEM PCM	PCM 28	C
$h_{D,C}(T_{BS})$	975	483	512
<i>Graus-hora_c</i> (T_{BS})	1875	626	882
$\Delta T_{D,M,C}(T_{BS})$	1,92	1,30	1,72
$h_{D,C}(T_{OP})$	1075	517	560
<i>Graus-hora_c</i> (T_{OP})	2120	661	933
$\Delta T_{D,M,C}(T_{OP})$	1,97	1,28	1,67
$T_{BS, MAX}$ (zona V, °C)	40,14	39,28	36,27
$T_{BS, MAX} - T_{BS, MAX, SEM PCM}$ (°C)	0,00	-0,86	-3,87

Tabela 6.5 – Comparação entre o PCM 22 e a solução B da NBR 15575 (ver seção 5.4). Critérios de desconforto para frio e temperaturas mínimas no dia de projeto de inverno.

Critério de avaliação	SEM PCM	PCM 22	B
$h_{D,F}(T_{BS})$	3937	3645	4115
$Graus-hora_F(T_{BS})$	13298	12175	13988
$\Delta T_{D,M,F}(T_{BS})$	3,38	3,34	3,40
$h_{D,F}(T_{OP})$	3885	3528	4058
$Graus-hora_F(T_{OP})$	13073	11952	13842
$\Delta T_{D,M,F}(T_{OP})$	3,36	3,39	3,41
$T_{BS,MIN}$ (zona I, °C)	8,09	8,58	8,19
$T_{BS,MIN} - T_{BS,MIN,SEM\ PCM}$ (°C)	0,00	+0,49	+0,1

Observa-se na Tabela 6.5 que o PCM 22 apresenta desempenho superior ao da solução B em todos os critérios, inclusive no aumento da temperatura mínima na zona I no dia de projeto de inverno. No entanto, embora o PCM 28 (ver Tabela 6.4) apresente superiores redução das horas de desconforto e das amplitudes de temperatura nestas, acaba por reduzir a temperatura máxima da zona V no dia de projeto de verão em menos de 1°C, enquanto que o uso da solução C reduz essa temperatura em quase 4°C. Percebe-se nessa situação grande incoerência entre os critérios que consideram horas de desconforto anuais e o critério de avaliação de desempenho da NBR 15575.

7. CONCLUSÕES

O uso de PCMs nas paredes e forros externo de edifícios tem condições de melhorar o conforto térmico em construções em Porto Alegre, mesmo que possa produzir resultados contraditórios frente à NBR 15575.

Foi possível reduzir em 50% a quantidade de horas de desconforto térmico de calor e em 9% a quantidade de horas de desconforto térmico de frio em edifícios multipisos. Mais estudos são necessários para avaliar com maior detalhe o efeito do PCM, principalmente considerando a presença de fontes de calor internas.

Para otimizar o uso dos PCMs, pode ser estudado com profundidade seu desempenho com a variação da espessura da sua camada instalada, com sua instalação restrita a menores regiões das paredes ou somente ao forro do edifício, e com sua instalação no lado interno ou externo das paredes e forros.

Seria ainda interessante estender o presente estudo a outras capitais brasileiras, calcular a redução das cargas e consumos energéticos de resfriamento e aquecimento decorrentes do uso de PCMs em ambientes condicionados e estimar o tempo de retorno de investimento associado à sua implementação.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT 2005; **“NBR 15220/2005: desempenho térmico de edificações”**, 2005.
- ABNT 2013; **“NBR 15575/2013: edificações habitacionais – desempenho”**, 2013.
- Ahmad M., Bontemps A., Sallée H., Quenard D.; **“Experimental investigation and computer simulation of thermal behaviour of wallboards containing a phase change material”**, Energy Build, vol. 38, pp 357–366, 2006.
- Al-Saadi S. N., Zhai Z. (J.); **“Systematic evaluation of mathematical methods and numerical schemes for modeling PCM-enhanced building enclosure”**, Energy and Buildings, vol. 92, pp 374-388, 2015.
- Ascione F., Bianco N., De Masi R. F., De’Rossi F.; **“Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season”**, Applied Energy, vol. 113, pp 990-1007, 2014.
- ASHRAE 2004; **“ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”**.
- ASHRAE 2009; **“2009 ASHRAE Handbook – Fundamentals, Climate Design Data”**.
- Evola G., Marletta L., Sicurella F.; **“A methodology for investigating the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings”**, Building and Environment, vol. 59, pp. 517-527, 2013.
- Kuznik F., David D., Johannes K., Roux J.-J.; **“A review on phase change materials integrated in building walls”**, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp 379-391, 2011.
- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, **“Arquivos climáticos em formato EPW”**, <http://www.labeee.ufsc.br/>. Acessado em 23/10/2015.
- Morshed A., Hasnat J., Sanjayan J., Wilson J.; **“Energy saving potential of phase change materials in major Australian cities”**, Energy and Buildings, vol. 78, pp 192-201, 2014.
- Shilei L., Neng Z., Guohui F.; **“Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter”**, Energy Build, vol. 38, pp 18-24, 2006.
- Tabares-Velasco P. C., Christensen C., Bianchi M.; **“Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies”**, Building and Environment, vol. 54, pp 186-196, 2012.
- Zhou D., Zhao C. Y., Tian Y.; **“Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications”**, Applied Energy, vol. 92, pp 593-605, 2012.

9. APÊNDICES

9.1 APÊNDICE I: Propriedades do PCM 20 modelado

Os dados da Tabela 9.1 e a Figura 9.1 (adaptada) aqui apresentados foram extraídos de Morshed *et al.*, 2014. A Tabela 9.2 foi construída a partir da Figura 9.1.

Tabela 9.1 – Propriedades térmicas do PCM 20 (são as mesmas dos demais PCMs modelados; fonte: Morshed *et al.*, 2014).

Espessura da camada	30 mm
Condutividade térmica	0,2 W/(m.K)
Massa específica	860 kg/m ³
Calor específico	1,97 kJ/(kg.K)
Calor latente	219 kJ/kg

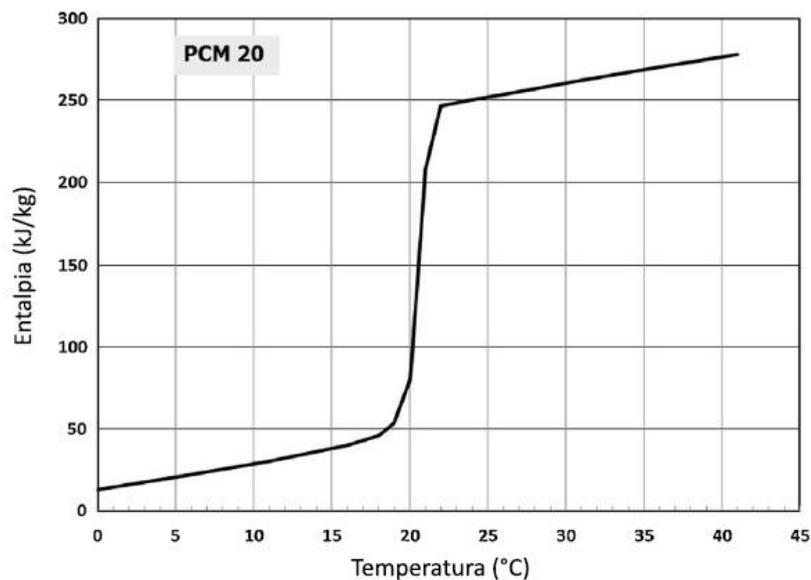


Figura 9.1 – Curva entalpia *versus* temperatura utilizada para modelar o PCM 20. As curvas dos demais PCMs foram obtidas através do deslocamento desta (fonte: adaptado de Morshed *et al.*, 2014).

Tabela 9.2 – Dados para inserção da curva entalpia *versus* temperatura do PCM 20 no modelo, determinados a partir da Figura 9.1. Entre pontos, a entalpia varia linearmente com a temperatura.

	Temperatura (°C)	Entalpia específica kJ/kg)
1	0	0,05
2	18	35,5
3	22	254,5
4	80	368,75