

Desempenho térmico de placas de cimento álcali-ativado fabricadas a partir de resíduos de porcelanato

Thermal performance of alkali-activated cement board manufactured from waste porcelain tiles

¹Cláudio Henrique Pires e Silva, ²Raquel Diniz Oliveira, ³Paulo Henrique Ribeiro Borges

¹Mestre em Engenharia Civil – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET MG
(claudiopires.eng@gmail.com)

²Professora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) – CEFET MG
(raqueldiniz@cefetmg.br)

³Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) – CEFET MG
(paulo.borges@cefetmg.br)

RESUMO: Cimentos álcali-ativados podem otimizar as propriedades termofísicas do concreto. Neste contexto, o presente estudo objetivou analisar o desempenho térmico de placas de cimento álcali-ativado (PCAAs), produzidas a partir de resíduos de porcelanato. A caracterização das propriedades termofísicas das placas foi realizada por meio de ensaios. Posteriormente, realizou-se simulação termoenergética de habitação naturalmente ventilada em *Light Steel Framing*, em oito climas diferentes. Os resultados das PCAAs foram comparados estatisticamente com placas de cimento Portland (PCPs). No geral as PCAAs apresentaram menores valores de densidade e absorptância a radiação solar, entretanto as PCPs apresentaram valores menores de condutividade térmica e capacidade de calor específico. Nos climas mais frios as PCPs propiciaram maior número de horas em conforto térmico, alcançando, porém, menos de 45% das horas do período analisado. Para os demais climas, as PCAAs obtiveram os melhores resultados. Nos climas mais quentes, a pintura das placas na cor branca aumentou em até 7 e 9% o percentual de horas confortáveis propiciados pela PCAA e PCP, respectivamente. A análise estatística das horas em conforto obtidas confirmou os resultados da simulação uma vez que as diferenças entre as horas em conforto obtidas pelas placas em cada clima foram significativas (ANOVA e teste de Kruskal Wallis). Tais análises confirmaram também que os diferentes processos de cura da PCAAs podem ter influenciado na quantidade de horas de conforto propiciadas por cada tipo de placa. A produção de novos materiais de fechamento pode, portanto, se viabilizar como uma alternativa construtiva em algumas condições climáticas.

Palavras Chave: Cimento geopolimérico. Propriedades termofísicas. Resíduos industriais.

ABSTRACT: Considering that alkali-activated cement can show better thermophysical properties than concrete, the authors aimed to analyze the thermal performance of alkali-activated cement board (PCAA), produced from porcelain tile waste. Its thermal properties were measured in the samples. Besides, a thermoenergetic performance of a Light Steel Framing natural ventilated house was emulated through Energy Plus under eight Brazilian bioclimatic zones. A Portland cement panel (PCP) results was also considered for statistical comparative analysis. PCAAs showed lower values of bulk density and solar absorptivity. On the other hand, PCPs showed slightly better thermal conductivity and specific heat capacity values. Despite providing a greater thermal comfort hour under cold climates, PCP's comfort hours were less than 45% of the total period. Under other climates, PCAAs presented better results. The employment of white paint on plates, under the hottest climates, increased by up to 7 and 9% of the comfortable hours' percentage provided by PCAA and PCP, respectively. The differences between the comfort hours provided by the plates in each climate were significant since the p-value of statistical analysis <0.05, confirming, indeed, the computer simulation results. Likewise, different healing processes of PCAAs may also have influenced the amount of comfort hours provided by each type of plate. In short, the production of new fence materials can therefore become viable as a constructive option under some climatic conditions.

Keywords: Geopolymer cement. Thermophysical properties. Industrial waste.

1. INTRODUÇÃO

O acelerado ritmo de desenvolvimento da sociedade associado à constante demanda por novas edificações, fez com que o concreto se tornasse um dos produtos mais consumido no mundo. Para suprir tal demanda a produção de cimento Portland (CP), o principal ligante utilizado nas misturas de concreto, vem aumentando a cada ano. Somente no ano de 2018 foram produzidas no mundo cerca de quatro bilhões de toneladas desse insumo (SNIC, 2019). A produção de CP emite, globalmente, de 5 a 7 % de dióxido de carbono (CO₂), responsável por 65% dos gases do efeito estufa (GEE). Estima-se que para cada tonelada de cimento produzida são gerados cerca de 0,8 toneladas de CO₂ (MOHAMAD et al., 2022). As altas emissões associadas à fabricação desse ligante se devem, principalmente, ao processo de calcinação calcária para a produção do clínquer, que ocorre a 1500° C e demanda enorme quantidade de energia (SNIC 2019).

Neste sentido, em virtude do relevante impacto ambiental ocasionado pela construção civil, algumas pesquisas têm sido direcionadas para promover a descarbonização do cimento por meio da substituição do clínquer por produtos alternativos e de baixa emissão de CO₂ durante seu processo de fabricação. Uma opção que têm se mostrado viável é a utilização de materiais álcali-ativados (MAAs), formados pela interação de um precursor rico em sílica e alumina, como por exemplo escória de alto forno, pozolana natural ou cinza volante, com um ativador alcalino: silicatos, hidróxidos, sulfatos, carbonatos ou óxidos de alumínio (HÖLSCHER et al., 2018). Esta categoria de material é geralmente dividida em dois sistemas de acordo com a composição química de seus precursores. O primeiro sistema é composto por precursores ricos em cálcio (Ca), sílica (SiO₂) e alumina (Al₂O₃) e os materiais formados pela sua ativação dão origem a um gel de aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H) com estrutura parecida à tobermorita. Geralmente esse tipo de gel coexiste com produtos secundários de hidróxidos duplos lamelares, formados quando há presença de magnésio. Já o segundo sistema é formado por precursores com pouco ou nenhum teor de cálcio, sua ativação tende a gerar um gel de aluminossilicato alcalino hidratado (N-A-S-H), com uma estrutura pseudo-zeolítica altamente reticulada. Nesse gel, diferente do que ocorre com o tipo C-A-S-H, a água não é um elemento estrutural importante (PROVIS, 2018).

Os MAAs são, na maioria das vezes, provenientes de resíduos industriais ou agrícolas e são formados pela interação de um ativador alcalino com um aluminossilicato, o que fornece um produto com propriedades aglutinantes semelhantes às do CP. Além dos benefícios ecológicos ocasionados pela redução da emissão de CO₂, a utilização de materiais álcali-ativados como substitutos ao CP também pode melhorar algumas das propriedades do concreto, como resistência a compressão, a abrasão, a ataques químicos e além de otimizar o seu desempenho térmico (PROVIS 2018). Ademais, a produção desses ligantes pode gerar até cinco vezes menos CO₂ do que a produção de cimento Portland, ou seja, são geradas apenas cerca de 0,18 toneladas de CO₂ por tonelada de MAAs produzidos (HÖLSCHER et al. 2018).

Em razão da sua menor densidade em relação ao concreto convencional, geralmente abaixo de 1850 kg/m³, esse material oferece várias vantagens como redução da carga e peso das estruturas, economia de aço, isolamento térmico e acústico melhorado, facilidade no manuseio e transporte, além de menor custo total (KHATIB et al., 2019). Entretanto, devido a sua estrutura ser muito porosa possui como grande desvantagem a baixa ductilidade e tenacidade à fratura, o que normalmente acaba limitando seu uso à funções não estruturais (NEMATOLLAHI et al. 2017).

A produção desse material pode ser feita por meio da inserção de ar na mistura de concreto e pela substituição parcial ou total dos agregados convencionais por agregados leves naturais, como pedra-pomes e cinza vulcânicas, ou artificiais como poliestireno expandido (EPS), perlita e vermiculita expandida (NEMATOLLAHI et al., 2017; HOANG MINH e LE

PHUONG, 2018). Dentre estes agregados, o poliestireno expandido (EPS) se destaca por ser ultraleve, apresentar boas propriedades térmicas e ser um material hidrofóbico (KAYA e KAR, 2016). Além disso, por ser geralmente utilizado como embalagem para diversos produtos e frequentemente descartado na natureza após sua utilização, a reciclagem e reaproveitamento do EPS como agregado o tornam um material ecológica e economicamente interessante para a produção de novos compósitos (KHATIB et al., 2019).

Por este motivo o emprego de EPS como substituto dos agregados convencionais tem se tornado cada vez mais recorrente. Atualmente, diversas pesquisas sobre sua interação em diversas matrizes cimentícias, têm sido realizadas. Alguns destes estudos se concentram no entendimento das propriedades termomecânicas desses novos compósitos (COLANGELO et al., 2018; MAAROUFI et al., 2018), enquanto outros se destinam a explicar a interação EPS – matriz e a influência do teor e tamanho de suas partículas no desempenho desses materiais (KAYA e KAR, 2016; HOANG MINH e LE PHUONG, 2018).

Adicionalmente, a utilização desses materiais como substitutos ao CP também pode melhorar algumas das propriedades do concreto como: resistência a flexão, a compressão, a abrasão, a ataques químicos, melhoria do seu desempenho térmico além de apresentar baixo custo de produção (KASHANI et al., 2017).

De todas estas propriedades, uma atenção especial deve ser dada à análise de desempenho térmico, visto que a utilização de energia elétrica para manutenção das condições de conforto térmico no interior das edificações tem contribuído de forma significativa para o aumento da demanda global de energia (IEA, 2018). No Brasil, por exemplo, o uso de energia para essa finalidade representa cerca de 30% de todo consumo do setor residencial (EPE, 2023). Adicionalmente, estima-se que a energia gasta durante a fase de operação de uma edificação corresponda a cerca de 80% a 90% de toda a energia gasta durante o seu ciclo de vida (RAMESH et al., 2010).

Como o problema do desconforto térmico das habitações está ligado a fatores como a inércia térmica reduzida dos materiais construtivos, a melhoria das características térmicas do concreto pode influenciar diretamente no desempenho térmico das edificações e, por consequência, na redução da energia gasta durante a sua fase de operação (MADDALENA et al. 2018). As características dos componentes que integram os sistemas de vedação de uma edificação são, portanto, extremamente importantes para a determinação do seu desempenho energético e podem influenciar diretamente nas condições de conforto térmico em seu interior (KUMAR et al., 2018). Por este motivo, a utilização de MAAs em substituição ao CP na fabricação de ligantes tem sido cada vez mais estudada, pois como demonstrado em alguns estudos estes materiais podem apresentar melhor desempenho térmico do que o cimento convencional (SNELL et al. 2017; MADDALENA et al., 2018; NARAYANAN e SHANMUGASUNDARAM, 2017; BAUMBACH e OLIVEIRA, 2021). De forma complementar, Gevaudan e Srubar (2017), Baumbach et al. (2019) e Villalba et al. (2018), verificaram que sistema de vedação em cimento álcali-ativado, apresentariam menor consumo energético quando comparada a outras que utilizam cimento Portland.

Assim, considerando-se a universalidade do concreto como principal componente das edificações e o constante crescimento da indústria da construção civil, a investigação de novos produtos se mostra importante como forma de possibilitar opções alternativas igualmente adequadas ou melhores do ponto de vista térmico aos diferentes tipos de clima brasileiros. Ademais, como na produção de cimentos álcali-ativados podem ser utilizados resíduos ou subprodutos de outros setores industriais, desde que possuam elevadas quantidades de sílica e alumina (PROVIS, 2018), sua utilização poderia garantir uma vantagem adicional para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

Neste contexto, tendo em vista a escassez de estudos específicos direcionados para o aproveitamento dos resíduos de porcelanato para a produção de painéis de vedação vertical

constituídos por materiais álcali-ativadas, o direcionamento de novas pesquisas neste tema poderia colaborar para a sua difusão e ampliação como alternativa mais sustentável para o mercado da construção civil. Assim, apontamentos neste sentido poderiam contribuir para o preenchimento desta lacuna além de ressaltar as características térmicas que se fazem relevantes para melhorar o desempenho térmico dos fechamentos verticais das edificações bem como as horas de conforto térmico propiciadas aos seus ocupantes. Tal definição poderá, ainda, servir de referência para a tomada de decisão em futuras intervenções em edifícios existentes e/ou auxiliar a especificação de projeto arquitetônico durante a sua fase de concepção ou até mesmo servir como embasamento para estudos referentes a materiais construtivos alternativos as placas de cimento Portland como vedação vertical no contexto climático brasileiro.

Por fim, com o intuito de avançar no conhecimento dos materiais alternativos de construção, a presente pesquisa visa avaliar o desempenho térmico propiciado por sistemas de vedação vertical compostos por placas de cimento álcali-ativado (PCAA) em comparação com sistemas dotados de placas de cimento Portland (PCP), sob diferentes condições climáticas. Desta forma, as propriedades termofísicas de PCAA contendo EPS como agregado e de placas de cimento Portland PCP foram investigadas e comparadas, a fim de se verificar qual delas apresenta melhor desempenho térmico. Adicionalmente, verificou-se a influência da condição de cura da PCAA em suas propriedades termofísicas e se o comportamento térmico da edificação varia em função da zona bioclimática (Z) em que está situada.

2. MATERIAIS E MÉTODO

A execução desta pesquisa foi dividida em três etapas: 1) obtenção de três variações de placas (tratadas aqui como PCP, PCAA1 e PCAA2 e caracterização das suas propriedades térmicas; 2) elaboração do modelo termoenergético e simulação computacional; e 3) análise estatística dos dados.

2.1 Caracterização das placas selecionadas

Na presente pesquisa, três tipos de placas cimentícias foram estudadas: um tipo produzido a partir de cimento Portland (PCP) e outros dois fabricados com cimento álcali-ativado produzido a partir de resíduos de porcelanato (PCAA).

Os dois tipos de placas de cimento álcali-ativado se diferem um do outro pelo processo de cura utilizado durante sua fabricação: um utiliza o processo de cura em estufa (PCAA1) enquanto o outro é curado em autoclave (PCAA2). Além do cimento álcali-ativado essas placas possuem em sua composição EPS, que foi adicionado como substituto aos agregados convencionais e um reforço com tela de fibra de vidro em ambas as faces. Já as placas cimentícias são reforçadas com fibras de polipropileno. As placas selecionadas para este estudo, nas dimensões 300mm x 300mm x 10mm foram fornecidas pela empresa *Smart* Sistemas Construtivos sediada em Ponta Grossa-PR e foram avaliadas quanto a seus valores de densidade de massa aparente, absorvância da radiação solar, condutividade térmica e capacidade de calor específico.

2.1.1 Determinação da densidade de massa aparente

A densidade de massa aparente das amostras de placas, foi determinada de acordo com as especificações da norma ASTM (2021a). Neste ensaio a massa seca (m_1), massa saturada após fervura (m_2), massa aparente imersa (m_3) e o volume da amostra (V) foram medidos e em seguida a densidade aparente foi calculada por meio das Equações 1 e 2.

$$m_3 = m_2 - V \quad (1)$$

$$\rho_{amostra} = \left[\frac{m_1}{(m_1 - m_3)} \right] \cdot \rho_{\text{água}} \quad (2)$$

Em que $\rho_{\text{água}}$ foi adotada igual 1 g/cm³.

Para isso, inicialmente as amostras foram medidas e tiveram seu volume calculado. Em seguida foram pesadas em uma balança de precisão (marca Bel, modelo S2202H) com aproximação por duas casas decimais e secas em estufa (marca MedClave, modelo5) a 105°C a cada 24 horas, até que a perda de massa ficasse abaixo de 0,5% em dois intervalos subsequentes.

2.1.2 Determinação da absorvância à radiação solar

A absorvância das placas foi determinada a partir de ensaios com o espectrômetro portátil Alta II (marca Vernier e imprecisão de $\pm 0,10$ nos valores absolutos de refletância solar), conforme procedimento de medição recomendado por Pereira, Hirashima e Oliveira (2021) e, também, pela norma ASTM G 173-20 (ASTM, 2020a) e ASTM E 903-20 (ASTM, 2020b). Superfícies com cores claras tendem a refletir maior quantidade de energia e, por isso, podem ser utilizadas como medida para reduzir a absorção da radiação solar dos elementos de vedação. Por este motivo, durante as análises verificou-se também os valores de absorvância das placas após serem pintadas com três demãos de tinta acrílica na cor branco neve. Tais valores foram posteriormente utilizados para avaliar se essa medida seria significativa para a melhoria do desempenho térmico dos modelos em climas quentes como àqueles previstos nas Zonas Bioclimáticas Z5, Z6, Z7 e Z8 definidas na NBR 15.220 (ABNT, 2008).

2.1.3 Determinação da condutividade térmica

A condutividade térmica das amostras foi determinada de acordo com a norma ASTM C 518 (ASTM, 2021b), com auxílio do medidor de fluxo de calor *Heat Flow Meter* (HFM) 436 Lambda, da marca Netzsch, sendo a precisão dos seus termopares de 0,01°C e sua faixa de erro pode variar de 1 a 3%. Diversos estudos fizeram uso deste equipamento para obter os valores de condutividade térmica e resistência térmica de materiais cimentícios (CARDINALE et al., 2017; WU et al., 2017; POONYAKAN et al., 2018; CUTHBERTSON et al., 2019; DIXIT et al., 2019; MENDES et al., 2019).

Na presente pesquisa a condutividade térmica das amostras foi definida pela média das medidas realizadas no intervalo de temperaturas compreendido entre 20 e 40°C, mantendo-se um ΔT constante de 10°C, mínimo recomendado pela ASTM C 518 (ASTM, 2021b). Além disso, como a presença de ar entre as superfícies da amostra e as placas do HFM pode reduzir o contato térmico entre elas e, assim, interferir nos resultados do ensaio, antes dos testes, ambas as superfícies das amostras (superior e inferior), foram polidas de forma a reduzir suas imperfeições e a garantir o paralelismo entre elas.

Outro fator que também pode influenciar nos resultados dos testes é a umidade das amostras (NEMATOLLAHI et al. 2017). Desta forma, a fim de se nivelar a quantidade de água livre presente nas amostras, antes dos testes, elas foram secas em estufa a 105°C e pesadas a cada 24 horas, até a perda de massa não excedesse 0,5% em dois intervalos subsequentes.

2.1.4 Determinação da capacidade de calor específico

A capacidade de calor específico das placas foi determinada por meio de Calorimetria Diferencial Exploratória conforme a ASTM E1269 (ASTM, 2018). Nesse método se aquece um cadinho de alumínio vazio e outro contendo amostra a uma taxa e atmosfera controladas, e então, a diferença no fluxo de calor entre os recipientes é calculada em função do tempo e da variação de temperatura.

Antes da realização dos ensaios foram retiradas amostras de cada placa, as quais foram trituradas e moídas em um moinho de bolas a fim de transformá-las em pó. Em seguida esse pó, foi seco em estufa a 105°C por 24 horas e acondicionado em recipientes hermeticamente fechados até o dia do teste.

Por fim, as amostras foram colocadas nos cadinhos de alumínio, pesadas e testadas utilizando o aparelho *Differential Scanning Calorimeters* (DSC) 60 da marca Shimadzu, para uma faixa de temperatura de 0 a 100° C, com taxa de aquecimento e resfriamento de 10°C/min e erro de + 1 µW.

2.2 Simulação computacional

Para esta etapa considerou-se uma habitação hipotética de referência, conforme a facilidade de acesso aos dados de um projeto de edificação constituída por um sistema de vedação vertical que possibilitasse a comparação de desempenho térmico das diferentes amostras de materiais construtivos analisados na etapa anterior.

2.2.1 Característica da residência hipotética

O projeto de edificação escolhido como referência, denominado “Casa Montevideu”, é de autoria da empresa *Smart* Sistemas Construtivos, localizada em Ponta Grossa - PR. Os dados gerais do projeto foram disponibilizados em seu sítio eletrônico (SMART, 2021). Trata-se de uma residência unifamiliar com 116m² de área e com pé direito de 2,8m. A disposição e divisão dos ambientes da residência são representados nas Figuras 1 e 2.

Figura 1 e 2 - Planta baixa do térreo e 2º pavimento - Casa Montevideu.



Fonte: Smart (2021). Legenda: BWC - *Bathroom Water Closet* ou Instalação Sanitária, em português.

Com auxílio do programa *SketchUp Make* versão 2018 e do *plugin* *Euclid* versão 0.9.3, a partir de um projeto de referência para edificação em *Light Steel Framing* (LSF), estrutura suporte para as placas em estudo, foi elaborado um modelo termoenergético de uma residência unifamiliar de dois andares. Posteriormente, o modelo referido foi exportado em formato idf para o programa *Energy Plus* versão 9.1.0, no qual procedeu-se a análise da influência do sistema de vedação vertical externa (SVVE) empregado nas condições de conforto térmico da edificação. A fim de se eliminar a influência da cobertura e do piso nos ganhos e perdas de calor internos à edificação, durante a simulação, tais estruturas foram consideradas como adiabáticas.

Os sistemas de vedação da edificação são quase idênticos para todos os casos estudados e se diferenciam basicamente pelo tipo de placa empregada na vedação externa: placa cimentícia ou placa de cimento álcali-ativado. No Quadro 1 é apresentado o detalhamento da composição dos sistemas utilizados e na Tabela 1 são apresentadas as dimensões das portas e esquadrias que limitam o contato entre o ambiente externo e o interior da edificação.

Quadro 1 - Fechamentos verticais e horizontais.

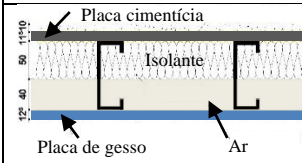
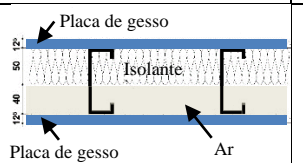
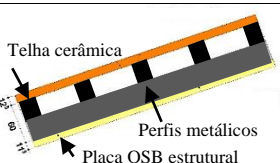
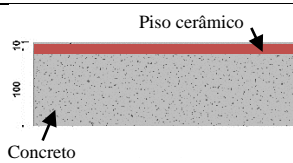
| Vedação vertical externa | Vedação vertical interna | Cobertura | Laje de piso |
|---|---|--|---|
|  |  |  |  |

Tabela 1 – Dimensões das aberturas.

| Ambiente | Tipo de Porta | Tipo de Janela |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| Suíte e Dormitórios | de correr 2 folhas (1,8x2,1m) | Não se aplica |
| Closet e Instalação Sanitária (I.S.) | de abrir (0,6x2,1m) para as I.Ss. | de abrir (0,6x0,6m) |
| Escada | Cortina de vidro (1,2x3,1m) | Não se aplica |
| Sala de TV/Jantar | de correr 2 folhas (1,8x2,1m) | de correr 2 folhas (1,5x1,2m) |
| Sala de Estar | de abrir (0,9x2,1m) | de correr 2 folhas (1,5x1,2m) |
| Cozinha | Não se aplica | de correr 2 folhas (1,5x1,2m) |

Fonte: Adaptado de Smart (2021).

2.2.2 Parâmetros de modelagem

Durante o processo de confecção da edificação de referência, cada ambiente foi modelado como uma zona térmica. Além disso, foram incluídos na simulação, os ganhos internos de calor oriundos da rotina de ocupação / uso dos equipamentos e sistemas de iluminação, conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 15.575 (ABNT 2021). Considerou-se ainda, que a edificação é naturalmente ventilada e habitada por quatro pessoas, sendo duas no quarto de casal e uma em cada quarto. Durante os períodos de ocupação dos ambientes foi considerado que todos os habitantes utilizam um conjunto de roupas leves com resistência térmica igual a 0,3 clo ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}$) e possuem uma taxa média de liberação de calor igual 120 W^1 .

Os ganhos internos de calor devido à utilização de equipamentos foram fixados em $9,18 \text{ W/m}^2$. Tal valor foi calculado levando em consideração os padrões de uso e posse de eletrodomésticos comuns à maior parte das residências brasileiras (ELETROBRAS, 2019). Na Tabela 2 são apresentados os equipamentos considerados, bem como o cálculo do consumo médio diário de cada equipamento.

Tabela 2 - Equipamentos utilizados e consumo médio.

| Aparelhos Elétricos | Média Utilização h/dia | Consumo médio diário (kWh) | Média total de utilização dos equipamentos h/dia | Consumo médio diário total (kWh) | Consumo horário W/m^2 |
|----------------------------|------------------------|----------------------------|--|----------------------------------|--------------------------------|
| Aparelho de som | 2,00 | 0,22 | 5,65 | 6,01 | 9,18 |
| Chuveiro elétrico - 4500 W | 0,53 | 2,40 | | | |

¹ Resistência térmica para roupas de uso diário de acordo com a Tabela C.1 da norma ISO 7730 (ISO 2005) e taxa de liberação de calor calculada com base nos valores previstos na Tabela 5.2.1.2 da ASHRAE Standard 55 (2017), para uma pessoa em pé, relaxada.

| | | |
|-------------------------|-------|------|
| Computador | 8,00 | 0,50 |
| Ferro elétrico - 1200 W | 0,40 | 0,08 |
| Geladeira | 24,00 | 1,61 |
| Lavadora de roupas | 0,40 | 0,06 |
| Liquidificador | 0,13 | 0,03 |
| Modem de internet | 8,00 | 0,06 |
| TV em cores - 32" (LCD) | 5,00 | 0,48 |
| Ventilador | 8,00 | 0,58 |

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2019).

A inserção da ventilação no modelo termoeenergético, foi realizada por meio do objeto *AirflowNetwork*, com controle automático por temperatura conforme previsto na NBR 15.575 (ABNT, 2021). Assim, como as janelas do projeto base são de correr e possuem duas folhas (uma fixa e a outra móvel), considerou-se um fator de abertura igual a 50%.

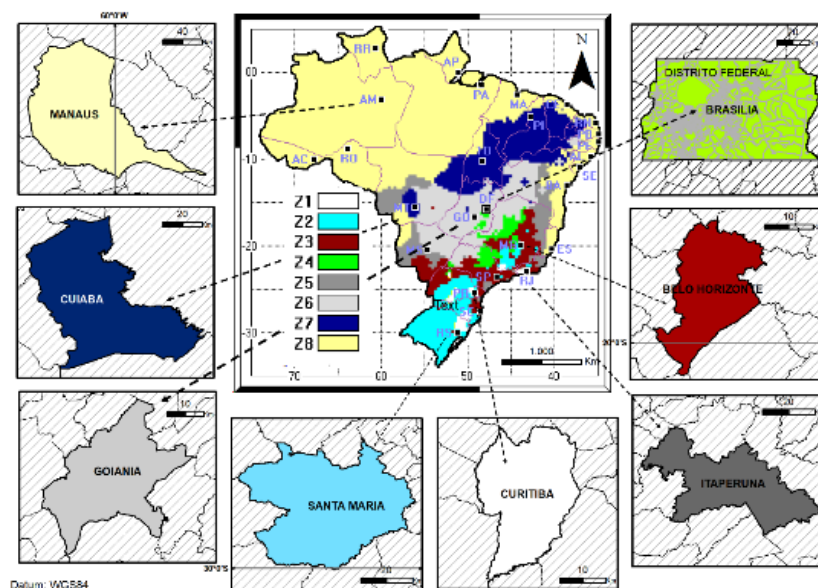
Sabe-se que as propriedades termofísicas podem variar de uma placa para outra e por isso, podem interferir diretamente na quantidade de horas de conforto térmico da edificação. Assim, a partir da residência unifamiliar hipotética elaborada anteriormente, foram modelados SVVEs específicos, para cada placa analisada. Portanto, as informações das propriedades termofísicas das placas de cimento Portland e de cimento álcali-ativado, obtidas nos ensaios previstos nos tópicos anteriores, foram utilizadas para o preenchimento dos dados de caracterização dos modelos. Para os demais materiais utilizados na composição dos sistemas de vedação foram utilizados os dados da norma NBR 15.220-2 (ABNT, 2022).

Além das propriedades termofísicas das placas, outras variáveis interferem diretamente no conforto térmico proporcionado por uma edificação, como por exemplo, variáveis climáticas como velocidade do vento, temperatura do ar externo, umidade, entre outras (ASHRAE, 2017). Por este motivo, foi verificada a influência do tipo de clima no desempenho térmico da edificação em análise. Para isso, cada uma das placas dos três tratamentos (5 PCP, 5 PCAA1 e 5 PCAA2), foram utilizadas para modelar amostras para cada uma das oito zonas bioclimáticas brasileiras, definidas segundo a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005). Assim, ao final, a partir das placas originais, foram modeladas 120 “amostras”: 5 placas x 3 tratamentos x 8 zonas bioclimáticas.

Para a realização das simulações foram selecionadas cidades representativas para cada zona bioclimática (Z): Curitiba - PR (Z1), Santa Maria - RS (Z2), Belo Horizonte - MG (Z3), Brasília (Z4), Itaperuna - RJ (Z5)², Goiânia - GO (Z6), Cuiabá - MT (Z7) e Manaus - AM (Z8) (Figura 3). Para a realização das simulações foram utilizados arquivos climáticos em formato TMY (*Typical Meteorological Year*), das oito cidades escolhidas neste estudo. Ao final da modelagem, foi obtida a variável “Horas de Conforto Térmico” para cada modelo gerado de SVVE. Em seguida, foi realizada a comparação entre os resultados obtidos para cada tipo de sistema para verificar qual deles proporciona melhor desempenho térmico para a edificação.

² Apesar de pouco usual, Itaperuna-RJ foi escolhida como representativa da Z5 de forma a aumentar a diversidade de cidades estudadas.

Figura 3 - Zonas Bioclimáticas.



Fonte: Adaptado de NBR 15.220-3 (ABNT, 2005).

2.3 Análise dos dados

Os dados obtidos na etapa anterior, simulação computacional, foram utilizados em duas análises distintas, a saber: 1) Avaliação das condições de conforto térmico propiciadas aos usuários pela utilização das placas em oito zonas bioclimáticas brasileiras; 2) Análise estatística da potencial influência da condição de cura das placas de cimento álcali-ativado e, também, das propriedades termofísicas das placas do SVVE nas horas de conforto térmico dos ocupantes.

2.3.1 Avaliação do desempenho térmico

O desempenho térmico da edificação foi avaliado por meio do somatório dos indicadores de horas em conforto térmico (HC), ou seja, a quantidade de horas em que a temperatura do ar interno não foi inferior ao valor limite mínimo e nem superior ao valor limite máximo de temperatura. Durante essa análise, foi considerada inicialmente a temperatura média da edificação e em seguida verificou-se também a temperatura nos ambientes de maior permanência (quartos e sala). Os valores limites utilizados nesta pesquisa foram calculados aplicando-se o conceito de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), para o limite de aceitabilidade de 80%.

De forma complementar a análise do indicador HC e para entender o quanto a aplicação de cada sistema de vedação influenciou nas condições de conforto no interior da edificação, o indicador temperatura interna também foi analisado. Assim, a partir dos valores horários de temperatura foram estabelecidas médias mensais de temperatura interna para cada modelo e por fim procedeu-se a comparação dessas médias.

2.3.2 Análise estatística

Como a análise gráfica dos dados, não nos permite tirar conclusões que representem a generalização das amostras para a população, se faz necessária a realização de testes estatísticos. Para a obtenção de resultados estatísticos confiáveis, é necessário que a amostra estudada seja probabilisticamente representativa da população. Porém, uma vez que a comparação das propriedades termofísicas por meio de estatística é um diferencial deste estudo, e tendo em vista que não foram encontradas na literatura referências indicando o tamanho amostral adequado, o n-amostral de 05 placas, por tratamento, foi determinado para este estudo.

Para testar a hipótese de que as placa de cimento álcali-ativado apresentam melhor desempenho térmico do que a placa cimentícia de CP, foram avaliadas placas de cada tratamento (PCP, PCAA1 e PCAA2). Inicialmente, foi realizado o diagnóstico de normalidade dos resíduos da variável resposta “horas de conforto térmico”, por meio do teste de Shapiro-Wilk. Em seguida, procedeu-se às transformações da variável, porém, ainda assim, a mesma não se ajustou à distribuição normal.

Assim, para verificar se existe diferença significativa no número de horas em conforto térmico, nas diferentes placas analisadas, foi realizado o teste não paramétrico de Friedman. Tal teste consiste em uma alternativa não paramétrica para a análise de variância (ANOVA) de experimentos divididos em blocos ao acaso. O delineamento em blocos é extremamente útil quando o material experimental possui fonte de heterogeneidade. No presente estudo, para aumentar a eficácia do teste, as simulações das três placas testadas foram classificadas quanto às diferentes zonas climáticas. Assim, as horas de conforto térmico de cada edificação modelada foi a variável dependente e os tipos de placas a variável independente (PCP, PCAA1 e PCAA2). Adicionalmente, as zonas climáticas (Z1 a Z8) foram inseridas na análise como blocos.

Por fim, considerando a grande variância nos valores médios da variável resposta entre as diferentes zonas e, para evitar que as diferenças dentro de cada zona sejam ocultadas por esta grande variabilidade, a variável resposta em questão foi analisada, separadamente, considerando cada zona bioclimática. Assim, novos testes de normalidade foram realizados. Os dados que assumiram distribuição normal foram submetidos à análise de variância (ANOVA), enquanto os dados com distribuição não normal foram analisados por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. A escolha deste último teste, se deve ao fato do mesmo ser uma solução não paramétrica destinada a comparar três ou mais populações distintas, uma vez que no presente estudo tem-se três tipos de sistema de vedação.

Todos os testes estatísticos foram realizados com o auxílio do software R (versão 3.6.1), ao nível de 5% de significância. Para visualização, gráfica dos resultados utilizou-se o *software* Microsoft Excel.

3. RESULTADOS/ DISCUSSÕES

Como resultados, apresenta-se a caracterização das propriedades térmicas para as três variações de placas (PCP, PCAA1 e PCAA2), as horas em conforto térmico propiciadas aos ocupantes pelo modelo termoenergético da edificação de referência, bem como a análise estatística dos dados obtidos.

3.1 Resultados dos ensaios de Densidade de massa aparente

Os resultados dos ensaios de densidade de massa aparente das placas são apresentados na Tabela 3. Percebe-se que as placas de cimento álcali-ativado são até 11,5% menos densas que as placas cimentícias, possivelmente porque nesse tipo de material a água não é incorporada à sua estrutura e durante o seu processo de cura acaba evaporando e dando lugar a poros, resultando na redução de sua densidade. Além disso, o fato dos resíduos de porcelanato geralmente serem menos densos que o Cimento Portland, também pode ter influenciado. Resultados semelhantes foram evidenciados em estudos anteriores como os de Colangelo et al. (2018), Maddalena et al. (2018) e Snell et al. (2017).

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de densidade ρ (kg/m³).

| Amostra | PCP | PCAA1 | PCAA2 |
|---------|-------|-------|-------|
| 1 | 1.590 | 1.470 | 1430 |
| 2 | 1.620 | 1.410 | 1400 |

| | | | |
|---------------|-------|-------|-------|
| 3 | 1.610 | 1.460 | 1500 |
| 4 | 1.640 | 1.340 | 1430 |
| 5 | 1.630 | 1.480 | 1480 |
| Média | 1.618 | 1.432 | 1.448 |
| Desvio Padrão | 19,24 | 58,01 | 40,87 |

Ao analisar os resultados é possível observar também que as PCAA2 apresentaram densidade aparente média ligeiramente superior a PCAA1. Essa diferença pode ser explicada pelo maior controle durante a cura em autoclave e, por consequência, menor perda de água. Conforme relatado por Narayanan e Shanmugasundaram (2017) quando submetidos a processos de cura que demandam maior controle os materiais álcali-ativados tendem a apresentar maiores valores de densidade em comparação à aqueles que passam processos menos controlados. Como as placas alternativas são menos densas do que aquelas de PCPs isso pode representar uma vantagem do ponto de vista econômico ao se considerar a estrutura de uma edificação, uma vez que quanto menor for o seu peso, menores serão os gastos durante sua concepção estrutural.

3.2 Resultados dos ensaios de Absortância à radiação solar

Após a realização dos ensaios de densidade procedeu-se os ensaios de absorvância à radiação solar. Como resultado, observa-se na Tabela 4 que a placa PCAA1 apresenta valor de absorvância cerca de 20% menor que o apresentado pela PCP, enquanto que o valor apresentado por PCAA2 é cerca de 10% menor. Tal fato, pode estar relacionado à tonalidade mais escura da placa cimentícia, bem como a menor presença de poros em suas superfícies quando comparadas com as demais placas. Assim como na variável densidade, as diferenças encontradas entre os valores de absorvância das placas PCAA1 e PCAA2 podem ser explicadas pela diferença do processo de cura utilizado, uma vez que quando esses processos são mais controlados podem auxiliar na redução de perda de água da amostra e, consequentemente, em sua porosidade (NARAYANAN e SHANMUGSUNDARAM, 2017).

Tabela 4 - Resultado dos ensaios de absorvância à radiação solar (α) das placas.

| Amostra | PCP | PCAA1 | PCAA2 |
|----------------|------------|--------------|--------------|
| 1 | 0,735 | 0,561 | 0,671 |
| 2 | 0,733 | 0,539 | 0,652 |
| 3 | 0,723 | 0,558 | 0,646 |
| 4 | 0,725 | 0,552 | 0,649 |
| 5 | 0,722 | 0,544 | 0,643 |
| Média | 0,728 | 0,551 | 0,652 |
| Desvio Padrão | 0,006 | 0,009 | 0,011 |

Considerando apenas os valores de absorvância apresentados pelas placas analisadas, verifica-se que a utilização da PCAA1 como elemento de vedação externa aparente pode garantir melhores condições de conforto térmico que as demais opções, quando considerado o seu emprego em climas que apresentam temperaturas mais elevadas.

Entretanto, quando as placas foram pintadas com tinta acrílica cor branco neve seus valores de absorvância reduziram significativamente e diferiram muito pouco entre si (Tabela 5). Isso possivelmente ocorreu porque a tonalidade das superfícies dos elementos é um dos fatores que mais influência na quantidade de radiação que ela absorve. Como as três amostras

foram pintadas na mesma cor as pequenas diferenças observadas na quantidade de radiação absorvida estão ligadas diretamente a porosidade de suas superfícies.

Tabela 5 - Resultado dos ensaios de absorvância à radiação solar (α) das placas após serem pintadas com tinta cor branco neve.

| Amostra | PCP | PCAA1 | PCAA2 |
|---------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,270 | 0,257 | 0,222 |
| 2 | 0,262 | 0,229 | 0,230 |
| 3 | 0,214 | 0,215 | 0,267 |
| 4 | 0,235 | 0,248 | 0,265 |
| 5 | 0,271 | 0,246 | 0,237 |
| Média | 0,250 | 0,239 | 0,244 |
| Desvio Padrão | 0,025 | 0,017 | 0,021 |

3.3 Resultados dos ensaios de Condutividade térmica

Por meio do medidor de fluxo de calor HFM 436 foram obtidos os valores de condutividade térmica das placas analisadas (Tabela 6). Nota-se que apesar das PCAA1 e PCAA2 apresentaram valores de condutividade considerados baixos, os valores apresentados pelas PCPs são até 38% menores. Tal fato é atípico para esse tipo de material e, geralmente, pode ser observado em compósitos produzidos com ligantes alternativos ao Cimento Portland ou em concretos e argamassas celular (MADDALENA et al., 2018; ABNT, 2005; WONGSA et al., 2018). Entretanto, os outros materiais empregados na produção das PCPs, como por exemplo as fibras de polipropileno, podem ter influenciado nesses resultados. Contudo, devido ao fato das placas terem sido produzidas por uma empresa privada e, por isto, a composição das mesmas não ter sido completamente detalhada, não se pode tirar conclusões sobre o porquê das PCPs apresentarem melhores resultados.

Tabela 6 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica λ (W/(m.K)).

| Amostra | PCP | PCAA1 | PCAA2 |
|---------------|-------|-------|-------|
| 1 | 0,131 | 0,196 | 0,190 |
| 2 | 0,105 | 0,230 | 0,180 |
| 3 | 0,107 | 0,175 | 0,207 |
| 4 | 0,159 | 0,197 | 0,197 |
| 5 | 0,139 | 0,237 | 0,241 |
| Média | 0,128 | 0,207 | 0,203 |
| Desvio Padrão | 0,022 | 0,026 | 0,023 |

3.4 Resultados dos ensaios de Capacidade de calor específico

Por meio do método de calorimetria diferencial exploratória, a capacidade de calor específica das placas foi determinada. Na Tabela 7 são apresentados os resultados obtidos para cada tipo de placa e conforme pode ser observado, em média as PCAA1 e PCAA2 apresentaram capacidade de calor específica igual a 737 J/Kg.K e 779 J/Kg.K, respectivamente, contra 830 J/Kg.K apresentado pelas PCPs. Os resultados encontrados para as placas são semelhantes aos relatados na NBR 15220-2 (ABNT 2005) para placas cimentícias e, também, em estudos como os de Snell et al. (2017) para materiais álcali-ativados.

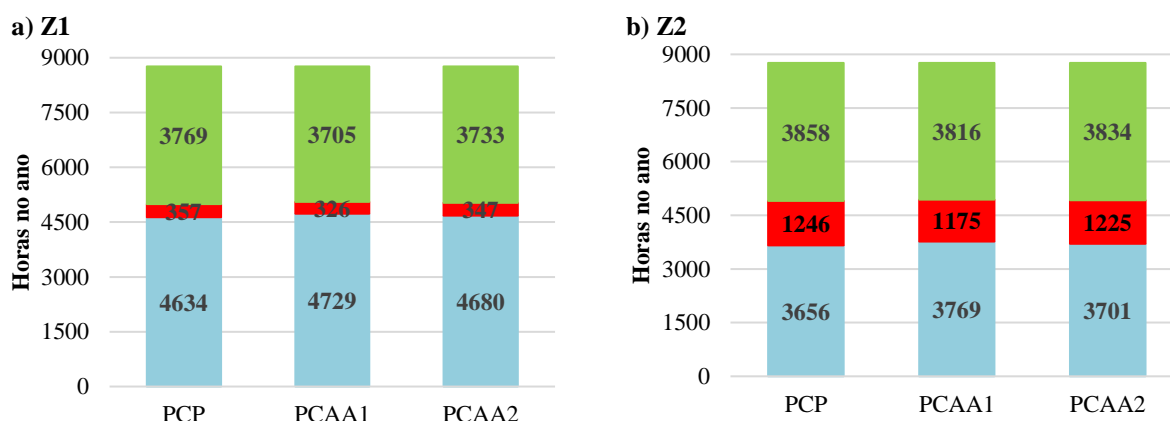
Tabela 7 – Resultados dos ensaios de capacidade de calor específico c (J / Kg.K).

| Amostra | PCP | PCAA1 | PCAA2 |
|---------------|-----|-------|-------|
| 1 | 846 | 768 | 776 |
| 2 | 770 | 708 | 792 |
| 3 | 739 | 697 | 843 |
| 4 | 878 | 740 | 738 |
| 5 | 917 | 769 | 746 |
| Média | 830 | 737 | 779 |
| Desvio Padrão | 74 | 33 | 42 |

3.5 Desempenho térmico das placas

Os resultados obtidos para os limites inferiores e superiores de aceitabilidade de 80%, conforme a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017), para as oito cidades analisadas no presente, foram utilizados como parâmetro para simular o desempenho térmico proporcionado pela aplicação de cada tipo de placa. Nas figuras 4a e 4b, observa-se que o número de horas em conforto (HC) nas cidades de Curitiba (Z1) e Santa Maria (Z2) foi menor que o número de horas de desconforto causado por frio (HDF) e calor (HDC) para os três tipos de placas analisados. O clima predominantemente mais frio associado à baixa inércia térmica do sistema de vedação proposto pode ter influenciado diretamente a temperatura interna da edificação, ocasionando assim um maior número de horas de desconforto por frio.

Figura 4 - Horas em Conforto e em Desconforto por Frio ou Calor nas zonas bioclimáticas 1 e 2.

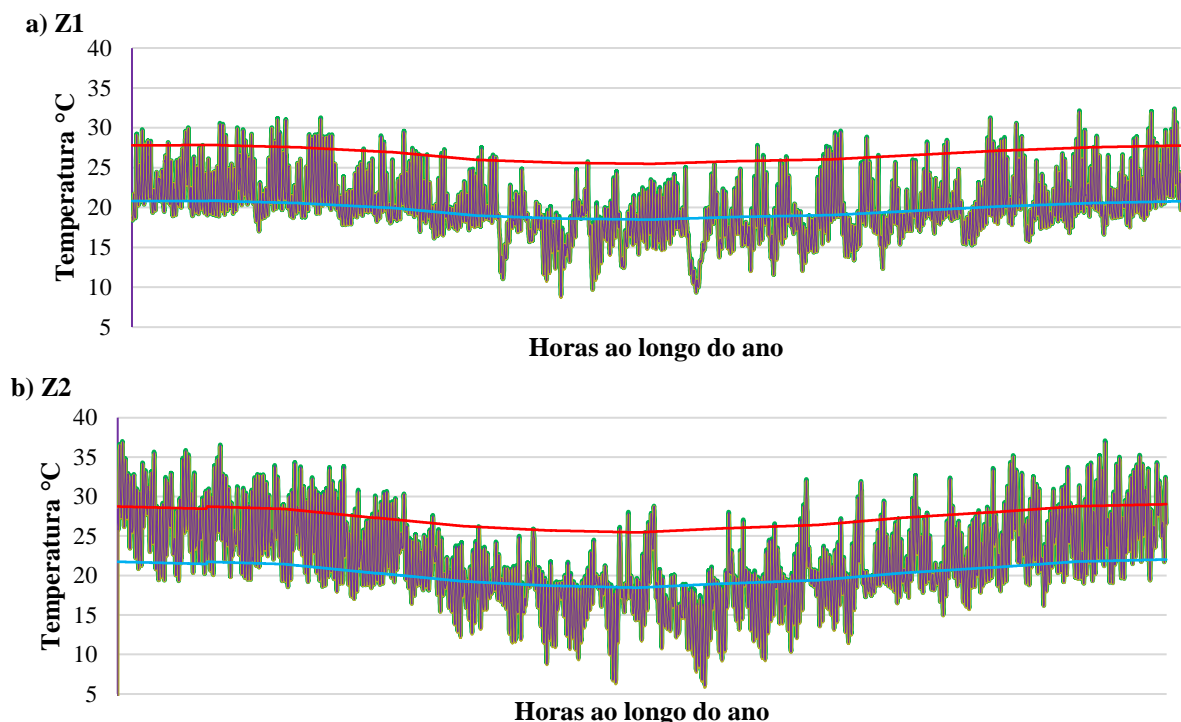


Legenda: ■ HDF - Horas em Desconforto por Frio; ■ HDC - Horas em Desconforto por Calor; ■ HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave.

Nessas zonas a PCP apresentou melhor desempenho térmico um pouco melhor que o das outras duas placas e proporcionou até 1,70% e 1,10% a mais de horas em conforto térmico em Z1 e Z2 respectivamente. Como a sua condutividade térmica é inferior à dos outros dois tipos de placa, tal fato pode estar relacionado principalmente aos seus maiores valores de absorvência à radiação solar, que pode ter contribuído para aumentar a quantidade de calor externo absorvido pelas paredes e por consequência na quantidade transmitida para o interior da edificação durante o dia, reduzindo com isso, a queda da temperatura interna nos períodos mais frios. Já as pequenas diferenças encontradas entre as PCAA1 e PCAA2, podem estar ligadas principalmente aos valores de absorvência, condutividade térmica e calor específico médios dessas placas.

A análise da amplitude térmica dessas mesmas zonas demonstrou grande variação de temperatura ao longo do período analisado. Em alguns períodos a temperatura operativa chegou a ficar quase 14°C inferior à temperatura limite mínima de conforto (Figuras 5a e 5b) estabelecida pela (ASHRAE, 2017). Apesar dessas variações de temperatura, pode-se perceber que o comportamento dos três modelos é bastante semelhante, pois suas linhas de temperatura são coincidentes em diversos pontos do gráfico. Para essas zonas as maiores diferenças foram encontradas ao se comparar as médias mensais de temperatura de PCP e PCAA1. As temperaturas obtidas por PCP foram cerca de 0,2°C e 0,1° superiores as obtidas por PCAA1 e PCAA2, respectivamente, durante quase todo o ano.

Figura 5 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z1 e Z2.



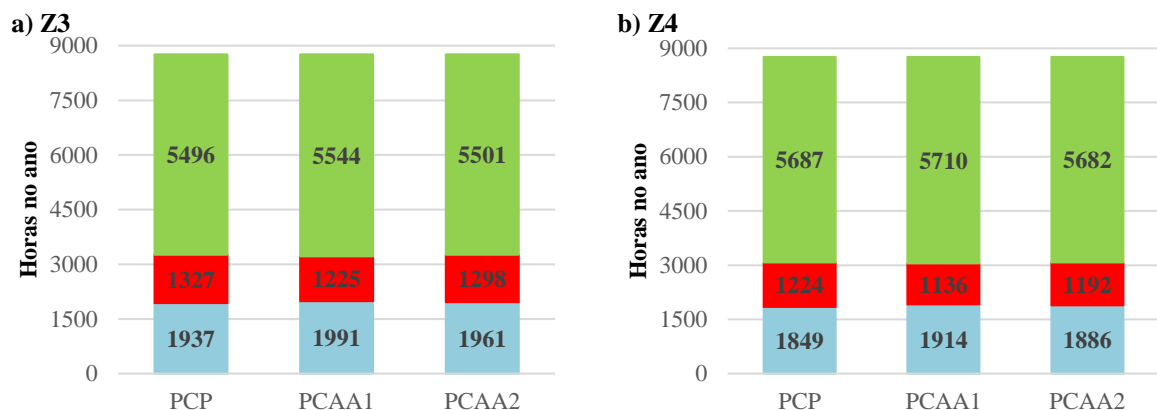
Legenda: Variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de — PCP - Placa de Cimento Portland; — PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa; — PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave e — TLINF – Temperatura Limite Inferior da faixa de conforto térmico; — TLSUP - Temperatura Limite Superior da faixa de conforto térmico.

Assim, a realização de modificações no projeto a fim de promover melhorias no isolamento térmico dos sistemas analisados poderia propiciar o aumento das horas confortáveis no interior da habitação. Uma opção viável seria a utilização de isolantes térmicos de alta densidade ou de uma camada mais espessa de isolantes como por exemplo 75 ou 100mm. Além disso, como todas as três placas possuem baixa condutividade térmica, o aumento de suas espessuras também poderia proporcionar melhores condições de conforto no interior da edificação. Entretanto, se tal aumento ocorrer em demasia pode acarretar maiores custos, devido a necessidade de novos arranjos estruturais e ao fato desse material impactar diretamente no valor final de construções em LSF.

Ao observar as Figuras 6a e 6b, percebe-se que para as cidades de Belo Horizonte (Z3) e Brasília (Z4) a aplicação dos sistemas de vedação estudados propiciaram maior nível de conforto térmico quando comparados a Z1 e Z2. Nessas zonas as horas em conforto representaram em todos os três cenários, aproximadamente 63 a 65% do período analisado.

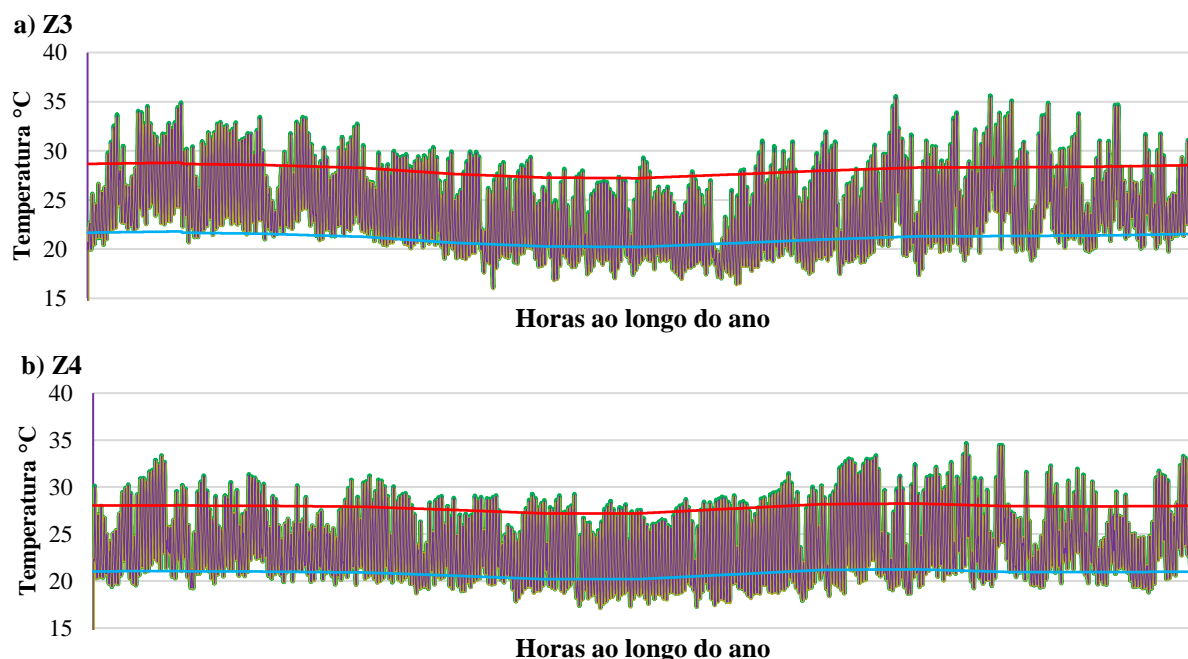
Esses resultados podem estar relacionados ao clima mais estável e às menores amplitudes térmicas ao longo do ano, conforme pode-se observar nas Figuras 7a e 7b. Nessas regiões em certas épocas do ano e durante alguns horários específicos as temperaturas mínimas internas ficaram próximos aos 15°C, enquanto as máximas ficaram pouco acima dos 35°C. Assim, de forma contrária ao que aconteceu na Z1 e Z2, os menores valores de absorvância das PCAA1, podem ter contribuído para o seu melhor desempenho térmico nessas zonas.

Figura 6 - Horas em Conforto e em Desconforto por Frio ou Calor nas zonas bioclimáticas 3 e 4.



Legenda: ■ HDF - Horas em Desconforto por Frio; ■ HDC - Horas em Desconforto por Calor; ■ HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave.

Figura 7 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z3 e Z4.



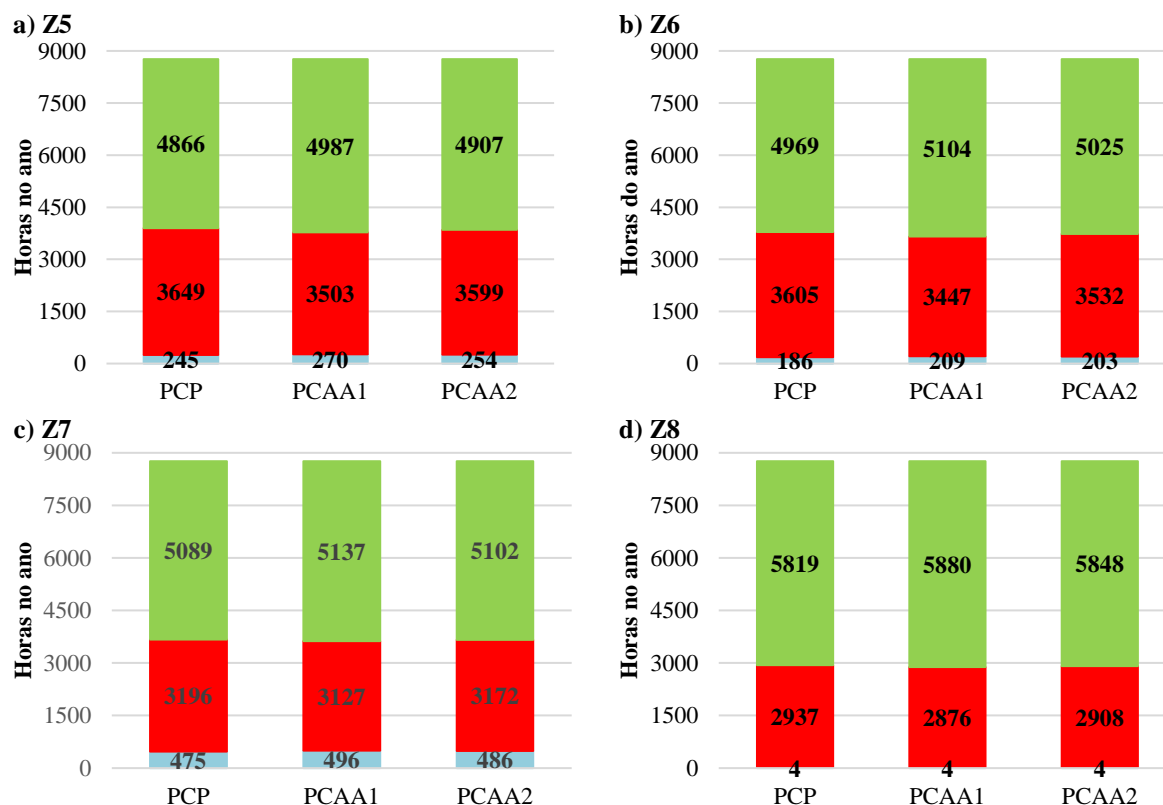
Legenda: Variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de — PCP - Placa de Cimento Portland; — PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa; — PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave e — TLINF – Temperatura Limite Inferior da faixa de conforto térmico; — TLSUP - Temperatura Limite Superior da faixa de conforto térmico.

Nessas duas zonas as temperaturas mensais médias internas oscilaram entre 21,0°C nos meses de inverno e 26,4°C nos meses de verão para PCP, PCAA1 e PCAA2, variando cerca de 0,1 a 0,15°C dependendo da opção de placa empregada, o que demonstra que o comportamento térmico desses materiais é bastante semelhante. Assim sendo, pequenas melhorias na

composição das paredes, como as sugeridas para Z1 e Z2 poderia aumentar o número de HC sem a necessidade de se realizar a pintura das placas, mantendo-as aparente.

Nas cidades de Itaperuna (Z5), Goiânia (Z6), Cuiabá (Z7) e Manaus (Z8) o número de horas de conforto térmico também foi maior que as horas de desconforto por frio e calor (Figuras 8a a 8d). Entretanto, como nessas regiões predominam temperaturas mais elevadas, em alguns períodos as temperaturas internas das edificações ficaram permaneceram acima dos 35°C, chegando a mais de 43°C na Z5 em todos os três casos. Nessas zonas, o desconforto por calor foi o principal fator que influenciou no desempenho térmico da edificação.

Figura 8 - Horas em Conforto e em Desconforto por Frio ou Calor nas zonas bioclimáticas 5 a 8.



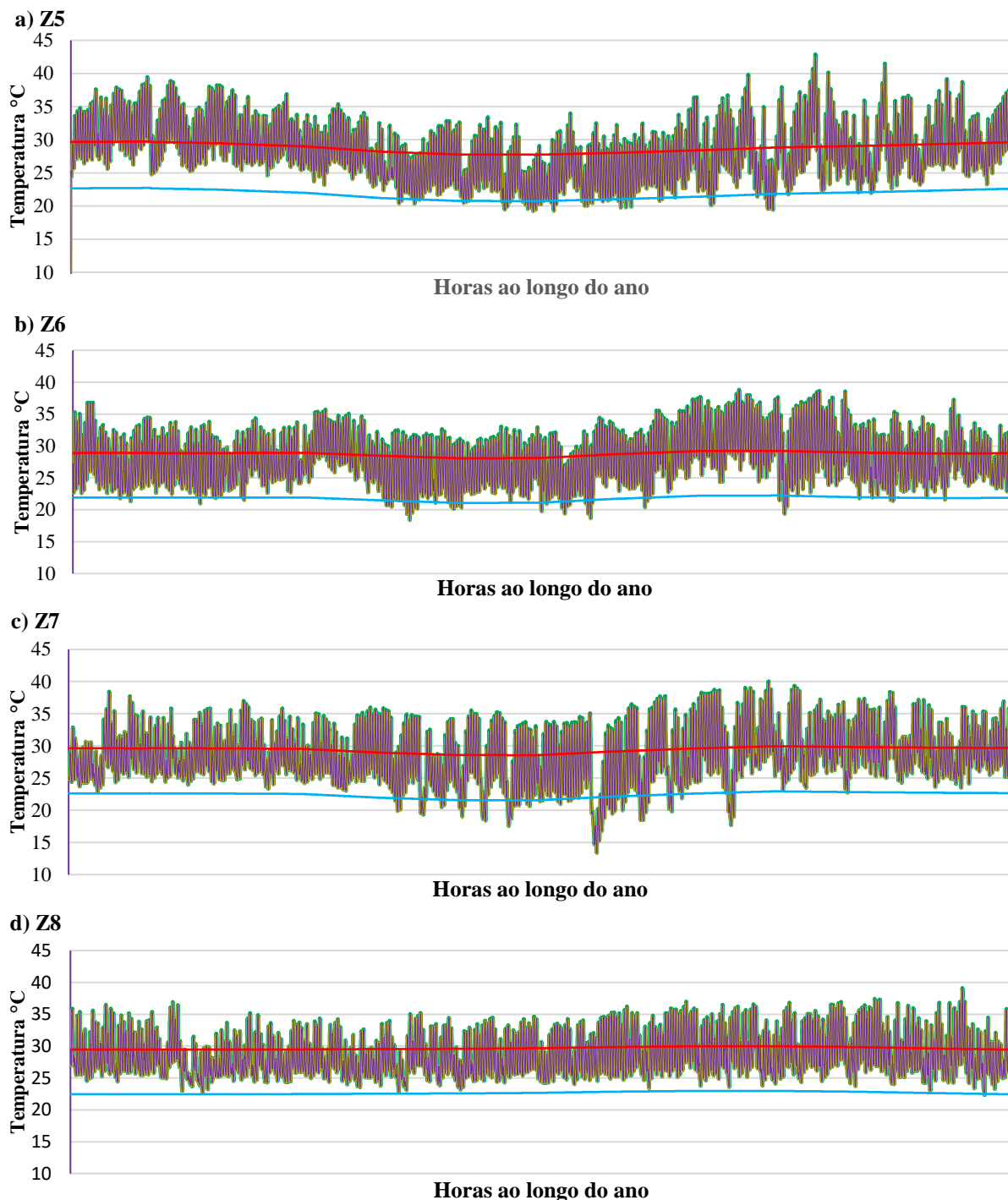
Legenda: ■ HDF - Horas em Desconforto por Frio; ■ HDC - Horas em Desconforto por Calor; ■ HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave.

Devido ao fato de possuir menor absorvância e essa propriedade ser a que mais impactou no desempenho térmico das placas, a PCAA1 obteve melhores resultados que os outros dois tipos de placas nessas zonas. Além disso como todas as placas possuem baixa condutividade térmica, essas duas propriedades podem ter colaborado para a redução do ganho de calor durante os períodos mais quentes ao promover menor absorção da radiação solar e reduzir a troca de calor entre o ambiente interno e o externo. Entretanto, como as placas possuem apenas 1 cm de espessura, em alguns períodos do ano essa redução do ganho de temperatura não foi suficiente. Ademais, pode-se observar que as horas de desconforto por frio nessas zonas foram significativamente inferiores às apresentadas nas demais localidades, chegando a apenas quatro horas de desconforto por frio na Z8.

No geral as temperaturas médias mensais nessas zonas ficaram entre 24,7°C nos meses de inverno e 31,6°C nos meses de verão, para os três tipos de sistema de vedação, com uma pequena variação entre 0 e 0,2°C dependendo do sistema utilizado. Porém, conforme apresentado nas Figuras 9a a 9d, nessas zonas, em determinados horários ao longo do ano, a

temperatura operativa ultrapassou a temperatura limite superior de conforto em mais de 12°C para todas as opções de sistema de vedação vertical analisados.

Figura 9 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z5 a Z8.



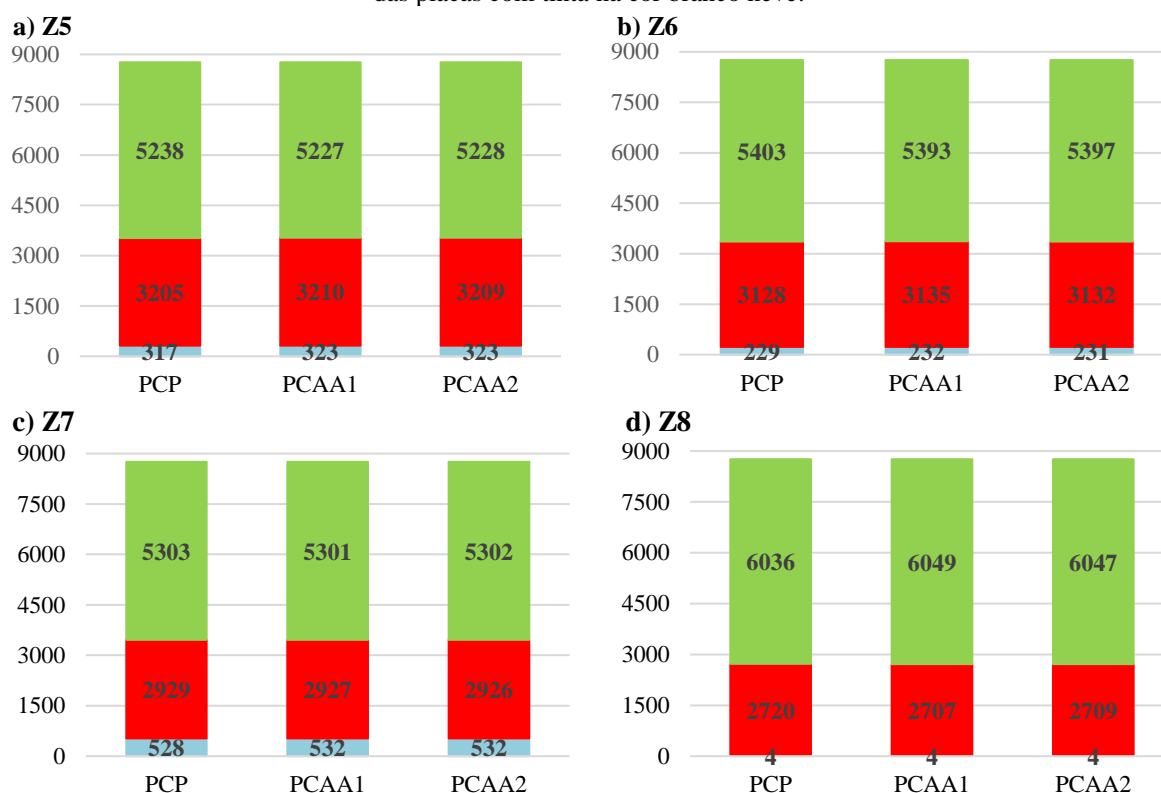
Legenda: Variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de — PCP - Placa de Cimento Portland; — PCAA1 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa; — PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave e — TLINF – Temperatura Limite Inferior da faixa de conforto térmico; — TLSUP - Temperatura Limite Superior da faixa de conforto térmico.

Adequações no projeto e a adoção de dispositivos de sombreamento das aberturas conforme recomendado pela 15220-3 (ABNT, 2005), poderiam auxiliar na melhoria das condições de conforto da edificação nessas zonas. O autosombreamento propiciado pelo curto

beiral (80 cm) parece não ter sido suficiente nestes climas. Estudos posteriores poderiam investigar a influência da estratégia complementar de sombreamento (veneziana e/ou brises) na melhoria das condições de conforto nos ambientes. Outra estratégia para tentar reduzir o ganho de temperatura é a utilização de cores claras nas fachadas da edificação, uma vez que superfícies mais claras tendem a absorver menor quantidade de radiação solar. Por este motivo como os resultados obtidos demonstram que a absorvância influenciou diretamente nas condições de conforto dentro da edificação, procedeu-se a pintura das placas para verificar se essa ação propiciaria redução das horas de desconforto por calor nas quatro zonas climáticas.

Após esse procedimento, em três das quatro zonas analisadas ocorreu um aumento de HDF e em todas as zonas houve redução de HDC. Como consequência, foi observado um aumento no número HC de até 6%, 7% e 9%, proporcionados pelas placas PCAA1, PCAA2 e PCP, respectivamente, na Z6, zona que apresentou os melhores resultados (Figura 10a a 10d). Além disso, como a placa PCP, apresenta menor condutividade térmica e maior capacidade de calor específico que as placas PCAA1 e PCAA2, após ser pintada, seu desempenho térmico se tornou ligeiramente melhor que o dessas placas nas zonas 5, 6 e 7. Assim, caso a espessura das placas seja aumentada essa melhoria poderia ficar mais evidente. Entretanto, conforme já mencionado, o aumento em demasia da espessura dessas placas pode implicar em maiores custos. Desta forma, levando isso em consideração e avaliando somente os aspectos de conforto térmico o emprego de qualquer um dos três sistemas traria praticamente os mesmos resultados, sendo mais interessante a escolha daquele que possuir o menor custo.

Figura 10 - Horas em Conforto e em Desconforto por Frio ou Calor nas zonas bioclimáticas 5 a 8 após pintura das placas com tinta na cor branco neve.



Legenda: ■ HDF - Horas em Desconforto por Frio; ■ HDC - Horas em Desconforto por Calor; ■ HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave.

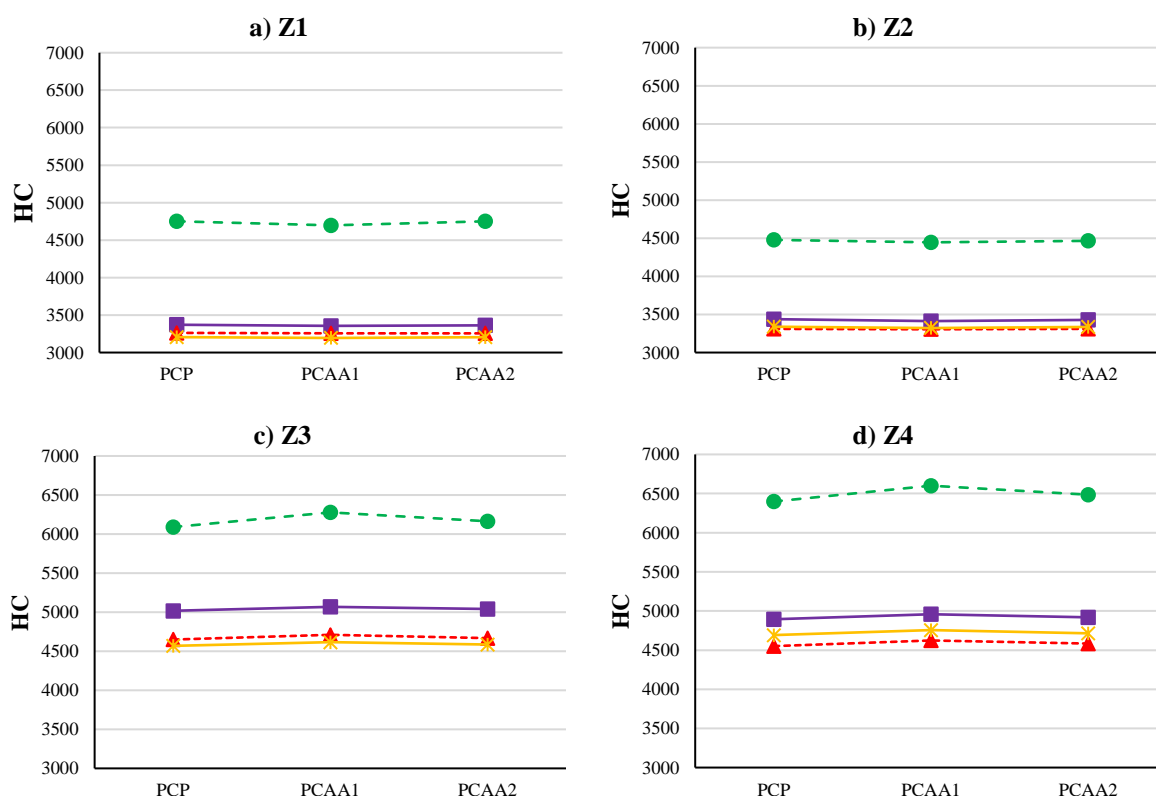
De forma geral, ao analisar o desempenho de cada tipo de sistema, em cada zona bioclimática, pode-se verificar que os sistemas de vedação vertical estudados obtiveram melhor

desempenho térmico na Z8, localidade na qual verificou-se um maior número de HC ao passo que o pior desempenho foi observado na Z1. Os percentuais de horas confortáveis ao longo do ano para as oito zonas variaram entre 42,5% para o pior cenário e 69,1% para o melhor cenário, considerando o emprego das placas pintadas. Tais resultados estão diretamente ligados aos valores de propriedades térmica de cada opção de sistema de vedação e ao fato da edificação possuir grandes áreas de abertura para ventilação, as quais em alguns ambientes como os dormitórios, chegaram a quase 25% da área de piso. Esse percentual está bem acima do mínimo recomendado pela NBR 15.575-4 (ABNT, 2021), que pode variar entre 7 e 12% dependendo da zona bioclimática.

Os resultados obtidos para temperatura média mensal da habitação apresentam comportamento semelhante quanto às variações de temperatura operativa interna, para todas as zonas, uma vez que as diferenças entre os valores máximos e mínimos são pequenas (em média de 0,2°C) para os três tipos de sistemas analisados em todas as zonas bioclimáticas. Entretanto, em alguns horários de dias específicos no verão essa diferença chegou a 0,8°C entre as temperaturas operativas obtidas pela PCP e PCAA1 e a 0,4°C entre PCAA2 e PCAA1.

Após realizar a análise do comportamento térmico da edificação buscou-se verificar como a aplicação de cada sistema poderia interferir nos ambientes de maior permanência da edificação. Conforme apresentado nas Figuras 11a a 11d nas zonas 1 a 4, apesar de haver variações nas horas em conforto térmico apresentado para cada clima, pode-se verificar que a sala foi o ambiente da edificação que apresentou melhor desempenho térmico.

Figura 11 - Horas de conforto por ambiente Z1 a Z4.



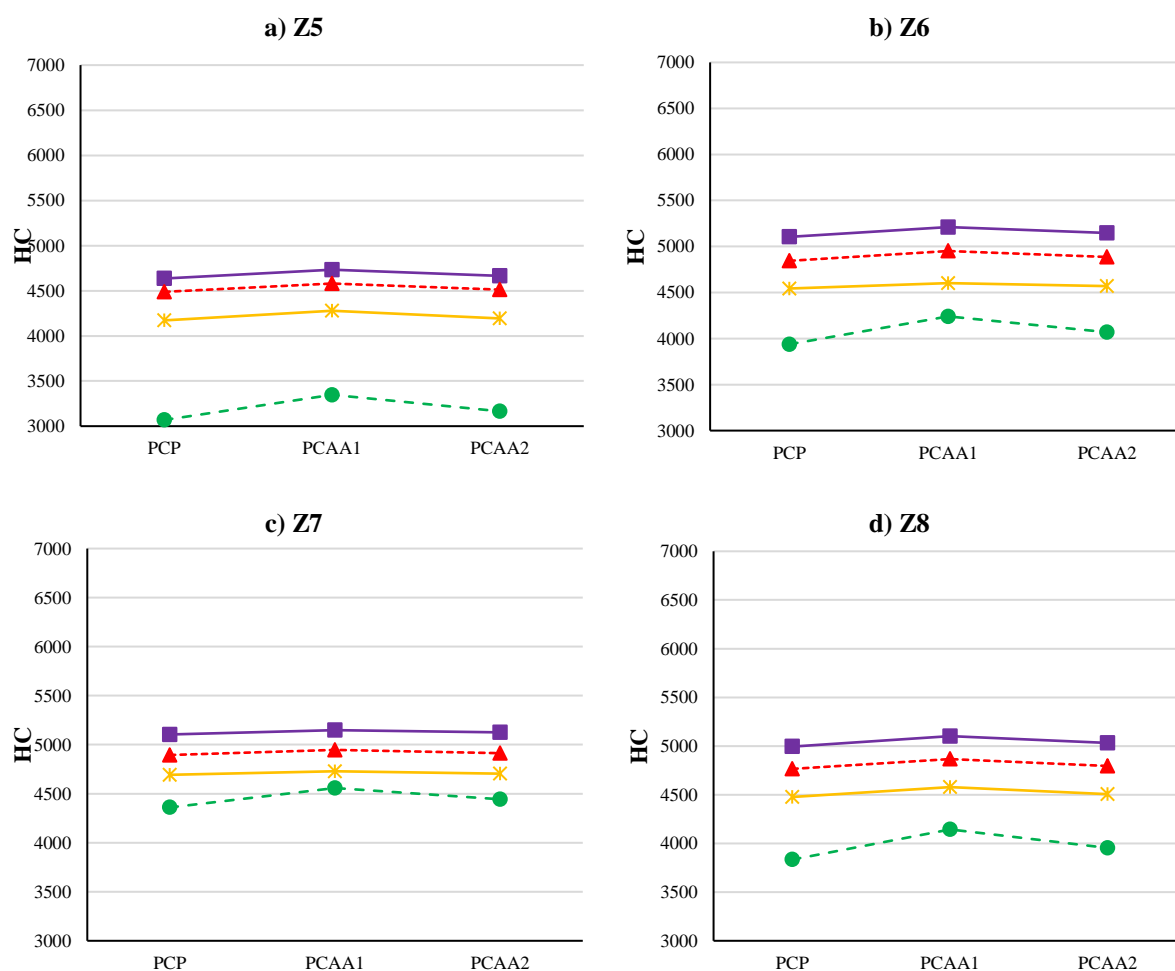
Legenda: HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave. Resultados por ambiente: -●- Sala; -■- Suíte; -▲- Quarto 1; -* - Quarto 2.

Nessas regiões as temperaturas são mais amenas e conforme demonstrado anteriormente apresentam maior número de horas de desconforto por frio em comparação às horas de

desconforto por calor. O fato da sala possuir menor percentual de abertura de ventilação em comparação aos demais ambientes e possuir algumas paredes voltadas para as direções norte e oeste (direções de maior incidência solar), possivelmente influenciou na melhor manutenção das condições de conforto nesse ambiente. A redução do percentual de aberturas ocasiona a redução do fluxo de ar que entra na edificação por meio de frestas e com isso o calor ganho pelas paredes durante o dia demora mais para ser dissipado.

Entretanto, as mesmas condições que propiciaram melhor desempenho térmico para a sala nas Z1 a Z4, podem ter influenciado de forma negativa no seu desempenho em climas mais quentes, como os apresentados pelas Z5 a Z8 (Figuras 12a a 12d). Como nesses climas os picos de temperaturas registradas ao longo do ano tendem a ser mais altos que nas demais, as paredes voltadas para direções com maior incidência solar tendem a acumular mais calor durante o dia. Adicionalmente como a sala possui menor área de ventilação, a entrada de ar para refrigeração da edificação foi prejudicada e com isso as trocas de ar entre o ambiente interno e externo ocorrem de forma mais lenta. O aumento das janelas da sala e a utilização de dispositivo de sombreamento poderia propiciar temperaturas mais amenas.

Figura 12 - Horas de conforto por ambiente Z5 a Z8.



Legenda: HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave. Resultados por ambiente: - -●- Sala; -■- Suíte; -▲- Quarto 1; -* Quarto 2.

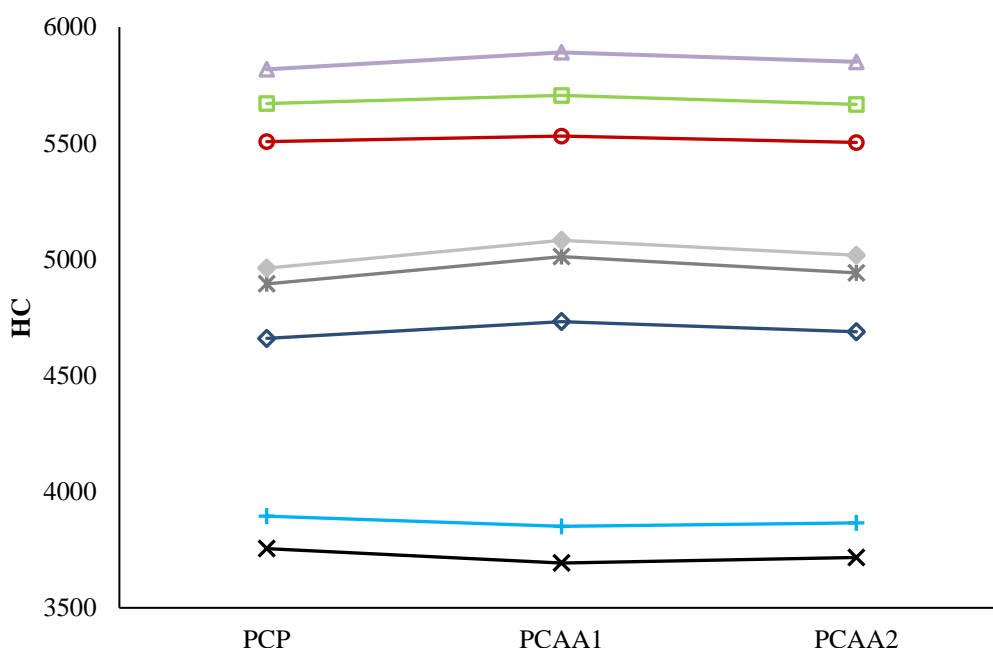
Por fim, ao se analisar todos os cenários propostos pode-se verificar que o processo de cura em autoclave pode ter favorecido o melhor desempenho da PCAA2 em climas frios quando

comparadas a PCAA1. Tais diferenças se devem principalmente as variações nos valores de absorvância das duas placas, ocasionadas provavelmente pela variação de tonalidade e porosidade das suas superfícies.

3.3 Análise estatística dos dados

A média da variável “horas em conforto térmico” variou muito entre as zonas bioclimáticas. A natureza das variáveis e dos dados, foi verificada por meio do gráfico do total de horas de conforto térmico, por placa e por zona bioclimática, o qual confirmou a grande variabilidade dos dados (Figura 13). A heterogeneidade das variâncias da variável resposta para as diferentes regiões, deve-se principalmente, às diferentes condições ambientais das zonas estudadas, tais como umidade, temperatura, radiação solar, dentre outros fatores do ambiente. O teste de Shapiro-Wilk indicou que a variável resposta não assume distribuição normal, ou seja, $p < 0,05$.

Figura 13 - Comparativo horas de conforto térmico por zona.



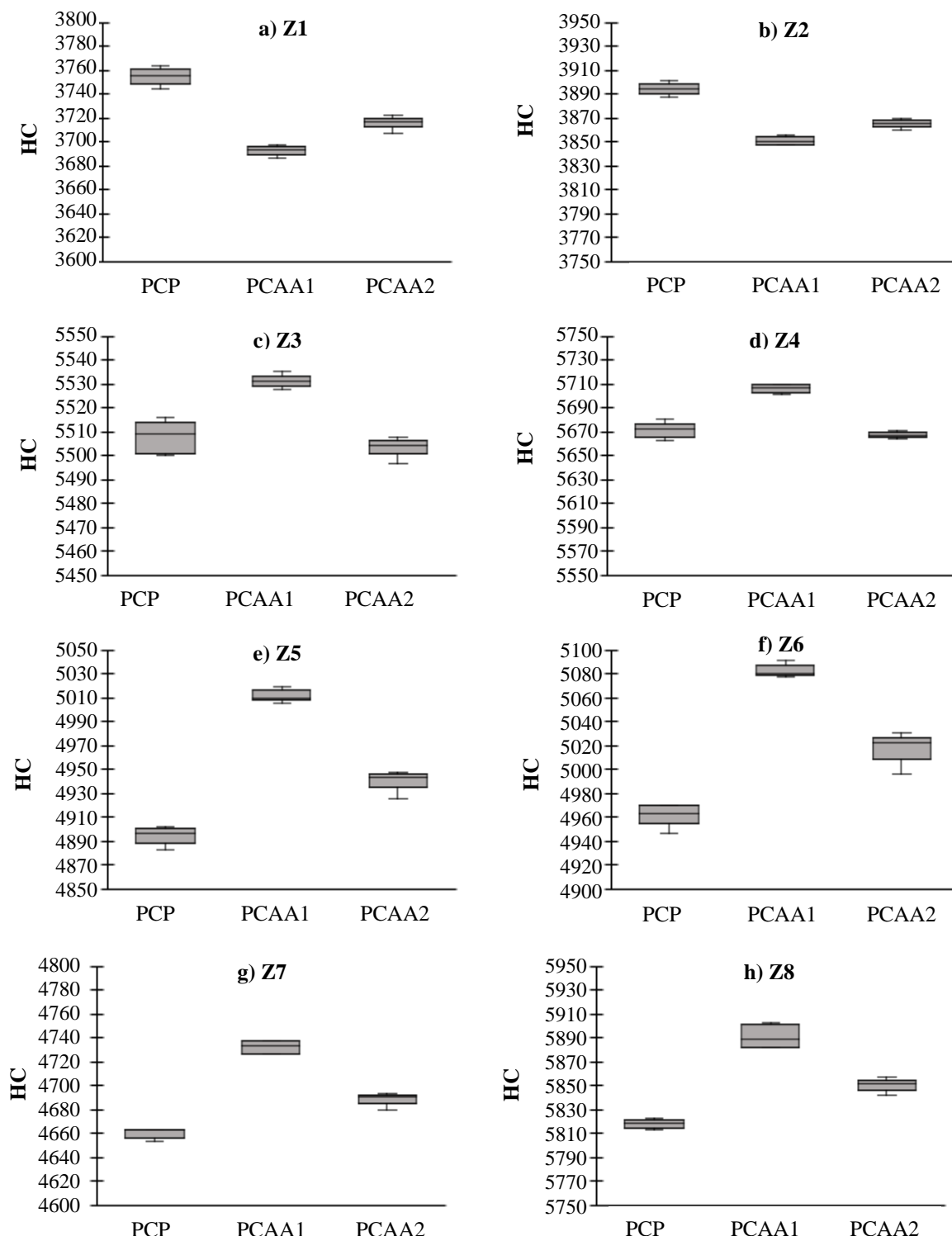
Legenda: HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave. Resultados por zona: —x— Z1; —+— Z2; —o— Z3; —□— Z4; —*— Z5; —◇— Z6; —◇— Z7; —△— Z8.

Mesmo após serem submetidos às transformações log, raiz quadrada e BoxCox, os dados continuaram apresentando resíduos com distribuição não normal (Shapiro-Wilk; $p < 0,05$) e por este motivo, foi realizado o teste não paramétrico de Friedman. Tal teste, constitui uma alternativa não paramétrica para a Anova quando existem blocos completamente aleatorizados e revelou que as placas não diferiram significativamente, quando avaliadas em conjunto, ou seja, considerando todas as zonas bioclimáticas (teste de Friedman; $p > 0,05$). Como a variância de HC entre as zonas é alta pode ser que a mesma tenha ocultado diferenças entre as placas, dentro de cada zona. Assim, adicionalmente, foi realizado novo teste de normalidade das variáveis HC por zona bioclimática, o qual constatou que nas zonas Z1, Z2, Z6 e Z8 os dados assumem distribuição normal (Shapiro-Wilk; $p > 0,05$).

A análise de variância da variável HC nas zonas Z1, Z2, Z6 e Z8 e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis realizado para os dados das zonas Z3, Z4, Z5 e Z7 revelaram

diferenças significativas entre todas as placas, quando foram analisadas separadamente, dentro de cada zona bioclimática ($p < 0,05$) (Figura 14).

Figura 14 - *Boxplot* apresentando a variação da mediana das horas em conforto por zona bioclimática.



Legenda: HC - Horas em Conforto; Amostras simuladas: PCP - Placa de Cimento Portland; PCAA1- Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em estufa e PCAA2 - Placa de Cimento Álcali-Ativado produzida a partir de resíduos de porcelanato curada em autoclave. As hastes inferiores e superiores representam os limites dos quartis e os pontos pretos são valores atípicos (*outliers*).

Portanto, a estatística paramétrica e não paramétrica aplicada ao conjunto de dados fundamentou os resultados descritos nos tópicos anteriores e confirmou o melhor desempenho

das PCPs nas cidades de Curitiba e Santa Maria e das PCAA1 nas cidades de Belo Horizonte, Brasília, Itaperuna, Goiânia, Cuiabá e Manaus. Tais análises confirmaram também que os diferentes processos de cura da PCAAs podem ter influenciado na quantidade de horas de conforto propiciadas por cada tipo de placa. Assim, nas condições climáticas mais frias (Z1 e 2), as PCPs propiciaram maior número de horas em conforto térmico, enquanto que, para os demais casos (Z3 a 8), as PCAAs obtiveram os melhores resultados. Os diferentes processos de cura da PCAAs podem ter influenciado na quantidade de horas em conforto térmico propiciadas por cada tipo de placa, o que pode contribuir para a seleção de melhores práticas de produção de acordo com o clima. Desta forma, verificou-se que o processo de cura das placas de Cimento Álcali-Ativado em autoclave (PCAA2) propiciou um número de horas em conforto térmico ligeiramente maior em relação a cura em estufa (PCAA1), apenas nas zonas mais frias (Z1 e 2). Nos demais casos (Z3 a 8), a cura em estufa propiciou um desempenho térmico significativamente melhor.

A análise estatística das HCs propiciadas pelas placas em cada uma das zonas, permitiu confirmar os resultados obtidos pela simulação computacional, uma vez que indicou que as diferenças entre as horas de conforto propiciadas pelas placas em cada uma das oito zonas climática foi significativa.

De forma geral, outros autores como Gevaudan e Srubar (2017) e Villalba et al. (2018) também encontraram boas condições de conforto e desempenho térmico ao analisar sistemas de vedação vertical de MAAs em cidades como Miami (Estados Unidos), Quito e Guayaquil (Equador) que de acordo com ASHRAE 169 (ASHRAE, 2013), possuem a mesma classificação climática das cidades de Goiânia e Curitiba. Ademais estes autores também encontram bons resultados para o emprego desses sistemas em outros climas previstos nesta norma.

Cabe ressaltar, que os resultados apresentados pelas PCAAs podem estar intimamente ligados aos seus valores de absorvância à radiação solar (a tonalidade mais clara e a maior quantidade de poros na superfície propiciou um resultado 32% menor do que àqueles apresentados pelas placas cimentícias convencionais conforme dados apresentados na Tabela 4) em relação a condição climática na qual edificação se localiza, uma vez que as placas cimentícias (PCPs) apresentaram, em média, menores valores de condutividade térmica (conforme se observa na Tabela 6) e maiores valores de capacidade de calor específico (Vide Tabela 7) e melhor desempenho nas zonas mais frias (Figura 14a e b). Para estes casos, portanto, sugere-se o uso das PCAAs em uma espessura maior, de modo a possibilitar um aumento da inércia térmica da vedação vertical nas zonas 1 e 2. Entretanto, como a espessura dessas placas é pequena e todas possuem baixa condutividade térmica, a utilização das PCAAs como vedação vertical externa de sistemas LSF, continua sendo uma boa opção, tanto do ponto de vista térmico quanto ambiental.

4. CONCLUSÃO

A presente pesquisa objetivou analisar o desempenho térmico de placas de cimento álcali-ativado produzidas a partir do resíduo de porcelanato (PCAA1 e 2) em comparação com àquelas cimentícias convencionais (PCP). Adicionalmente foi investigado se as condições de cura (1, em estufa e 2, em autoclave) das placas alternativas e o clima poderiam influenciar nos resultados. As propriedades térmicas de cinco amostras de cada uma das três variações de placas foram caracterizadas e, posteriormente, simuladas como vedação vertical externa de uma edificação residencial em LSF localizada nas oito zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220-3.

Em relação às propriedades térmicas (densidade de massa aparente, absorvância à radiação solar em sua cor original e após receber pintura na cor branca e capacidade de calor específico) e as horas em conforto (HC) propiciadas pelas placas no interior do edifício, via

simulação, as PCAAs obtiveram menores valores nos ensaios destas propriedades e um maior número de HCs nas zonas bioclimáticas de 3 a 8, do que as placas cimentícias convencionais. Apenas para a condutividade térmica que a PCP obteve um resultado 38% menor nos ensaios e um maior número de HCs na Z1 e 2, do que as PCAAs. Todavia, para as todas as opções de placa (PCP, PCAA 1 e 2), as HCs propiciadas nesses climas mais frios (1 e 2) foi abaixo de 45% ao longo do ano. Tal fato indica que para utilização desses materiais nessas zonas bioclimáticas seriam necessárias adequações na composição das paredes visando o aumento da inércia térmica. Nas Z3 a 8 a utilização da PCAA1 apresentou o melhor desempenho térmico, chegando a 67% das HCs na Z8. Todavia, para todas as placas foi possível alcançar um percentual de horas confortáveis superior a 55% ao longo do ano, nessas zonas bioclimáticas brasileiras.

Quanto ao processo de cura das placas alternativas, a opção em estufa (PCAA1) propiciou, em média, resultados ligeiramente menores nos ensaios referentes à caracterização das propriedades térmicas e também de HCs do que àquela em autoclave (PCAA2), exceto para condutividade térmica.

Desta forma, verificou-se impacto das propriedades térmicas das PCAAs e do seu processo de cura nas diferentes zonas bioclimáticas brasileiras ressaltando a importância da consideração do clima local para otimização do desempenho térmico das placas como sistema de vedação vertical e, conseqüentemente, das horas em conforto propiciadas aos ocupantes no interior da edificação. Neste contexto, a sala foi, potencialmente, o ambiente mais e menos confortável ao longo do ano, para a Z1 a 4 e Z5 a 8, respectivamente.

Diante dos resultados obtidos, avaliando os aspectos térmicos e ambientais, pode-se inferir que as PCAAs têm potencial para serem utilizadas como elementos de vedação em construções de LSF. Em algumas zonas bioclimáticas, porém, se faz necessário ajustes na composição da vedação vertical para garantir o adequado desempenho térmico da edificação.

Por fim, espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam alimentar o banco de dados acerca dos benefícios do emprego de cimento álcali-ativado em construções, bem como sobre as limitações do emprego desses novos ligantes. Adicionalmente, sugere-se, como trabalhos futuros, a investigação do desempenho térmico e/ou acústico de outras espessuras de placas álcali-ativadas produzidas com resíduo de porcelanato (08 e 12 mm) ou, até mesmo, avaliar influência do sombreamento (veneziana e/ou brises) na melhoria das condições de conforto nos ambientes em tipologia similar àquela testada no presente estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET MG), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro, bem como, ao Prof. Ricardo Fiorotti, ao Grupo de Pesquisas RECICLOS/CNPq, ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) por todo apoio prestado na realização de ensaios térmicos e, também, ao Prof. Dr. Sidnei Antônio Pianaro, do Departamento de Engenharia de Materiais, da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) pelo apoio técnico e doação das amostras placas utilizadas na presente pesquisa.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações. Parte 2 – Componentes e elementos construtivos das edificações – Resistência e transmitância térmica – Métodos de cálculo (ISO 6946:2017 MOD). Rio de Janeiro, 2022, 47p.

_____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para Habitações de Interesse Social. Rio de Janeiro, 2005, 30p.

_____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2021, 48p.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE. **Standard 55:** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: 2017, 20p.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. **ASTM C 642-21:** Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken: 2021a, 3p.

_____. **ASTM C 518-21:** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocken: 2021b, 17p.

_____. **ASTM G 173-20:** Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances – Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface. West Conshohocken: 2020a, 21p.

_____. **ASTM G 173-20E 903-20:** Standard Test Method for Solar Absorptance, Reflectance, and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres. West Conshohocken: 2020b, 17p.

_____. **ASTM E 1269-18:** Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. West Conshohocken: 2018, 6p.

BAUMBACH, M. O.; OLIVEIRA, R. D. Análise das condições de conforto térmico propiciadas por uma edificação residencial unifamiliar utilizando vedação vertical de materiais álcali-ativados. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC, v. I, n. 1, 2021, Palmas. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2021, p. 529–538.

BAUMBACH, M. O.; RAMOS, L. T. S.; BATISTA, R. P.; OLIVEIRA, R. D.; BORGES, P. H. R. Portland versus alkali-activated cement wall panels containing mine tailing as aggregate: one-story house thermal performance simulation in a Brazilian and Portuguese hot and humid climate. **MATEC Web of Conferences**, v. 274, p.03003, 2019. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927403003>.

CARDINALE, T.; GIUSEPPE, A.; FRANCO, B.; FEO, A.; PIETRO, F. Investigations on thermal and mechanical properties of cement mortar with reed and straw fibers. **International Journal of Heat and Technology**, v. 35, n. Special Issue 1, p.S375-S382, 2017. <https://doi.org/10.18280/ijht.35Sp0151>.

COLANGELO, F.; ROVIELLO, G.; RICCIOTTI, L.; FERRÁNDIZ-MAS, V.; MESSINA, F.; FERONE, C.; TARALLO, O.; CIOFFI, R.; CHEESEMANN, C. R. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymers composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p.266-272, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.11.016>.

CUTHBERTSON, D.; BERARDI, U.; BRIENS, C.; BERRUTI, F. Biochar from residual biomass as a concrete filler for improved thermal and acoustic properties. **Biomass and Bioenergy**, v. 120, p.77–83, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.007>.

DIXIT, A.; PANG, S. D.; KANG, S. H.; MOON, J. Lightweight structural cement composites with expanded polystyrene (EPS) for enhanced thermal insulation. **Cement and Concrete Composites**, v.

102, p.185-197, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.023>.

ELETROBRAS. **Pesquisa de posse e hábitos de uso de equipamentos elétricos na classe residencial**. Rio de Janeiro: Eletrobras / Procel, 2019, 358p.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023 - ano base 2022**. Brasília. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 15 jan. 2024.

GEVAUDAN, J. P.; SRUBAR, W. V. Energy Performance of Alkali-Activated Cement-Based Concrete Buildings. **American Society of Civil Engineers**, v. 2012, p.311-323, 2017. <https://doi.org/10.1061/9780784480502.026>.

HOANG MINH, D.; LE PHUONG, L. Effect of matrix particle size on EPS lightweight concrete properties. **MATEC Web of Conferences**, v. 251, p.01027, 2018. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201825101027>.

HÖLSCHER, F.; TRÜMPER, P. R.; JUHÁSZ, J. I.; SCHWENZFEIER-HELLKAMP, E. EHRMANN, A. Raising reproducibility in dye-sensitized solar cells under laboratory conditions. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 1, p. 013506, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5013181>.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA. **The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning**. Paris: OECD/IEA, 2018. Disponível em: <www.iea.org/t&c/>. Acesso em: 10 jul. 2023.

KASHANI, A.; NGO TUAN, D.; WALKLEY, B.; MENDIS, P. Thermal performance of calcium-rich alkali-activated materials: A microstructural and mechanical study. **Construction and Building Materials**, v. 153, p.225-237, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.119>.

KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**, v. 105, p.572-578, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.177>.

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; ELKORDI, A. Characteristics of concrete containing EPS. **Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering**, v. 7, p.137-165, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102676-2.00007-4>.

KUMAR, N. V.; ARUNKUMAR, C.; SENTHIL, S. S. Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 2, p. 8753-8760, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.302>.

MAAROUFI, M.; ABAHRI, K.; HACHEM, C. E.; BELARBI, R. Characterization of EPS lightweight concrete microstructure by X-ray tomography with consideration of thermal variations. **Construction and Building Materials**, v. 178, p.339-348, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.142>.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J.; HAMILTON, A. Can Portland cement be replaced by low-carbon alternative materials: A study on the thermal properties and carbon emissions of innovative cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p.933-942, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.138>.

MENDES, J. C.; BARRETO, R. R.; PAULA, A. C. B.; ELÓI, F. P. F.; BRIGOLINI, G. J.; PEIXOTO, A. F. On the relationship between morphology and thermal conductivity of cement-based composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p.103365, 2019. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2019.103365>.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. In: **Materials Today: Proceedings**,

Part of special issue of 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIVE TECHNOLOGY AND SCIENCES - iCITES 2020, v. 48, Part 4, 2022, Pekan Pahang, Malaysia. **Proceedings...** London: Elsevier, 2022, p. 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>.

NARAYANAN, A.; SHANMUGASUNDARAM, P. An Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 539-545, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.079>.

NEMATOLLAHI, B.; RANADE, R.; SANJAYAN, J.; RAMAKRISHNAN, S. Thermal and mechanical properties of sustainable lightweight strain hardening geopolymer composites. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 17, n. 1, p.55-64, 2017. <https://doi.org/10.1016/J.ACME.2016.08.002>.

PEREIRA, A. R; HIRASHIMA, S. Q. S; OLIVEIRA, R. D. Utilização do espectrômetro Alta II para obtenção da absorvância solar de superfícies opacas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17(46), p.216-228, 2021. <https://doi.org/10.3895/rt.s.v17n46.9663>.

POONYAKAN, A.; RACHAKORNKIJ, M.; WECHARATANA, M.; SMITTAKORN, W. Potential use of plastic wastes for low thermal conductivity concrete. **Materials**, v. 11, n. 10, p.01-17, 2018. <https://doi.org/10.3390/ma11101938>.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p.40-48, 2018. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2017.02.009>.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, v. 42 (10), p.1592-1600, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.007>.

SINDICATO NACIONAL DA IDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório Anual de 2019**. Disponível em: <http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf>. Acesso em: 17 dez. 2022.

SMART, SISTEMAS CONSTRUTIVOS. **Casas Catálogo**. Disponível em: <<https://www.espacosmart.com.br/casas-catalogo/>>. Acesso em: 10 maio 2021.

SNELL, C.; TEMPEST, B.; GENTRY, T. Comparison of the Thermal Characteristics of Portland Cement and Geopolymer Cement Concrete Mixes. **Journal of Architectural Engineering**, v. 23, n. 2, p. 01-10, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000240](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000240).

VILLALBA, J. L.; MACÍAS, J.; BAYKARA, H.; ULLOA, N.; SORIANO, G. Operational energy comparison of concrete and foamed geopolymer based housing envelopes. In: INTERNATIONAL MECHANICAL ENGINEERING CONGRESS AND EXPOSITION - IMECE, v. 6: Energy, 2017, Tampa. **Proceedings...** NY: ASME, 2018, p. 01-06. <https://doi.org/10.1115/IMECE2017-71837>.

WONGSA, A.; SATA V.; NEMATOLLAHI B.; SANJAYAN J.; CHINDAPRASIRT, P. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1069–1080, 2018.<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.003>.

WU, Y.; KRISHNAN, P.; YU, L.E.; ZHANG, M.H. Using lightweight cement composite and photocatalytic coating to reduce cooling energy consumption of buildings. **Construction and Building Materials**, v. 145, p.555-564, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.059>.



O conteúdo deste trabalho pode ser usado sob os termos da licença Creative Commons Attribution 4.0. Qualquer outra distribuição deste trabalho deve manter a atribuição ao(s) autor(es) e o título do trabalho, citação da revista e DOI.