

CLÁUDIO HENRIQUE PIRES E SILVA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE PLACAS DE
CIMENTO ÁLCALI-ATIVADO FABRICADAS A
PARTIR DE RESÍDUOS DE PORCELANATO EM
COMPARAÇÃO COM PLACAS DE CIMENTO
PORTLAND**

Dissertação de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil

Belo Horizonte, dezembro de 2020

CLÁUDIO HENRIQUE PIRES E SILVA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE PLACAS DE CIMENTO
ÁLCALI-ATIVADO FABRICADAS A PARTIR DE
RESÍDUOS DE PORCELANATO EM COMPARAÇÃO COM
PLACAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Prof. Dra. Raquel Diniz Oliveira
Coorientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges

Belo Horizonte, 18 de dezembro de 2020

Silva, Cláudio Henrique Pires e
S586d Desempenho térmico de placas de cimento álcali-ativado
fabricadas a partir de resíduos de porcelanato em comparação com
placas de cimento portland / Cláudio Henrique Pires e Silva. – 2020.
85 f. : il.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.
Orientadora: Raquel Diniz Oliveira.
Coorientador: Paulo Henrique Ribeiro Borges.
Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica
de Minas Gerais.

1. Cimento (Materiais de construção). 2. Cimento portland. 3.
Conforto térmico. I. Oliveira, Raquel Diniz. II. Borges, Paulo Henrique
Ribeiro. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
IV. Título.

CDD: 691.3

CLÁUDIO HENRIQUE PIRES E SILVA

**DESEMPENHO TÉRMICO DE PLACAS DE CIMENTO
ÁLCALI-ATIVADO FABRICADAS A PARTIR DE
RESÍDUOS DE PORCELANATO EM COMPARAÇÃO COM
PLACAS DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Prof^a. Dra. Raquel Diniz Oliveira
Orientadora
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges
Coorientador
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Dr. Sidnei Antônio Pianaro
Departamento de Engenharia de Materiais, UEPG

Prof. Dr. Rogério Cabral de Azevedo
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof^a. Dra. Ana Carolina de Oliveira Veloso
Dep. de Arquitetura e Urbanismo, Centro Universitário UNA - BH

Belo Horizonte, 18 de dezembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pela minha vida e por todas as bênçãos concedidas ao longo de minha trajetória.

Agradeço aos meus pais, Hélio e Geni, que me ensinaram o valor do otimismo, do trabalho e do esforço na luta de cada dia. Um abraço especial na minha avó Elmira que valoriza e me incentiva em cada conquista da minha vida.

Aos meus irmãos, Débora e Vitinho. Obrigado pela amizade e companheirismo.

Marcela (ou, Peta), minha esposa e melhor amiga. Agradeço a Deus todos os dias por você ter entrado na minha vida. Seu companheirismo foi fundamental para a conclusão deste ciclo. Deus abençoe a nossa vida e o nosso lar!

Ao Zé e à Ivone, que me receberam em sua família como filho e às minhas cunhadas e cunhados. Especialmente, agradeço ao meu “cunhado” Edgar e à Renatinha: sempre terei boas lembranças das terças e quartas, em Belo Horizonte. Obrigado, inclusive, pelas conversas e pelos jantares excepcionais.

À professora Dra. Raquel Diniz, pela dedicação como orientadora, pela paciência, correções acadêmicas, direcionamentos e pela contribuição direta para a conclusão desta etapa da minha vida. Meu sincero obrigado.

Ao professor Dr. Paulo Borges, pela confiança e por todas as oportunidades de crescimento acadêmico e profissional proporcionadas por este mestrado.

A todos os professores e profissionais do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil especialmente, ao professor Dr. Lineker, pelos direcionamentos e correções do artigo e à coordenadora do nosso curso, professora Dr. Hersília.

Aos colegas do departamento, pela convivência e compartilhamento de experiências.

À Ares Arquitetura pelo empréstimo do espectrofotômetro de Refletância Alta II.

Ao departamento de Engenharia de Materiais do Campus I do CEFET-MG e ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFOP por todo apoio prestado na realização de ensaios térmicos.

À empresa SMART Sistemas Construtivos pelo fornecimento das placas utilizadas neste estudo.

Aos membros da banca da qualificação e da banca examinadora pelas sugestões e correções.

À CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

RESUMO

As trocas térmicas entre o meio externo e as edificações podem ser influenciadas pelo tipo de sistema de vedação vertical externo (SVVE) empregado. Assim, a melhoria das suas propriedades térmicas bem como a produção de materiais novos e alternativos, podem ser importantes no nível de desempenho térmico da edificação. Cimentos álcali-ativados podem otimizar as propriedades termofísicas do concreto. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho térmico de placas de cimento Portland (PCP) e de cimento álcali-ativado (PCAA), produzidas a partir de resíduos de porcelanato. A caracterização das propriedades termofísicas das placas foi realizada por meio de ensaios condutividade térmica, capacidade de calor específico, absorvância solar e densidade de massa aparente. Os dados dos materiais serviram como *input* para simular um modelo energético por meio do *software Energy Plus*. As condições de conforto térmico proporcionadas por estes painéis (PCAA e PCP), foram analisadas em uma habitação naturalmente ventilada em *Light Steel Framing*, em oito condições climáticas diferentes. Testes estatísticos paramétricos e não paramétricos foram realizados para verificar se as placas diferem significativamente quanto às horas em conforto térmico proporcionada, de acordo com a ASHRAE 55/2017. A influência das condições de cura das placas alternativas e do clima foram avaliadas. No geral as PCAAs apresentaram menores valores de densidade e absorvância a radiação solar, entretanto as PCPs apresentaram valores de condutividade térmica e capacidade de calor específica um pouco melhores. Verificou-se que nos climas mais frios as PCPs propiciaram maior número de horas em conforto térmico. Apesar disso, nessas zonas bioclimáticas, o número de horas em conforto representou menos de 45% das horas do período analisado, predominando assim, o desconforto térmico. Para os demais climas, as PCAAs obtiveram os melhores resultados. A pintura branca das placas, nas zonas bioclimáticas mais quentes, aumentou em até 6%, 7% e 9% o percentual de horas confortáveis propiciados pela aplicação de PCAA1, PCAA2 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 uma das oito zonas climática foi significativa (ANOVA e teste de Kruskal Wallis; $p < 0,05$). 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.

PALAVRAS-CHAVE: placa de cimento álcali-ativado, placa cimentícia, influência das propriedades termofísicas, conforto térmico dos ocupantes, zona bioclimática.

ABSTRACT

The facade cladding system (SVVE) play an important role in building thermal changes when its coverage is not relevant. Thus, the building thermal properties improvement as well as new and alternative materials, can also be a major factor in its thermal performance level achieved. Alkali-activated cements can optimize concrete thermophysical properties. In this context, the purpose of this work is to analyze and compare the thermal performance of alkali-activated cement board (PCAA), produced from porcelain tile waste, versus Portland cement panel (PCP). Thermal conductivity, specific heat capacity, solar absorptivity and bulk density were measure in the samples, for characterization these plates. The characterization of the thermophysical properties of the plates was carried out through laboratory tests. The material data will be used as input to simulate a Light Steel Framing building model, through Energy Plus software. The human thermal comfort conditions provided by this panels (PCAA and PCP), will be analyzed in a naturally ventilated dwelling under eight different climatic conditions. Parametric and nonparametric statistical tests were carried out to verify whether the plates differ significantly in terms of hours of thermal comfort provided to their occupants, in accordance with ASHRAE Standard 55/2017. In general, PCAAs showed lower values of bulk density and solar absorptivity, however PCPs showed slightly better thermal conductivity and specific heat capacity values. The influence of the curing conditions of the alternative plates and the climate were evaluated. It was found that in the coldest climates the PCPs provided a greater number of hours of thermal comfort. Despite this, the number of hours in comfort represented less than 45% of the hours in the analyzed period, thus predominating hours of thermal discomfort. For the other climates, the PCAAs had better results. The use of white paint on the plates, in the hottest bioclimatic zones, increased by up to 6%, 7% and 9% the percentage of comfortable hours provided by the application of PCAA1, PCAA2 and PCP respectively. The static analysis of the comfort hours provided by the plates in each of the zones, allowed to confirm the results obtained by the computer simulation, since it indicated that the differences between the hours of comfort provided by the plates in each of the eight climatic zones is significant (ANOVA and Kruskal Wallis test; $p < 0.05$). Such analyzes also confirmed that the different healing processes of PCAAs may have influenced the amount of comfort hours provided by each type of plate.

KEYWORDS: alkali-activated cement board, cementitious panel, thermophysical properties influence, human thermal comfort, climate zone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de formação de géis com alto ou baixo teor de cálcio.....	18
Figura 2 - Interação matriz - EPS	23
Figura 3 - Fechamento sistema <i>Steel Framing</i>	25
Figura 4 - Ilustração do efeito de ilha de calor urbano	27
Figura 5 - Zoneamento bioclimático brasileiro	28
Figura 6 - Faixas de temperatura operativa aceitável, ambientes naturalmente ventilados	32
Figura 7 - Inércia térmica (amortecimento e atraso térmico)	33
Figura 8 - Fluxograma da pesquisa	37
Figura 9 - Placas estudadas.....	38
Figura 10 - Equipamentos utilizados ensaio de densidade.	39
Figura 11 - Espectrômetro Alta II	40
Figura 12 - Curva de reflexão espectral do papel branco 75 g/m ²	40
Figura 13 - Medidor de fluxo de calor HFM 436 Lambda.....	43
Figura 14 - Calorímetro DSC 60	44
Figura 15 - Vista em perspectiva do modelo termoenergético da edificação.....	45
Figura 16 - Planta baixa do térreo - casa montevidéu.	46
Figura 17 - Planta baixa do segundo piso - casa montevidéu.....	46
Figura 18 - Fechamentos verticais.....	47
Figura 19 - Fechamentos horizontais	47
Figura 20 - Zonas bioclimáticas	51
Figura 21 - Horas em conforto zonas bioclimáticas 1 e 2	60
Figura 22 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z1 e Z2.....	61
Figura 23 - Horas em conforto zonas bioclimáticas 3 e 4	62
Figura 24 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z3 e Z4.....	62
Figura 25 - Horas em conforto zonas bioclimáticas 5 a 8	63
Figura 26 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z5 a Z8.....	64
Figura 27 - Horas em conforto zonas bioclimáticas 5 a 8 após pintura das placas	66
Figura 28 - Horas de conforto por ambiente Z1 a Z4.....	68
Figura 29 - Horas de conforto por ambiente Z5 a Z8.....	69
Figura 30 - Comparativo horas de conforto térmico por zona	70
Figura 31 - boxplot apresentando a variação da mediana das horas em conforto por zona bioclimática.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos sobre as características de compósitos com eps.....	22
Tabela 2 – Dimensões das aberturas.....	48
Tabela 3 - Padrões de uso e ocupação	49
Tabela 4 - Equipamentos utilizados e consumo médio	49
Tabela 5 – Propriedades dos materiais	50
Tabela 6 - Resistência das câmaras de ar não ventiladas, com largura maior que a espessura.....	50
Tabela 7 - Resultados dos ensaios de densidade ρ (Kg/m ³)	55
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de absorvência à radiação solar (α) das placas	56
Tabela 9 - Resultado dos ensaios de absorvência à radiação solar (α) das placas após serem pintadas com tinta cor branco neve	57
Tabela 10 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica λ (w/(m.K))	57
Tabela 11 – Resultados dos ensaios de capacidade de calor específico c (J/Kg.K)	58
Tabela 12 - Temperatura neutra e limites máximos e mínimos de temperaturas mensais	58

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação entre o cimento portland e ligantes alternativos.	17
Quadro 2 - Características dos fechamentos mais comercializados no brasil.....	25
Quadro 3 - Valores admissíveis para a transmitância térmica	29
Quadro 4 - Valores admissíveis para capacidade térmica.....	30
Quadro 5 - Critérios para avaliação de desempenho térmico para condições de verão	30
Quadro 6 - Critérios para avaliação de desempenho térmico para condições de inverno.....	30
Quadro 7 - Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos.....	35

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Al ₂ O ₃	Alumina
ANOVA	Análise de Variância
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Ca	Cálcio
clo	Unidade de medição da resistência térmica da roupa
CO ₂	Dióxido de carbono
CP	Cimento Portland
CT	Capacidade Térmica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EPS	<i>Expanded polystyrene</i> ou Poliestireno Expandido
GEE	Gases do efeito estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
LSF	<i>Light Steel Framing</i>
MAA	Material álcali-ativado
MMA	Ministério do Meio Ambiente
met	Unidade utilizada para descrever a energia produzida por unidade de área de uma pessoa em repouso
OSB	<i>Oriented Strand Board</i>
PCAA	Placa de cimento álcali-ativado
PCP	Placa de cimento Portland
R	Resistência Térmica
SVVE	Sistema de vedação vertical
SiO ₂	Sílica
TMY	<i>Test Meteorological Year</i>
U	Transmitância Térmica

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
1.1.1. Objetivos específicos	14
1.2. JUSTIFICATIVA	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1. UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALCALI-ATIVADOS COMO SUBSTITUTO DO CIMENTO PORTLAND	16
2.1.1. Classificação dos MAAs em relação ao seu teor de cálcio	17
2.1.2. Desempenho térmico dos materiais álcali-ativados	19
2.2. UTILIZAÇÃO DE EPS COMO AGREGADO ALTERNATIVO NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE BAIXA DENSIDADE.	20
2.3. SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL EM <i>LIGHT STEEL FRAMING</i>	23
2.4. DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES	26
2.4.1. Avaliação do desempenho térmico das edificações	29
2.4.2 Propriedades termofísicas dos materiais.....	32
3. METODOLOGIA.....	37
3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS SELECIONADAS	37
3.1.1. Determinação da densidade de massa aparente	38
3.1.2. Determinação da Absortância da radiação solar	39
3.1.3. Condutividade térmica	42
3.1.4. Capacidade de calor específica.....	44
3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	45
3.2.1. Característica da residência hipotética	45
3.2.2. Parâmetros de modelagem: padrões de uso e ocupação do edifício, propriedades termofísicas e variáveis climáticas.	48
3.3. ANÁLISE DOS DADOS	52

3.3.1. Avaliação do desempenho térmico.....	52
3.3.2 Análise estatística	53
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1. DENSIDADE DE MASSA APARENTE	55
4.2. ABSORTÂNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR.....	56
4.3. CONDUTIVIDADE TÉRMICA.....	57
4.4. CAPACIDADE DE CALOR ESPECÍFICO	58
4.5. DESEMPENHO TÉRMICO DAS PLACAS.....	58
4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	69
5. CONCLUSÃO.....	73
REFERÊNCIAS	75
APÊNDICE A – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL INTERNA DOS MODELOS POR ZONA BIOCLIMÁTICA	85

1. INTRODUÇÃO

A produção de Cimento Portland (CP) é responsável por cerca de 5% das emissões totais de gases do efeito estufa (GEE) e 8% das emissões de CO₂ (PROVIS; BERNAL, 2014). Estima-se que para cada tonelada de cimento produzida são gerados cerca de 0,9 toneladas de CO₂ (HASANBEIGI *et al.*, 2010). As altas emissões associadas à fabricação desse ligante se devem, principalmente, ao processo de calcinação calcária para a produção do clínquer, que ocorre a cerca de 1500° C e demanda enorme quantidade de energia (SNIC, 2012).

Neste sentido, devido ao forte impacto ambiental ocasionado pela construção civil, pesquisadores têm envidado esforços para promover a descarbonização do cimento por meio da substituição do clínquer por produtos alternativos que possuam baixa emissão de CO₂ durante seu processo de fabricação. Uma alternativa que têm se mostrado viável é a utilização de materiais álcali-ativados (MAAs) (HÖLSCHER *et al.*, 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 aluminosilicato, o que fornece um produto com propriedades aglutinantes semelhantes às do CP (PROVIS; BERNAL, 2014). 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 a melhoria do seu desempenho térmico (DUXSON *et al.*, 2007a).

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 33% de todo consumo do setor residencial. (EPE, 2018). 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 utilizados no sistema construtivo tradicional, 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).

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 (VAN DEVENTER *et al.*, 2012), sua utilização poderia garantir uma vantagem adicional para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil.

Desta forma, na presente pesquisa as propriedades termofísicas de placas de cimento álcali-ativado (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. Foi verificado ainda, 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.

Por fim, baseando-se na premissa de que a energia necessária para manutenção do conforto térmico dos ocupantes possui relação direta com as propriedades termofísicas dos materiais utilizados na edificação (KUMAR *et al.*, 2018) e com o intuito de avançar no conhecimento do desempenho térmico dos materiais de construção, a presente pesquisa visa responder às seguintes perguntas: *Sistemas de vedação vertical que utilizam placas de cimento álcali-ativado propiciam um maior número de horas em conforto térmico aos ocupantes quando comparados a sistemas que utilizam placas de cimento Portland? Esses resultados são influenciados pela condição de cura das PCAAs?*

1.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho térmico das placas de cimento álcali-ativado, em comparação com as placas de cimento Portland, sob diferentes condições climáticas.

1.1.1. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho consistem em:

- a) Obter os valores de condutividade térmica, capacidade de calor específica, absorptância à radiação solar e densidade de massa aparente das placas analisadas.
- b) Avaliar as condições de conforto propiciadas aos usuários pela utilização das placas para as oito zonas bioclimáticas brasileiras definidas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b).

c) Avaliar estatisticamente se existe influência da condição de cura das placas de cimento álcali-ativado nas horas de conforto térmico segundo a ASHRAE 55 (2017).

d) Avaliar estatisticamente a influência das propriedades termofísicas das placas nas horas de conforto térmico segundo a ASHRAE 55 (2017).

1.2. JUSTIFICATIVA

A demanda por novas edificações tende a crescer com o aumento populacional e ao mesmo tempo, o aumento do poder aquisitivo e das exigências em relação às expectativas térmicas de atendimento dos ambientes juntamente com o avanço tecnológico impulsionam a busca por um maior número de horas em conforto no interior das edificações, preferencialmente, com o menor dispêndio de energia possível. Todos estes fatores associados ao fato de que os recursos naturais estão cada vez mais escassos, evidenciam a necessidade de se implementar novos produtos alternativos no ramo da construção civil (PROVIS *et al.*, 2015; UNDESA, 2018; USGS, 2015).

Neste contexto, o reaproveitamento de resíduos que seriam descartados para a produção de produtos sustentáveis, que permitam a manutenção de condições de conforto adequadas no interior das edificações, se mostra como algo bastante promissor.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS ALCALI-ATIVADOS COMO SUBSTITUTO DO CIMENTO PORTLAND

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 3,99 bilhões de toneladas desse insumo (SNIC,2019).

Entretanto, essa produção em grande escala consome elevada quantidade de recursos naturais não-renováveis (como calcário e argila) e resulta em fortes emissões de GEEs (PROVIS *et al.*, 2015). Assim, a substituição do CP por ligantes menos poluentes têm se mostrado como medida necessária para a promoção do desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, por razões de desempenho técnico e ambiental, os ligantes conhecidos como materiais álcali-ativados (MAAs) vêm ganhando crescente interesse e reconhecimento por parte dos pesquisadores (PROVIS, 2014).

Tais materiais possuem propriedades aglutinantes semelhantes às do CP e se originam da interação de um ativador alcalino com um aluminosilicato. São caracterizados por serem cristalograficamente desordenados, multifásicos, heterogêneos em todas as escalas de comprimento e formados na maioria das vezes por precursores de difícil caracterização, como por exemplo cinzas volantes (PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS, 2018).

Como os MAAs são geralmente produzidos a partir de resíduos industriais e agrícolas, possuem reduzido consumo energético, baixa emissão de gases tóxicos na atmosfera e custo competitivo (MCLELLAN *et al.*, 2011). A produção desses ligantes pode gerar até 5 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 produzida (HÖLSCHER *et al.*, 2018). Além disso, 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 (DUXSON *et al.*, 2007a; KASHANI *et al.*, 2017).

Porém, apesar dos inúmeros benefícios, fatores como baixa trabalhabilidade, maior nível de retração e risco potencial à saúde humana, têm desestimulado a produção desse material nos canteiros de obras, o que restringe seu emprego apenas à produção de pré-

moldados (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2005). No Quadro 1 são evidenciadas as vantagens e desvantagens desses ligantes quando comparados a outros existentes.

Quadro 1 - Comparação entre o cimento Portland e ligantes alternativos.

	Cimento Portland	Cimento de aluminato de cálcio	Cimento Sulfoaluminato de Cálcio	Pasta ativada por álcalis (FA,MK, BFS)	Cimento supersulfatado
Fase Primária de CO₂ (g / g)	C3S = 0,578	CA = 0,279	C4A3 S = 0,216 C2S = 0,511	Ativador NS = 0,361	0
Temperatura de clinquerização	~ 1450 ° C	> 1450 ° C	1250 ° C	Cinzas volantes / Escória: N / D Metakaolina: 800 ° C	N / D
Vantagens	- Longa história - Composições padrão	- Rápido Ganho de Força - Resistente ao sulfato - Sem reação álcali-sílica - Resistência à abrasão	- Baixo CO ₂ - Baixa energia - Rápido Ganho de Força - Compensação de drenagem	- Baixo CO ₂ - Baixo calor de reação - Resistente ao calor e ácido	- Baixo calor de hidratação - Durável em ambientes agressivos
Desvantagens	- Alta energia - Alto CO ₂ - Ganho de resistência inicial limitada - Pobre em ambientes agressivos	- Perda de força na conversão de hidratos metaestáveis em estáveis	- Durabilidade não comprovada - Às vezes expansiva	- Às vezes ganho lento de resistência - Solução de ativação cáustica - Reengenharia desafiadora - Durabilidade não comprovada	- Ganho de força lenta

Fonte: Adaptado de (JUENGER *et al.*, 2011).

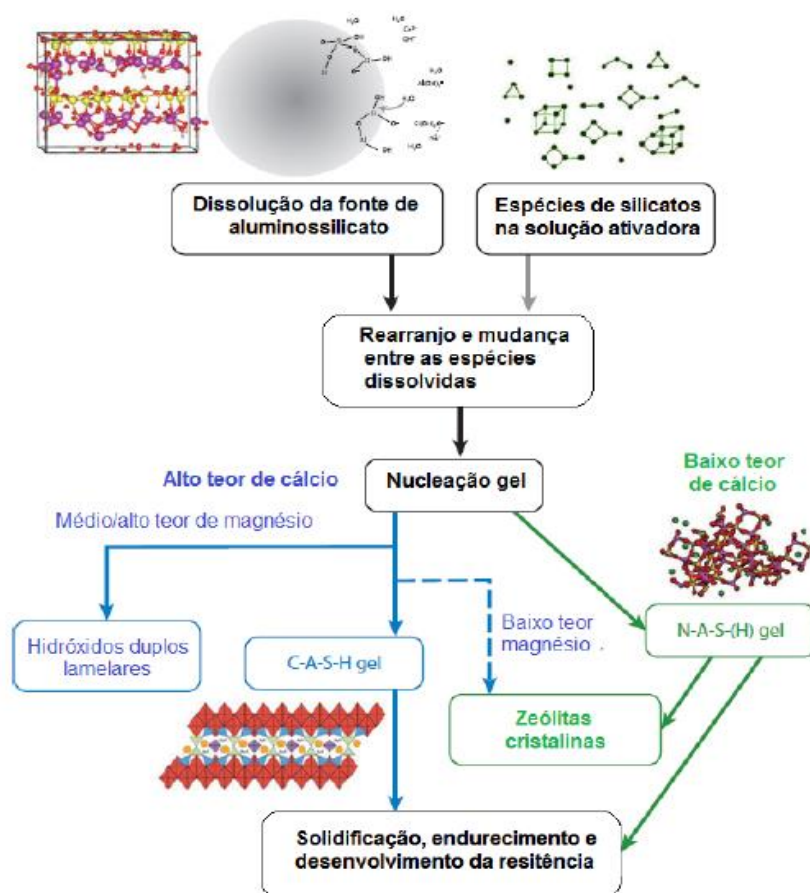
No entanto, verifica-se avanços nesta área, e o entendimento que foi desenvolvido até o momento fornece indicações de que os MAAs tem, de fato, o potencial de utilização em larga escala na indústria da construção, bem como em outras aplicações desse nicho (DUXSON *et al.*, 2007b). Desta forma, a profunda investigação das propriedades físicas e químicas desses novos ligantes pode permitir a eliminação desses entraves e garantir a completa viabilização do seu uso, uma vez que por ser menos impactante ao meio ambiente e por possuir elevado potencial de utilização em larga escala, tal tecnologia representa um promissor substituto ao CP (DUXSON *et al.*, 2007b; STAVRINIDES, 2010).

2.1.1. Classificação dos MAAs em relação ao seu teor de cálcio

O termo “material álcali-ativado” é utilizado para definir os materiais 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 (VAN DEVENTER *et al.*, 2010; PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS, 2018). Entretanto como tal nomenclatura é muito abrangente essa categoria de material é geralmente dividida em dois sistemas de acordo com a composição química de seus

precursores (Figura 1). O primeiro sistema é composto por precursores ricos em cálcio (Ca), sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) 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 (PROVIS *et al.*, 2015). Geralmente esse tipo de gel coexiste com produtos secundários de hidróxidos duplos lamelares, formados quando há presença de magnésio (PROVIS; BERNAL, 2014). 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 (PROVIS *et al.*, 2015). Nesse gel, diferente do que ocorre com o tipo C-A-S-H, a água não é um elemento estrutural importante (PROVIS; BERNAL, 2014).

Figura 1- Processo de formação de géis com alto ou baixo teor de cálcio



Fonte: Traduzido de Provis e Bernal (2014).

Apesar dos materiais álcali-ativados serem divididos em dois sistemas distintos, é possível que os dois tipos de géis coexistam em materiais formados por sistemas com baixo e alto teor de cálcio, dependendo da combinação de precursores e ativadores utilizada (PROVIS *et al.*, 2015). Entretanto, a estabilidade dessa coexistência em condições altamente alcalina

ainda deve ser estudada, uma vez que nesse ambiente o Ca tende a degradar o gel do tipo N-A-S-H em favor da formação de C-A-S-H (GARCIA-LODEIRO *et al.*, 2011).

2.1.2. Desempenho térmico dos materiais álcali-ativados

As características dos componentes que integram os sistemas de vedação de uma edificação são 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 (VILLAQUIRÁN-CAICEDO *et al.*, 2015; SNELL *et al.*, 2017; MADDALENA *et al.*, 2018).

No estudo de Liu *et al.* (2014) a condutividade térmica e as propriedades mecânicas de três amostras de concretos leve com espuma agregada, produzidas com 20% de cinza de óleo de palma e 80% de cinzas volantes classe-F de densidades iguais a 1300, 1500 e 1700 kg / m³, e espessura igual a 55mm, foram avaliadas. Os autores observaram que o valor da condutividade térmica do concreto com a menor densidade foi de 0,47 W/m.K, 22% inferior aos valores dos materiais de paredes convencionais e 48% inferior ao de blocos e tijolos. Os valores de condutividade térmica dos concretos com densidade de 1500 e 1700 kg / m³ foram de 0,50 e 0,58 W/m.K respectivamente.

Snell *et al.* (2017) analisaram a condutividade térmica e capacidade de calor específica de amostras de concreto com diferentes percentuais de substituição de CP por cinzas volantes: 100%, 85%, 65%, 45%, 25%, 15% e 10%. Eles verificaram que a medida em que o percentual de substituição aumentava os valores de condutividade térmica e capacidade de calor específica diminuía, sendo que para o percentual de 100% de substituição as amostras de CP apresentavam valores quase duas vezes maiores que os valores das amostras de cinzas volantes, 1,07 W/m.K e 0,57 W/m.K respectivamente.

Em seu estudo, Maddalena *et al.* (2018) compararam o desempenho térmico de sete ligantes cimentícios compostos por diferentes misturas de metacaulim, hidróxido de cálcio, sílica ativa e nano-sílica com o desempenho do cimento Portland e verificaram que devido à alta porosidade (0,48-0,74 µm), os valores de condutividade térmica das amostras compostas por estes novos ligantes (0,05 a 0,26 W/mK) foram cerca de 58-90% inferiores aos obtidos para as amostras compostas por CP (0,48 W/mK). Além disso foi observado que a adição de nano partículas de sílica tem um efeito benéfico na condutividade térmica e que este efeito é atribuído

à menor faixa de tamanho de partícula de nano-sílica e a sua maior área de superfície o que aumenta a porosidade da amostra.

No estudo de Narayanan e Shanmugasundaram (2017) buscou-se avaliar o desempenho térmico de uma argamassa a base de cinza volante, submetida a quatro diferentes regimes de cura: temperatura ambiente, câmara de calor, forno de ar quente e autoclave. As amostras submetidas ao processo de cura ambiente foram utilizadas como amostras de controle. Como resultados da pesquisa, autores verificaram um aumento da densidade aparente das amostras curadas em autoclave (2,83%) e na câmara de calor (8,59%) e uma redução na densidade das amostras curadas no forno de ar quente (5,31%). Uma diminuição na condutividade térmica de 27%, 37% e 60% foi obtida durante a cura da amostra em autoclave, câmara de calor e forno de ar quente, respectivamente. Além disso, foi constatado um aumento na resistência à compressão de todas as amostras. Por fim, foi verificado que a cura no forno de ar quente possibilitou a obtenção dos melhores resultados.

Marín-López *et al.* (2009) compararam as propriedades mecânicas e térmicas de um concreto à base de metacaulim às de um concreto fabricado com Cimento Portland. Eles observaram que a resistência à compressão do concreto à base de metacaulim variou entre 30 e 35 MPa aproximadamente, superando os valores encontrados para o concreto de cimento Portland, entre 10 e 20 MPa. Os valores encontrados para a condutividade térmica e densidade do cimento álcali-ativado foram de 0,6 W/mK e 2550 Kg/m³ respectivamente e para o concreto de cimento Portland foram de 1,3 W/mK e 2780 Kg/m³, o que demonstrou que as propriedades térmicas e mecânicas das amostras de concretos produzidos com esses materiais eram superiores às propriedades da amostra de concreto a base de cimento Portland.

2.2. UTILIZAÇÃO DE EPS COMO AGREGADO ALTERNATIVO NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS DE BAIXA DENSIDADE.

Na medida em que a população mundial e o poder aquisitivo aumentam, a necessidade de moradias com elevada qualidade vem se tornando uma realidade bem recorrente. Entretanto, a exigência por edificações mais funcionais e energeticamente eficientes, acarreta maior consumo de recursos naturais e, por isso, a utilização de resíduos ou materiais recicláveis têm se tornado cada vez mais comum. Ademais, devido a necessidade de manutenção das condições de conforto no interior dessas edificações, o consumo de energia elétrica vêm aumentando a cada ano (EIA, 2017), o que resulta na necessidade de se desenvolver novos materiais que

possam atenuar ou reduzir esse consumo de energia. Uma alternativa para isso, pode ser a utilização de concreto leve.

Por possuir menor densidade que o 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 (KAYA; KAR, 2016) (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 (MEDRI *et al.*, 2015; NEMATOLLAHI *et al.*, 2017; HOANG MINH; 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; 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 (Tabela 1). 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; KAR, 2016; HOANG MINH; LE PHUONG, 2018).

Tabela 1 – Estudos sobre as características de compósitos com EPS

Referências	Mistura	Tamanho (mm)	Densidade (kg/m ³)	Resistência a compressão (MPa)
Babu and Babu (2003)	EPS+NA+SF+C	6,30	1503 e 1979	10,20 e 21,40
Chen and Liu (2004)	EPS+NA+SF+C	3,00 e 8,00	876 e 1929	9,90 e 25,90
Ganesh Babu and Saradhi Babu (2004)	EPS+NA+FA+C	8,00	582 e 1723	1,10 e 12,50
Ganesh Babu et al. (2005)	EPS+NA+FA+C	8,00	582 e 1723	1,10 e 12,50
Babu et al. (2006)	EPS+NA+FA+SF+C	4,80	1012 e 1858	5,50 e 34,00
Tang et al. (2008a,b)	EPS+NA+C	4,00	1396 e 2094	13,10 e 39,30
Kan and Demirboga (2009a,b)	MEPS+NA+C	4,00 e 16,00	980 e 1734	12,60 e 17,60
Madandoust et al. (2011)	EPS+NA+C	4,80 e 9,50	1701 e 2235	18,00 e 32,00
Liu and Chen (2014)	EPS+SF+NA+C	1,18 e 2,36	1124 e 1900	6,10 e 30,00
Schackow et al. (2014)	EPS+NA+C	4,00	1070 e 1250	7,74 e 15,50
Cui et al. (2016)	EPS+NA+C	3,00	793 e 1190	3,80 e 6,24
Herki and Khatib (2016)	SPS+NA+C	2,00 e 5,00	1250 e 2076	3,00 e 16,43
Kaya and Kar (2016)	EPS+NA+C	0,00 e 3,00	648 e 1567	1,82 e 16,87
Mohammed and Zain (2016)	EPS+NA+SF+C	6,30	1230 e 2089	11,20 e 36,10
Sayadi et al. (2016)	EPS+NA+FA+C	6,50	150 e 437	0,08 e 1,00
Fathi et al. (2017)	EPS+LWA+C	2,00 e 4,00	1565 e 1780	18,00 e 30,00
Nikbin and Golshekan (2018)	EPS+NA+SF+C	4,75 e 9,50	1611 e 2312	12,40 e 47,80
EPS = poliestireno expandido	FA = cinzas volantes	NA= agregado natural (fino e grosso)		
MEPS = poliestireno expandido	C = cimento	SBR= borracha de estireno-butadieno		
SPS = poliestireno estabilizado	SF = sílica ativa	LWA = variedade de agregados leves		

Fonte: Adaptado de KHATIB *et al.* (2019).

Em seu estudo, Kaya e Kar (2016) produziram um novo compósito utilizando percentuais de 20 a 80% de EPS reciclado e obtiveram valores de condutividade térmica variando entre 0,061 e 0,390 W/m.K, de acordo com o teor de agregado utilizado. Tais valores estão muito abaixo dos valores obtidos pelos concretos tradicionais. Além disso, por apresentarem taxa de absorção de água abaixo de 30% e resistência a compressão e a tração de até 16,8 e 2,78 MPa, respectivamente, comprovou-se ser viável a aplicação destes materiais na produção de paredes de vedação sem função estrutural.

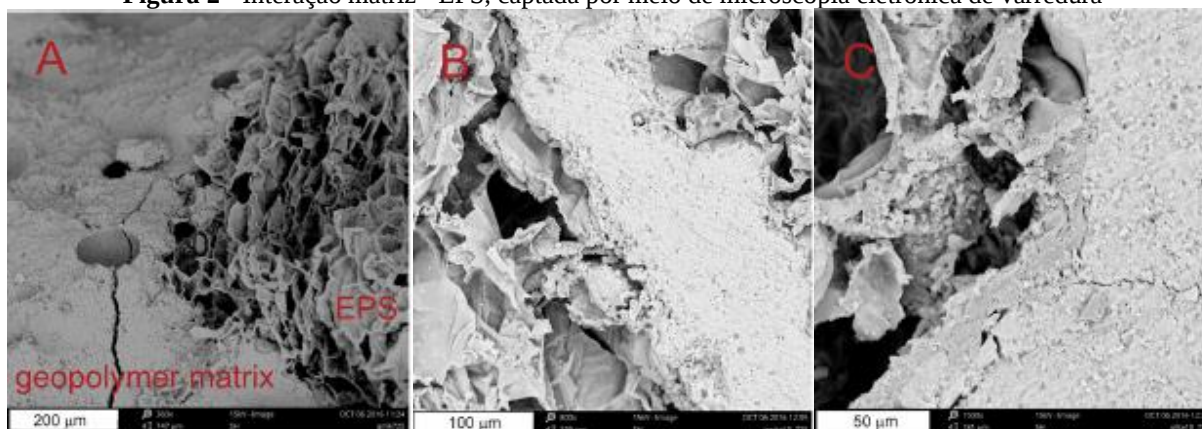
A interferência da concentração e tamanho das partículas de EPS nas propriedades do concreto leve foi investigada por Hoang Minh e Le Phuong (2018). Eles constataram que a resistência mecânica e a trabalhabilidade desse compósito diminuem com o aumento do tamanho do agregado e que partículas com mais de 10 mm de diâmetro diminuem significativamente a resistência à compressão do concreto.

Maaroufi *et al.* (2018) estudaram as características morfológicas e as variações estruturais de uma argamassa contendo grânulos de EPS e verificaram que existe uma boa interação entre esse agregado e a matriz de cimentícia, sem zonas de transição. Verificaram ainda, que ao contrário do que é demonstrado na literatura, a argamassa de poliestireno pode

ser curada a até 90°C sem alterar a estrutura dos grânulos. Acima desse valor as esferas de EPS encolhem e à medida em que a temperatura aumenta o número de trincas e fissuras também aumentam.

No estudo de Colangelo *et al.* (2018) um compósito produzido com metacaulim e poliestireno expandido foi testado. Eles verificaram a existência de uma boa interação entre a matriz de MAAS e o EPS e que a condutividade térmica, a resistência à compressão e a resistência à tração do compósito reduzia com o aumento do conteúdo de EPS. Apesar da adição de EPS ter provocado certa redução nas propriedades mecânicas desse novo compósito, isso não inviabilizou sua utilização. Na Figura 2 é apresentada a interação entre a matriz a base de metacaulim e partículas de EPS.

Figura 2 - Interação matriz - EPS, captada por meio de microscopia eletrônica de varredura



Fonte: Colangelo *et al.*(2018).

Entretanto, embora possa se verificar a viabilidade da aplicação de EPS como agregado para a fabricação de novos compósitos, estudos ainda são necessários, uma vez que a concentração ideal desse material pode variar de acordo com a matriz cimentícia utilizada e com os aditivos empregados.

2.3. SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL EM *LIGHT STEEL FRAMING*

Os sistemas de vedação de uma edificação funcionam como barreira entre a parte interna e a parte externa de um edifício e, por essa razão, são considerados como um dos principais responsáveis pela influência no seu consumo energético. A energia absorvida pelos seus componentes é extremamente variável e depende de fatores como a condição climática de exposição e suas propriedades termofísicas. Por essa razão, a correta interação desses fatores constitui elemento essencial para a garantia de desempenho térmico adequado da edificação (IEA, 2013).

Neste contexto, a utilização do sistema construtivo “*Light Steel Framing*” (LSF) se mostra como uma alternativa para a melhoria do desempenho das edificações. Ele apresenta como vantagem a utilização de múltiplos painéis que podem ser preenchidos por uma variedade de materiais, garantindo assim melhor adaptação da edificação ao clima local e, por consequência, melhor desempenho térmico e acústico (SANTIAGO *et al.*, 2012).

Este sistema teve sua origem nos Estados Unidos, a partir de um outro semelhante, estruturado em peças de madeira (*Wood Frame*) e criado para atender o crescimento populacional do país no século XIX. Com o passar dos anos e com o avanço tecnológico da indústria siderúrgica o sistema de madeira foi aos poucos substituído pelo de aço, o qual teve sua utilização consolidada durante a reconstrução de várias casas que haviam sido destruídas pelo furacão Andrew em agosto de 1992 (FRECHETTE, 1999).

Apesar de não ser uma tecnologia nova, ainda é pouco empregada no Brasil e vem sendo redescoberta por diversos profissionais que buscam por inovações tecnológicas. Além disso, por possuir vantagens como baixo peso, alta resistência e durabilidade da estrutura, facilidade de montagem, manuseio e transporte, menor uso de recursos naturais, redução no desperdício, rápida execução e permitir maior flexibilização do projeto arquitetônico, sua utilização pode se tornar tendência nos projetos de construção brasileiros (SANTIAGO *et al.*, 2012; GOMES *et al.*, 2013).

Porém devido à fatores culturais, falta de mão de obra especializada e de informações técnicas, a demanda por esse sistema ainda é baixa no país e, por isso, o custo de sua implementação acaba sendo mais elevado do que o das construções convencionais, podendo custar até 30% mais caro (MICHELINI; SILVA, 2018; OLIVIERI *et al.*, 2017). Outro fator que também atua de forma desfavorável a sua aplicação, é que devido à alta condutividade do aço, pontes térmicas podem ser formadas e se não forem corrigidas durante a etapa de projeto podem resultar em patologias, em níveis inadequados de conforto térmico e acústico bem como condições insalubres devido à fenômenos de condensação (SANTOS *et al.*, 2012).

De forma geral, o sistema LSF é composto por um conjunto de perfis metálicos utilizados para compor painéis com ou sem função estrutural, vigas de piso, tesouras para telhados e demais componentes. Seu fechamento vertical pode ser feito por diversos materiais, entretanto, nas construções residenciais brasileiras, geralmente são utilizadas placas cimentícias (Figura 3a) ou de OSB (*Oriented Strand Board*) (Figura 3b) para fechamento externo e placas de gesso acartonado para fechamento interno (SANTIAGO *et al.*, 2012). Painéis metálicos tipo sanduíche compostos com isolantes, normalmente são utilizados para o fechamento de

edificações não residenciais (ABDI, 2015). No Quadro 2 são apresentadas algumas características das placas cimentícias, OSB e de gesso.

Figura 3 – a) Fechamento com placa cimentícia



Fonte: SINAT, 2013.

b) Fechamento com placa OSB



Fonte: (SMART, 2019).

Quadro 2 - Características dos fechamentos mais comercializados no Brasil

	Placa Cimentícia	Placa de OSB	Placa de Gesso
Emprego	- Fechamento interno e externo - Áreas molháveis ou expostas às intempéries	- Geralmente utilizada para fechamento externo	- Fechamento interno dos painéis verticais - Fechamento de divisórias internas
Composição	- Cimento Portland - Fibras de celulose ou sintética - Agregados	- Tiras de madeira orientadas em três camadas perpendiculares unidas por resina e prensadas sob alta temperatura	- Mistura de gesso, água e aditivos, revestida em ambos os lados com lâminas de cartão, que confere ao gesso resistência à tração e flexão
Acabamento	- Argamassa - Pintura acrílica - Cerâmicas - Pedras naturais - Outros revestimentos	- Siding vinílico - Argamassa - Gesso - Pintura acrílica	- Pintura - Cerâmicas - Textura - Papel de parede
Peso	- Até 18 Kg/m²	- 5,4 Kg/m²	- 6,5 a 14 Kg/m²
Medidas usuais	- 1,2m de largura - 2, 2,4 ou 3m de comprimento - 6, 8 ou 10mm de espessura	- 1,22m de largura - 2,44m de comprimento - 9, 12,15 ou 18mm de espessura	- 1,2m de largura - 1,8 a 3,6m de comprimento - 9, 12,5 ou 15mm de espessura
Vantagens	- Incombustíveis - Elevada resistência a impactos - Baixa permeabilidade a água - Aceita grande variedade de revestimentos	- Boa resistência mecânica - Boa resistência a impactos - Estabilidade dimensional - Resistente a ataque biológico	- Resistente ao fogo - Resistente a umidade - Isolamento acústico - Cobre grandes vãos
Desvantagens	- Podem apresentar fissuração, trincas em juntas e revestimentos - Devido às trincas pode ocorrer destacamento do revestimento	- Baixa resistência a intempéries, - Necessita de revestimento para garantir a estanqueidade - Não aceita diversos tipos de revestimentos.	- Baixa resistência a intempéries - Não pode ser empregado em áreas externas.

Fonte: Adaptado de Santiago *et al.*(2012).

Por ser um modelo de construção industrializado e permitir o uso racionalizado de recursos e materiais, esse sistema produz menos resíduos e, por isso, pode ser considerado mais ecológico que o convencional (OLIVIERI *et al.*, 2017). Porém, como a demanda por

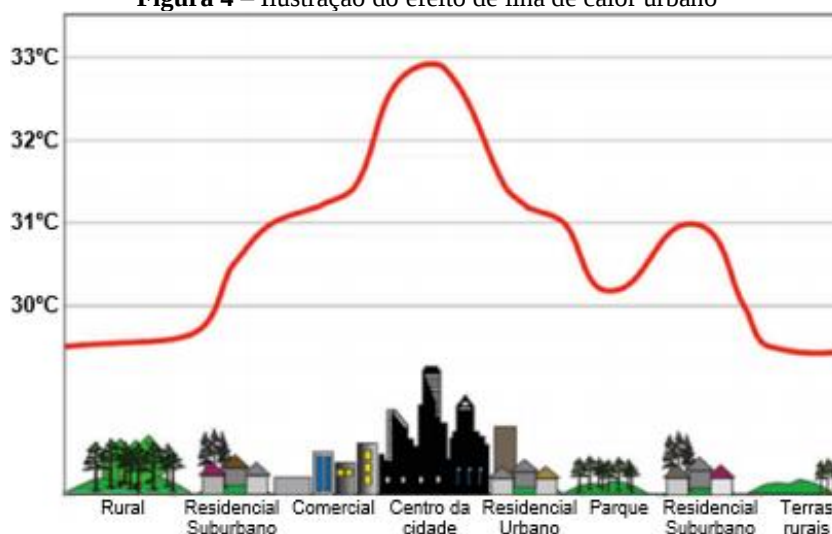
edificações está cada vez maior e os recursos naturais estão mais escassos, somente a utilização de tal sistema pode não ser suficiente para atenuar de forma significativa os impactos provocados pela indústria da construção.

Assim, a incorporação de componentes produzidos a partir de reciclagem ao sistema “*Light Steel Framing*” pode ser um método para garantir a redução desses impactos. Uma possível solução é a utilização de placas produzidas com cimentos álcali-ativados para realizar o seu fechamento vertical, pois, conforme demonstrado por diversos estudos os compósitos produzidos com esses cimentos podem apresentar propriedades térmicas e mecânicas, melhores que as de materiais produzidos com cimento Portland (DUXSON *et al.*, 2007b; VILLAQUIRÁN-CAICEDO *et al.*, 2015; SNELL *et al.*, 2017; MADDALENA *et al.*, 2018). Além disso, eles admitem em sua composição agregados alternativos como por exemplo resíduos de poliestireno expandido, o que pode lhes conferir melhorias no desempenho térmico e redução da sua densidade, diminuindo assim a carga da estrutura (KAYA; KAR, 2016; HOANG MINH; LE PHUONG, 2018).

2.4. DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

A constante substituição das áreas vegetadas dos ambientes naturais por áreas pavimentadas e edificadas nas cidades vem causando o aumento das temperaturas locais. Tal fato ocorre em virtude da maior capacidade de absorção de calor dessa nova superfície e das atividades relativas à vida nas cidades (IEA, 2013) . Assim, quanto maior for a densidade demográfica de uma cidade, maior será a sua temperatura; esse fenômeno é conhecido como efeito de ilha de calor urbano (KENWARD *et al.*, 2014).

Estima-se que em uma tarde ensolarada de verão, a temperatura do ar dentro das cidades possa ser até 3°C maior que a temperatura do ar de zonas rurais localizadas em suas proximidades (Figura 4) (KENWARD *et al.*, 2014). Por este e outros motivos, aparelhos de ar-condicionado são cada vez mais utilizados para a manutenção das condições de conforto térmico dentro das edificações. No Brasil por exemplo, o uso de energia para climatização de edifícios mais que triplicou entre os anos de 2005 e 2017 (EPE, 2018).

Figura 4 – Ilustração do efeito de ilha de calor urbano

Fonte: Adaptado de KENWARD *et al.* (2014).

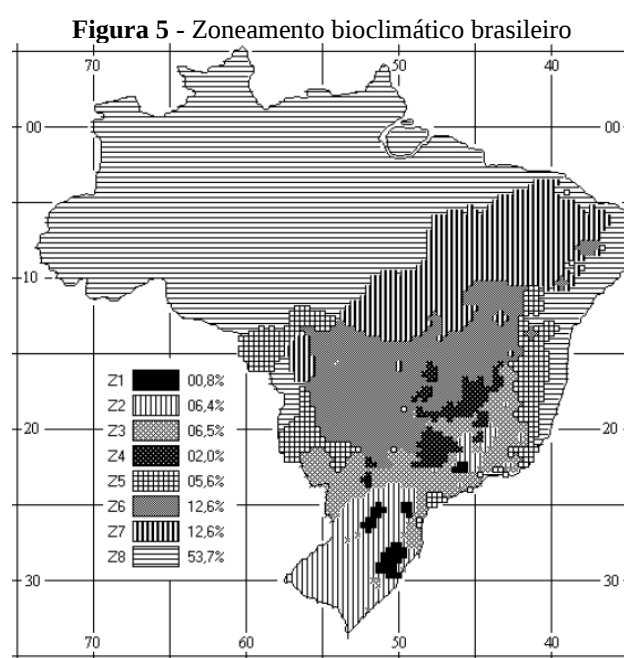
Um dos problemas da utilização de aparelhos de ar condicionado é que seu processo de resfriamento muitas vezes, consiste em movimentar o calor de dentro dos edifícios para o seu exterior, o que no período da noite pode causar um aumento de temperatura de mais de 1°C em algumas cidades (SALAMANCA *et al.*, 2014). Outro fator que também deve ser considerado são os impactos causados ao meio ambiente por estes aparelhos, pois como a maior parte da energia elétrica do mundo é oriunda de combustíveis fósseis (aproximadamente 66%), a manutenção do funcionamento desta grande quantidade de equipamentos acarreta em emissões acentuadas de CO₂ (EPE, 2017).

Considerando que a qualidade das construções atuais não garante, na maioria da vezes, boas condições de conforto térmico aos seus ocupantes, associado ao fato de que a população urbana deve aumentar de 4,2 para 6,6 bilhões de pessoas até 2050 (UNDESA, 2018), estima-se que o crescimento do consumo de energia para resfriamento dos espaços passe a representar 37% do consumo de energia no mundo (IEA, 2018). Entretanto, este aumento tenderá a ser mais expressivo em países em desenvolvimento localizados nas áreas mais quentes do mundo, uma vez que devido às mudanças climáticas, a ocorrência de eventos extremos nessas regiões tende a ser cada vez mais frequente (MMA, 2016).

De acordo o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2016), no Brasil já se vê um aumento da ocorrência desses eventos, por isso se torna cada vez mais importante que as construções brasileiras sejam planejadas de forma a se adaptarem às condições climáticas locais. Portanto, pensar em como as pessoas estão alojadas e em como elas irão manter as condições de conforto térmico em seus lares e locais de trabalho pode ser uma resposta que ajude a reduzir a demanda energética e, por consequência, as emissões de CO₂.

Neste contexto, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou no ano de 2005, a NBR 15220 que trata sobre o desempenho térmico de edificações. Essa norma é dividida em cinco partes, nas quais são estabelecidos métodos de cálculo e ensaios para definição de propriedades térmicas dos materiais de construção, o zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações de interesse social.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) divide o território brasileiro em oito zonas bioclimáticas (Z1 a Z8) de acordo com as características do clima de cada região e, portanto, não obedece ao mapeamento político do país (Figura 5). Para a divisão do zoneamento bioclimático brasileiro foram utilizados dados das Normais Climatológicas de 330 cidades. A partir destes dados, foram estimados por interpolação as variáveis climáticas: médias mensais das temperaturas máximas e mínimas e das umidades relativas do ar, para o restante das cidades brasileiras. Em seguida, essas variáveis foram plotadas em uma carta bioclimática, adaptada a partir da sugerida por Givoni (1992), para classificação do clima de cada cidade e elaboração de estratégias construtivas para cada um desses climas conforme recomendações apresentadas nas planilhas de Mahoney (1971) adaptadas ao clima brasileiro.



Fonte: ABNT, 2005b.

Tais estratégias, possuem como objetivo promover a adequação da edificação ao clima no qual está inserida, permitindo com isso, a melhoria do seu desempenho térmico e a garantia de condições mínimas de conforto em seu interior. É sugerido, por exemplo, a variação no tamanho das janelas, uso de sombreamento em alguns climas, tipologias de vedação externa a serem empregadas para cada condição e estratégias de condicionamento térmico.

Adicionalmente, e com o objetivo de melhorar a qualidade das edificações brasileiras, foi publicada em 2008 a NBR 15575, a qual entrou em vigor somente em 2013, após período de revisão e consulta pública. Dividida em seis partes, esta norma estabelece requisitos mínimos de desempenho, vida útil e garantia para todos os sistemas de uma edificação, bem como os métodos de avaliação do cumprimento desses requisitos. No seu escopo estão previstos parâmetros de desempenho térmico das habitações de acordo com cada zona bioclimática conforme a NBR 15220 e métodos para avaliação do atendimento destes parâmetros.

2.4.1. Avaliação do desempenho térmico das edificações

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013a), o desempenho térmico de uma edificação é considerado aceitável quando as interações entre os seus sistemas de fechamento e o clima no qual se insere, propiciem condições térmicas no interior da edificação melhores que as do ambiente externo. Ainda de acordo com a essa norma, a avaliação do atendimento dessas necessidades, pode ser realizada das seguintes formas: por meio de um procedimento simplificado de verificação do desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical e cobertura ou de simulação computacional do desempenho térmico da edificação; ou por meio de um procedimento de medição *in loco* (informativo).

A avaliação do desempenho térmico dos sistemas de vedação vertical e cobertura é realizada de acordo com procedimentos de cálculos previstos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b). Neste método simplificado é avaliado se valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) desses sistemas, bem como o tamanho das aberturas das fachadas da habitação atendem aos requisitos previstos nas NBR 15575-4 e NBR 15575-5 (ABNT, 2013b; 2013c). Caso tais limites não sejam respeitados a norma recomenda que sejam aplicados os procedimentos de simulação computacional. Nos Quadros 3 e 4 são apresentados os limites estipulados para U e CT.

Quadro 3 - Valores admissíveis para a transmitância térmica

Transmitância térmica (U) W/m².K		
Zona Bioclimática	Paredes externas	Cobertura
1 e 2	$U \leq 2,5$	$U \leq 2,3$
3 a 6	Se $\alpha \leq 0,6$; $U \leq 3,7$ Se $\alpha > 0,6$; $U \leq 2,5$	Se $\alpha \leq 0,6$; $U \leq 2,3$ Se $\alpha > 0,6$; $U \leq 1,5$
7 e 8	Se $\alpha \leq 0,6$; $U \leq 3,7$ Se $\alpha > 0,6$; $U \leq 2,5$	Se $\alpha \leq 0,4$; $U \leq 2,3$ FT Se $\alpha > 0,4$; $U \leq 1,5$ FT
α é a absorptância solar da superfície externa. FT é o fator de correção da transmitância, estabelecido na NBR 15220-3(ABNT, 2005a).		

Fonte: Adaptado da NBR 15575-4 e 15575-5 (ABNT, 2013b; 2013c).

Quadro 4 - Valores admissíveis para capacidade térmica

Capacidade térmica (CT) KJ/m².K	
Zona Bioclimática	Paredes externas
1 a 7	≥ 130
8	Sem exigência

Fonte: Adaptado da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b).

Tanto o procedimento de simulação computacional quanto o de medição *in loco* permitem avaliar o desempenho térmico da edificação como um todo. Nestes casos o nível de desempenho é classificado de acordo com o atendimento à critérios de avaliação estipulados para condições de verão (Quadro 5) e para condições de inverno (Quadro 6). O atendimento ao nível mínimo (M) é obrigatório para ambas as condições (ABNT, 2013a). Para propiciar melhores condições térmicas no interior da edificação seria recomendável o atendimento dos níveis intermediário (I) ou superior (S).

Quadro 5 - Critérios para avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
Mínimo (obrigatório)	$T_{i,m\acute{a}x} \leq T_{e,m\acute{a}x}$	$T_{i,m\acute{a}x} \leq T_{e,m\acute{a}x}$
Intermediário	$T_{i,m\acute{a}x} \leq (T_{e,m\acute{a}x} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,m\acute{a}x} \leq T_{e,m\acute{a}x} - 1^{\circ}\text{C}$
Superior	$T_{i,m\acute{a}x} \leq T_{e,m\acute{a}x} - 4^{\circ}\text{C}$	$T_{i,m\acute{a}x} \leq T_{e,m\acute{a}x} - 2^{\circ}\text{C}$ e $T_{i,min} \leq T_{e,min} + 1^{\circ}\text{C}$
$T_{i,m\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,m\acute{a}x}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;		

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a).

Quadro 6 - Critérios para avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zonas 6,7 e 8
Mínimo (obrigatório)	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}\text{C})$	Nestas zonas estes critérios não precisam ser verificados
Intermediário	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ}\text{C})$	
Superior	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ}\text{C})$	
Ti,min é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; Te,min é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;		

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a).

O procedimento de medição *in loco* se destina a avaliação do desempenho térmico de edificações já construídas ou de protótipos e seu método de execução é descrito no Anexo A da norma. Já o procedimento de simulação computacional pode ser utilizado tanto para avaliar o desempenho térmico de edificações ainda em fase de projeto quanto para estudos de *retrofit* de edificações já construídas (ABNT, 2013a).

Para a execução da simulação computacional a NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) recomenda que caso a edificação não possua orientação definida, se adote a condição mais crítica do ponto de vista térmico para a condição verão e inverno. No verão as janelas da sala ou dormitórios devem estar voltadas para oeste e a outra parede exposta voltada para norte; no inverno as janelas desses ambientes devem estar voltadas para o sul e a outra parede exposta voltada para leste. Além disso, são feitas recomendações sobre a utilização de dispositivos de sombreamento, taxa de ventilação dos ambientes e absorvância solar das superfícies externas da envoltória.

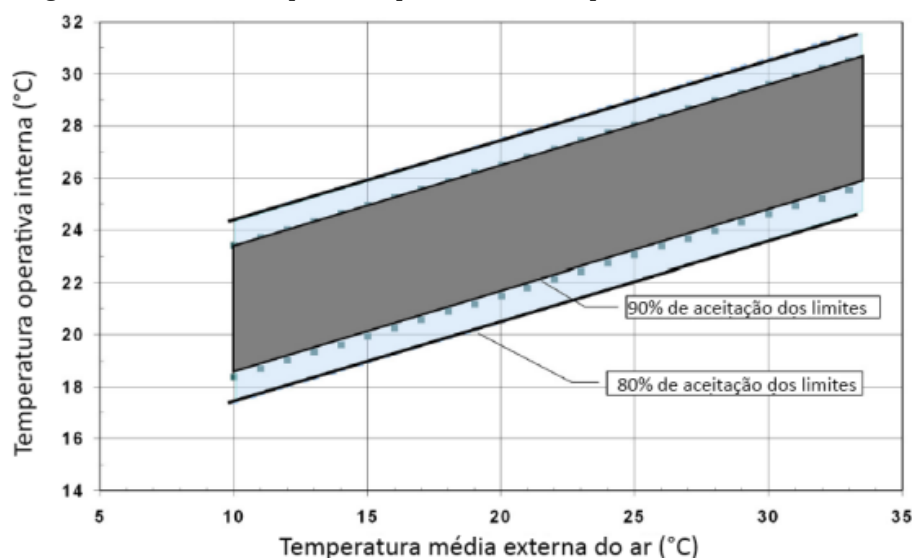
Entretanto, apesar do atendimento aos requisitos mínimos dessa norma classificar o desempenho térmico da edificação como aceitável, isso não garante que sejam mantidas em seu interior condições de conforto adequadas (OLIVEIRA, 2015). Isso possivelmente ocorre porque a avaliação do desempenho térmico das edificações de acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013a), é realizada para um dia típico de verão e inverno, sem considerar os ganhos internos de calor devido a sua ocupação, uso de equipamentos e sistemas de iluminação, bem como alguns outros fatores que podem interferir nos resultados (SORGATO *et al.*, 2014). Desta forma, para edificações naturalmente ventiladas, que realmente atendam às necessidades do usuário quanto as condições de conforto, faz-se necessário que a avaliação do desempenho térmico incorpore referências de conforto térmico.

Por este motivo, atualmente a NBR 15.575 está em processo de revisão (ABNT, 2020). Em sua nova proposta é previsto que a avaliação do desempenho térmico da edificação realizada por meio de simulação computacional, deve considerar o percentual de horas dentro de uma faixa operativa de temperatura propiciadas pela edificação aos usuários. Assim, o desempenho será satisfatório ou mínimo (M) se a edificação fornecer mais horas dentro dessa faixa operativa do que o modelo de referência sugerido pela Norma. O novo texto especifica também algumas características e propriedades de materiais, bem como rotinas de ventilação, uso e ocupação que devem ser utilizadas durante o processo de simulação. Entretanto, como essa norma ainda se encontra em fase de consulta pública e devido ao fato do seu texto ter passado por revisões em novembro de 2020 os novos padrões de simulação estipulados por ela não foram utilizados neste estudo.

Neste contexto, conforme recomendações de estudos prévios (CHOW *et al.* 2010; DE DEAR; BRAGER, 2002) no presente estudo será realizada a avaliação das condições de conforto de um ambiente naturalmente ventilado, conforme o modelo adaptativo da Norma internacional ASHRAE 55 (2017). Neste modelo, a avaliação do conforto dos usuários é feita por meio do cálculo de um de valor de temperatura operativa interna, que leva em consideração

o valor da temperatura externa mensal média. Além disso, também são previstos na norma intervalos confortáveis de temperatura, os quais são calculados para os limites de aceitação ou satisfação de 80% para situações normais e 90% para situações nas quais se faz necessário um padrão mais elevado de conforto térmico (Figura 6). Sua aplicação se restringe a indivíduos saudáveis e aclimatados, sujeitos a temperaturas entre 10 e 33,5°C, com taxa metabólica variando entre 1,0 e 1,3 met e utilizando um conjunto de roupas com resistência térmica entre 0,5 e 1,0 clo.

Figura 6 - Faixas de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente ventilados



Fonte: Traduzido de ASHRAE 55 (2017).

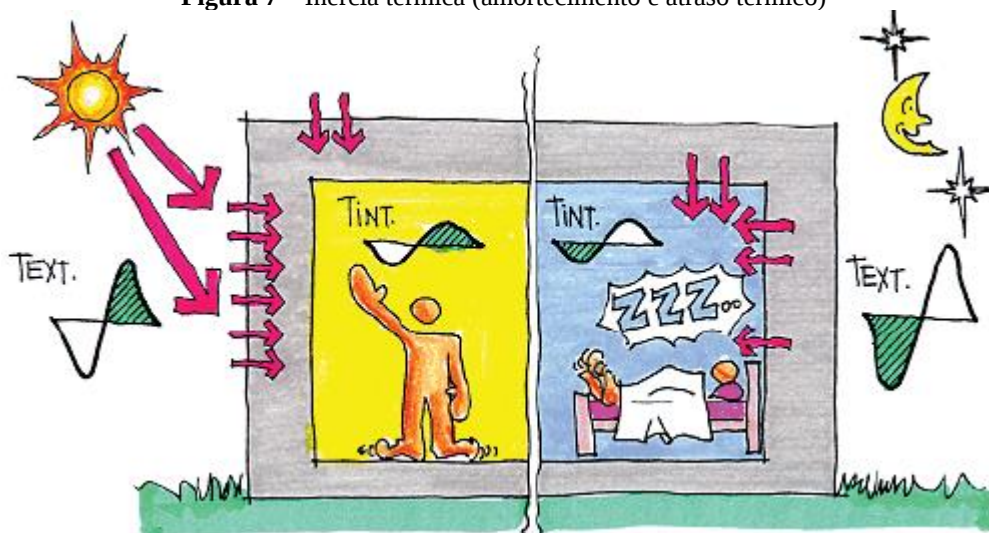
2.4.2 Propriedades termofísicas dos materiais

A transmissão de radiação solar do ambiente externo para o interno é a maior responsável pelos ganhos térmicos de uma edificação e influencia diretamente nas condições de conforto em seu interior. A intensidade com que essa transmissão ocorre possui relação direta com as propriedades termofísicas dos materiais que compõe seus sistemas de vedação (KUMAR *et al.*, 2018). Desta forma, a escolha de materiais que melhor se adequem a determinadas condições climáticas se mostra como importante estratégia para propiciar a otimização do desempenho térmico da edificação.

Em climas quente e seco que apresentam extensa faixa da amplitude térmica, a utilização de valores elevados de inércia térmica nos sistemas de vedação vertical associada a ventilação natural seletiva constitui importante estratégia para a manutenção das condições de conforto ambiental. Em ambientes com valores reduzidos de inércia térmica a percepção das variações externas de temperatura é quase que instantânea, enquanto que em ambientes com maior inércia térmica essas variações são sentidas de forma mais amena (LAMBERTS *et al.*, 2014). Tal

variável é responsável pelo amortecimento e atraso da transmissão das ondas de frio e calor (Figura 7) e é caracterizada em função de três propriedades térmicas dos elementos de vedação: capacidade calorífica (C), condutividade térmica (λ) e densidade de massa aparente (ρ) (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Figura 7 – Inércia térmica (amortecimento e atraso térmico)



Fonte: (LAMBERTS *et al.*, 2014).

A capacidade calorífica de uma parede é expressa em função de um coeficiente denominado calor específico (c), o qual se mede pela quantidade de calor necessária para fazer variar em uma unidade de temperatura, a massa unitária desse material (ABNT, 2005c; FROTA; SCHIFFER, 2001). Já a condutividade térmica se refere a quantidade do fluxo de calor por condução que é transmitida da superfície mais quente do material para a mais fria em função da sua espessura e área unitária. Assim, quanto menor for a condutividade térmica de uma parede menor será a troca de calor entre o ambiente interno e o externo. Materiais com baixa densidade, como por exemplo isopor e lã de vidro, contém elevado número de poros e geralmente apresentam baixa condutividade térmica, por isso são considerados ótimos isolantes. Isto se deve ao fato de que o ar acumulado em seus poros tende a reduzir o fluxo de calor por eles transmitido (LAMBERTS *et al.*, 2014).

Essas três propriedades (ρ , λ e c) também podem ser combinadas, dando origem a outras duas, de especial interesse para a avaliação do desempenho térmico dos sistemas de fechamento, as quais são conhecidas como resistência térmica (R) e difusividade térmica (α_{dt}). A primeira é dada pelo quociente entre a espessura do material (e) e o seu valor de λ e indica a capacidade que ele possui de resistir à passagem do fluxo de calor (Equação 1) (ABNT, 2005b); quanto maior for a espessura e menor o valor de “ λ ”, maior será a resistência térmica do

material. Os valores de R de materiais heterogêneos são calculados pela soma da resistência térmica de cada um dos seus componentes.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

R = resistência térmica ($\text{m}^2\text{K} / \text{W}$)

e = espessura do material (m)

λ = condutividade térmica do material ($\text{W} / \text{m.K}$)

A segunda propriedade diz respeito a velocidade de propagação do calor em um meio, de acordo com variações de temperatura em um determinado período de tempo. Esta propriedade pode ser expressa pela relação entre a condutividade térmica e o produto da densidade pela capacidade de calor específica do material, conforme apresentado na Equação 2 (ABNT, 2005c).

$$\alpha_{\text{df}} = \frac{\lambda}{\rho * c} \quad (2)$$

Onde:

α_{df} = difusividade térmica (m^2/s)

λ = condutividade térmica do material ($\text{W}/\text{m}^*\text{K}$)

ρ = densidade do material (kg/m^3)

c = calor específico do material ($\text{J}/\text{kg}^*\text{K}$)

Outro parâmetro que também deve ser considerado durante a avaliação do desempenho térmico de uma edificação, é a absorptância à radiação solar (α) das superfícies externas dos seus elementos de vedação. Ela é dada pela razão entre a taxa de radiação solar absorvida por uma superfície e a taxa de radiação emitida sobre essa mesma superfície (ABNT, 2005c). Tal propriedade, possui relação direta com a cor da envoltória; cores mais claras tendem a favorecer valores mais baixos de absorptância enquanto cores escuras tendem a propiciar a obtenção de valores mais altos, dependendo da rugosidade do material.

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) recomenda que os valores dessas propriedades térmicas sejam obtidos por meio de ensaios e metodologias de cálculo normatizados conforme previsto no Quadro 7. Na ausência destes dados ou na impossibilidade de obtê-los por meio de ensaios é permitida a utilização dos dados disponibilizados pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

Quadro 7 - Métodos de medição de propriedades térmicas de materiais e elementos construtivos

Propriedade	Determinação
Condutividade térmica	ASTM C518; ASTM C177; ISO 8302
Calor específico	Medição ASTM C351-92b
Densidade de massa aparente	Medição conforme método de ensaio, preferencialmente normalizado, específico para o material.
Absortância a radiação solar	Medição ANSI/ASHRAE 74/88 ASTM E1918-06; ASTM E903-04a
Resistência ou transmitância	Cálculo conforme ABNT NBR 15220-2, tomando-se por base os valores de condutividade térmica medidos

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a).

2.4.3 Energy Plus

O Energy Plus é uma ferramenta de simulação computacional do comportamento térmico e energético de edifícios. Desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, se originou da combinação de outros dois, o BLAST e o DOE-2, utilizados nas décadas de 1980 e 1990. Por ser um *software* gratuito e por atender os requisitos estabelecidos pela norma internacional ASHRAE 140/2007, sua utilização é recomendada pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) para o estudo do desempenho térmico das edificações.

Este programa permite uma análise rápida de várias combinações de cenários, como por exemplo a combinação de diversos climas com várias soluções arquitetônicas e rotinas de uso de equipamentos e ocupação da edificação. Assim, pode ser utilizado como ferramenta auxiliar para obtenção de projetos de edificações mais sustentáveis, que garantam condições adequadas de conforto térmico em seu interior, com reduzido consumo de eletricidade e/ou outra fonte de energia.

As simulações realizadas com o Energy Plus consideram as interações de balanço térmico dos componentes do edifício e seus sistemas, quando submetidos a climas e condições de funcionamento distintas. Na simulação, o programa utiliza arquivos climáticos com dados horários e, desta forma, possibilita, entre outras coisas: estimar as cargas térmicas para todas as 8760 horas do ano; prever o comportamento interno do edifício para vários tipos de sistemas e rotinas; e estimar o seu consumo energético anual.

Por todos estes motivos, sua utilização em pesquisa sobre desempenho térmico e energético das edificações têm se tornado algo cada vez mais recorrente. Balvedi *et al.* (2018) utilizaram este programa para avaliar a influência do comportamento do usuário no desempenho térmico de edificações naturalmente ventiladas, localizadas na cidade de Florianópolis – SC. Eles constataram que os padrões de ocupação e operação de janelas e persianas, foram

responsáveis por provocar variações superiores à 130% nos graus hora de aquecimento e resfriamento.

Gevaudan e Srubar (2017) utilizaram o programa Energy Plus para avaliar o consumo de energia operacional de uma edificação com sistemas de vedação em concreto a base de cimento álcali-ativado. O estudo foi realizado considerando a implantação da edificação em nove cidades dos Estados Unidos: Miami, Phoenix, São Francisco, Baltimore, Albuquerque, Chicago, Denver, Duluth e Fairbanks. Foi verificado que apesar de pequena a diferença, essa edificação apresentou menor consumo energético quando comparada a outras que utilizam cimento Portland.

Baumbach *et al.* (2019) avaliaram o comportamento térmico de painéis de vedação vertical fabricados com cimento álcali-ativado e o de painéis de cimento Portland, quando aplicados em uma edificação localizada em um clima quente e úmido de acordo com a definição da ASHRAE 169 (2013). As cidades de Funchal (Portugal) e Belo Horizonte (Brasil) foram escolhidas para representarem o clima estudado. Como resultado os autores puderam constatar que os painéis de CAA podem ser adotados para compor SVVEs e que seu emprego pode proporcionar uma quantidade relevante de horas em conforto, cerca de 72% do total de horas anuais.

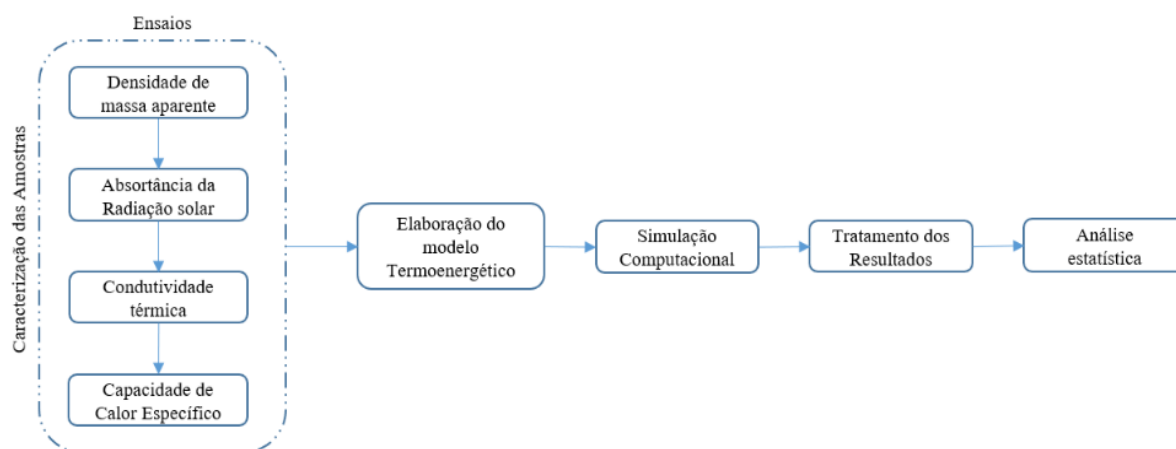
No estudo realizado por Villalba *et al.* (2018), foi investigado se a substituição de elementos de vedação de concreto a base cimento Portland por outros de concreto celular a base de cimento álcali-ativado, impactaria no consumo energético da edificação. O estudo foi conduzido considerando os climas das cidades de Quito e Guayaquil, ambas localizadas no Equador. Como resultado, os autores observaram uma redução de 4% na demanda anual de energia para a cidade de Guayaquil e de 1,3% para a cidade de Quito.

3. METODOLOGIA

A presente pesquisa pode ser caracterizada como de natureza aplicada e abordagem predominantemente quantitativa. Não se exclui, contudo, a abordagem qualitativa. Se buscou por meio de revisão de literatura, ensaios laboratoriais e simulação computacional, comparar o desempenho térmico de placas alternativas de cimento álcali-ativado produzidas a partir de resíduos de porcelanato ao de placas tradicionalmente produzidas com cimento Portland. Por este motivo, o presente estudo pode ser classificado do ponto de vista dos seus objetivos e procedimentos como uma pesquisa explicativa de caráter experimental (KAUARK *et al.*, 2010).

A execução desta pesquisa foi dividida em três etapas: i) obtenção das três variações de placas (tratadas aqui como PCP, PCAA1 e PCAA2 e caracterização das propriedades térmicas; ii) elaboração do modelo termoenergético e simulação computacional; e iii) análise estatística dos dados. Na Figura 8 é apresentado o fluxograma das principais atividades realizadas nesta pesquisa:

Figura 8 - Fluxograma da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1. CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS SELECIONADAS

No presente estudo foi verificado se as placas de cimento álcali-ativado apresentam melhor desempenho térmico que as placas de cimento Portland, bem como se a condição de cura das placas pode interferir nesse resultado. Para isso, 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. Nas Figuras 9a, 9b e 9c são apresentadas as placas estudadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

3.1.1. Determinação da densidade de massa aparente

A densidade de massa aparente das amostras, foi determinada de acordo com as especificações da norma ASTM C 642-06 (2006). 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 3 e 4.

$$m_3 = m_2 - V \quad (3)$$

$$\rho_{amostra} = \left[\frac{m_1}{(m_1 - m_3)} \right] \cdot \rho_{\text{água}} \quad (4)$$

Onde:

$$\rho_{\text{água}} = 1 \text{ g/cm}^3$$

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. Na Figura 10 são apresentados alguns dos equipamentos utilizados durante esse ensaio.

Figura 10 – Equipamentos utilizados, a esquerda a balança digital e a direita imagem das placas no interior da estufa.



Fonte: elaborado pelo autor (2020)

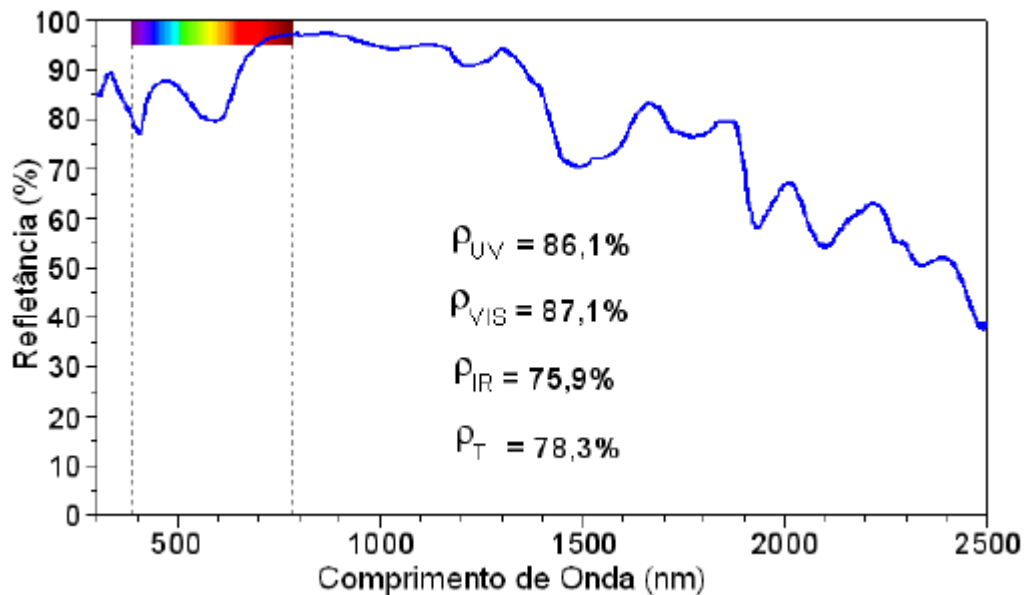
3.1.2. Determinação da Absortância da radiação solar

A absortância das placas foi determinada a partir de ensaios com o espectrômetro portátil Alta II (Figura 11), desenvolvido pela *Lunar and Planetary Institute*, localizado em Houston – Texas, conforme procedimento de medição recomendado por Pereira *et al.* (2015). Tal equipamento possui incerteza de aproximadamente 10% para os valores de refletância da radiação solar e realiza medição para onze comprimentos de onda (entre 470 e 940 nanômetros), dos quais quatro abrangem a região infravermelho e sete a região visível do espectro solar (PEREIRA *et al.*, 2015). Para cada um destes comprimentos de onda, o aparelho possui uma lâmpada responsável por emitir um sinal de energia luminosa e por meio de um sensor ele capta o quanto desta energia é refletida. A partir dos valores de voltagem obtidos por este sensor, a refletância espectral da superfície pode ser calculada.

Figura 11 - Espectrômetro Alta II

Fonte: Marinoski *et al.* (2013).

Entretanto, para que seja possível realizar o cálculo da refletância é necessária a utilização de uma amostra de referência com valores de refletância já conhecidos para os onze comprimentos de onda. Assim, nesta pesquisa, foi utilizada como amostra de referência uma folha de papel A4 branco de 75 g/m², conforme recomendado pelo fabricante. Na Figura 12 é apresentada sua curva de reflexão espectral.

Figura 12 - Curva de reflexão espectral do papel branco 75 g/m²

Fonte: (DORNELLES, 2008)

O cálculo dos valores de refletância das amostras foi realizado para cada um dos comprimentos de onda utilizando a Equação 5.

$$\rho_{\lambda am} = \left(\frac{V_{am} - V_{f_{am}}}{V_{ref} - V_{f_{ref}}} \right) \times \rho_{\lambda ref} \quad (5)$$

Onde:

$\rho_{\lambda_{am}}$ = refletância da amostra em (%);

V_{am} = voltagem da amostra (mV);

$V_{f_{am}}$ = voltagem de fundo da amostra (mV);

V_{ref} = voltagem da amostra de referência (mV);

$V_{f_{ref}}$ = voltagem de fundo da amostra de referência (mV); e

$\rho_{\lambda_{ref}}$ = refletância da amostra de referência (%).

Como os valores de refletância espectral obtidos com o Alta II são calculados considerando a energia de radiação constate ao longo do espectro (fato que não ocorre com a radiação solar), foi necessário ajustá-los de acordo com a intensidade de radiação solar, para cada comprimento de onda do espectro solar padrão adotado pela ASTM G 173-03 (2003). Esse ajuste foi realizado por meio da multiplicação do valor da refletância espectral pela irradiação solar global do espectro solar padrão e pela integração deste valor para o intervalo de comprimento de onda desejado. Em seguida a refletância solar ajustada foi obtida pela razão entre a soma das intensidades de irradiação refletida e a soma das intensidades de radiação solar global, conforme descrito na equação 6 (ASTM, 2012).

$$\rho_{solar} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \rho_{\lambda_i} \cdot E_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i}{\sum_{i=1}^n E_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

ρ_{solar} = refletância solar (%);

ρ_{λ_i} = refletância espectral no comprimento de onda λ_i (adimensional);

E_{λ_i} = irradiação solar global espectral (W/m².nm); e

λ_i = comprimento de onda (nm).

Por fim, como a radiação total incidente sobre uma superfície opaca é igual a soma das taxas de radiação refletida e absorvida, a absortância das amostras foi calculada pela Equação 7.

$$\alpha = 1 - \rho_{solar} \quad (7)$$

Onde:

α = absortância solar da amostra

ρ_{solar} = refletância solar

Visando evitar que a iluminação ambiente interferisse nas medições e manter constante a distância entre o aparelho e a amostra em todos os ensaios, uma câmara escura de madeira, com dimensões 30 x 30 x 5cm, foi utilizada para a realização dos ensaios. Esta câmara possui uma abertura em sua face superior que permite apenas a passagem da iluminação do espectrômetro Alta II. Além disso, para garantir a repetitividade dos resultados foram executadas três medições de refletância em cada amostra e a média destes valores foi adotada para a realização dos cálculos da absorptância.

Pereira *et al.* (2017) demonstrou em seu estudo que o equipamento pode apresentar uma imprecisão de $\pm 0,10$ nos valores absolutos de refletância solar.

Este método foi escolhido, devido a disponibilidade do equipamento e por ser o mesmo utilizado nos estudos de Dornelles (2008), Sangoi *et al.* (2010), Marinoski *et al.* (2013), Pereira *et al.* (2017).

Sabe-se que a cor das superfícies de um elemento de vedação pode interferir diretamente na quantidade de calor absorvido por ele e por consequência nos ganhos de calor de uma edificação. 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 (PEREIRA *et al.*, 2017). Por este motivo, durante as análises verificou-se também os valores de absorptância 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 os das Zonas Bioclimáticas Z5, Z6, Z7 e Z8.

3.1.3. Condutividade térmica

A condutividade térmica das amostras foi determinada pelo medidor de fluxo de calor HFM 436 Lambda, da marca Netzsch (Figura 13), de acordo com a metodologia recomendada pela norma ASTM C 518 (2004). Este equipamento utiliza o mesmo princípio do método da placa quente protegida, exceto que a medição do fluxo de calor é realizada pelo uso de um medidor de fluxo de calor em vez de medir o consumo de energia. Segundo o fabricante a precisão dos seus termopares é de 0,01 °C e sua faixa de erro pode variar de 1 a 3%.

Figura 13 - Medidor de fluxo de calor HFM 436 Lambda



Fonte: Elaborado pelo autor

A utilização desse aparelho constitui um meio preciso para determinar as propriedades de transmissão térmica de uma ampla gama de materiais (ASTM, 2004). Por este motivo, vêm sendo utilizado em estudos recentes para a obtenção dos valores de condutividade térmica e resistência térmica de materiais cimentícios (DHAKAL et al., 2017; CARDINALE et al., 2017; RHEINHEIMER et al., 2017; SAKKAS et al., 2017; WU et al., 2017; KAKALI et al., 2018; POONYAKAN et al., 2018; CUTHBERTSON et al., 2019; DIXIT et al., 2019; FABIEN et al., 2019; MENDES et al., 2019). Razão pela qual também foi escolhido para a determinação da condutividade térmica das amostras utilizadas neste estudo.

Durante o ensaio com o HFM, a amostra é posicionada entre duas placas com um diferencial de temperatura (ΔT) previamente estabelecido. Essa diferença de temperatura gera um fluxo de calor (q) que flui através da amostra, da superfície mais quente para a superfície mais fria. Por meio de um sensor de fluxo de calor esse fluxo é medido e utilizado para calcular a condutividade térmica da amostra. Assim, conhecido este fluxo, bem como os valores de densidade de massa aparente, espessura e diferença de temperatura entre as placas, a condutividade térmica da amostra é calculada pelo equipamento usando a lei de Fourier.

Na presente pesquisa a condutividade térmica das amostras foi definida pela média das medidas realizadas no intervalo de temperaturas compreendido entre 20°C e 40°C, mantendo-se um ΔT constante de 10°C, mínimo recomendado pela ASTM C 518 (2004). 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 (NEMATOLLHI 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.

3.1.4. Capacidade de calor específico

A capacidade de calor específico das placas foi determinada por meio de Calorimetria Diferencial Exploratória e seguiu a metodologia adotada pela ASTM E1269 (2011). 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 DSC-60 da marca Shimadzu (Figura 14), para uma faixa de temperatura de 0 a 100° C, com taxa de aquecimento e resfriamento de 10°C/min. De acordo com o fabricante este equipamento possui alta sensibilidade em toda a faixa de temperatura que trabalha e por isso sua taxa de erro é de + 1 µW.

Figura 14 - Calorímetro DSC 60



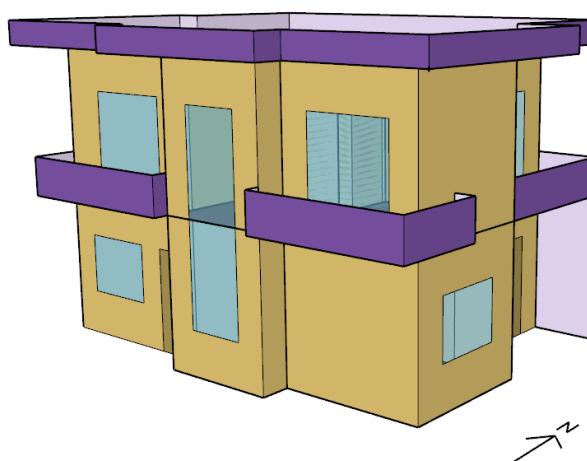
Fonte: Elaborado pelo autor, 2020

3.2. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

3.2.1. Característica da residência hipotética

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 LSF, estrutura suporte para as placas em estudo, foi elaborado um modelo termoenergético de uma residência unifamiliar de dois andares (Figura 15). 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 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.

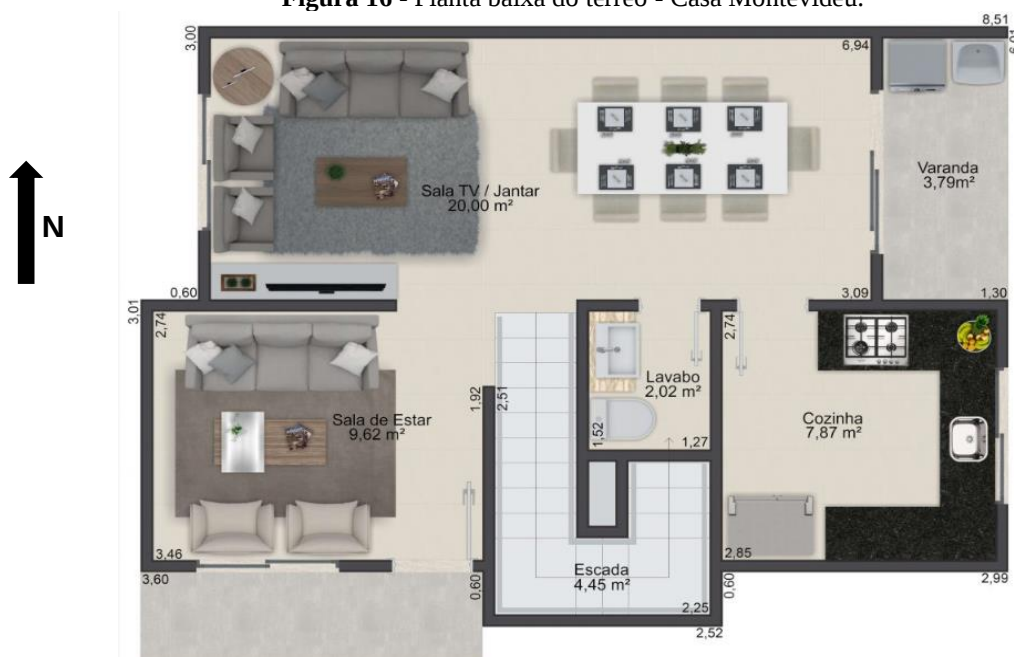
Figura 15 – Vista em perspectiva do modelo termoenergético da edificação. Sem escala.



Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

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, 2019). 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 16 e 17.

Figura 16 - Planta baixa do térreo - Casa Montevideu.



Fonte: (SMART, 2019).

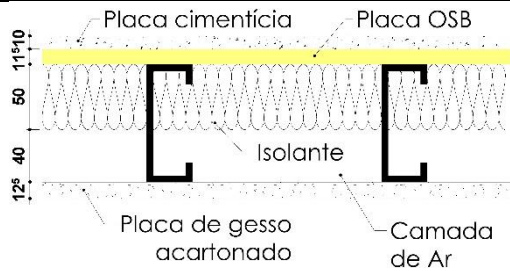
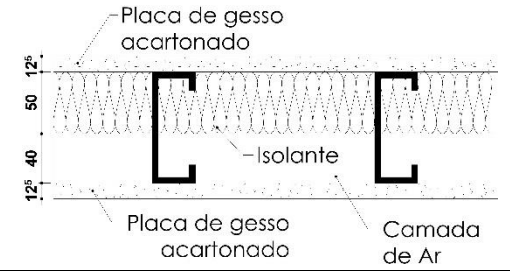
Figura 17 - Planta baixa do segundo piso - Casa Montevideu.



Fonte: (SMART, 2019). Legenda: BWC - Banheiro

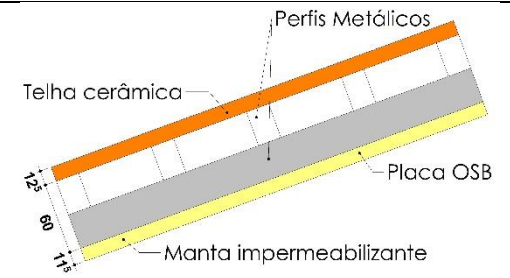
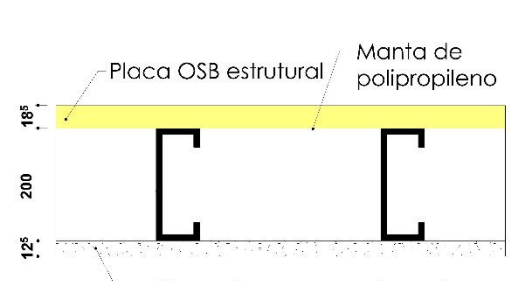
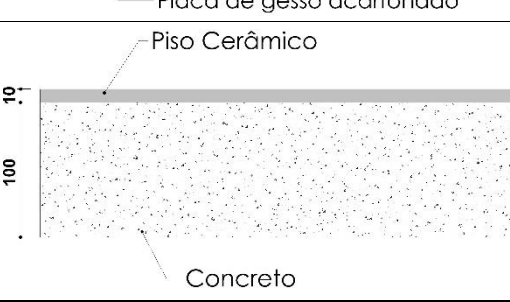
Os sistemas de vedação da edificação são quase idênticos para todos os casos estudados e se diferenciam basicamente pelo tipo de placa empregada na vedação externa: placa cimentícia ou placa de cimento álcali-ativado. Nas Figuras 18 e 19 é apresentado o detalhamento da composição dos sistemas utilizados e na Tabela 2 são apresentadas as dimensões das portas e esquadrias que limitam o contato entre o ambiente externo e o interior da edificação.

Figura 18 - Fechamentos verticais

Fechamento externo	 Diagrama de fechamento externo vertical. A estrutura é composta por uma placa cimentícia (11,5 cm) no topo, seguida por uma placa OSB (10 cm). Abaixo, há uma camada de isolante (50 cm) com perfis metálicos. Na base, há uma placa de gesso acartonado (12,5 cm) e uma camada de ar (40 cm).
Fechamento interno	 Diagrama de fechamento interno vertical. A estrutura é composta por uma placa de gesso acartonado (12,5 cm) no topo, seguida por uma camada de isolante (50 cm) com perfis metálicos. Na base, há uma placa de gesso acartonado (12,5 cm) e uma camada de ar (40 cm).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019)

Figura 19 - Fechamentos horizontais

Laje e cobertura	 Diagrama de laje e cobertura horizontal. A estrutura é composta por uma telha cerâmica (22 cm) no topo, seguida por perfis metálicos (9 cm), uma placa OSB (11,5 cm) e uma manta impermeabilizante.
Piso	 Diagrama de piso horizontal. A estrutura é composta por uma placa OSB estrutural (18,5 cm) no topo, seguida por uma manta de polipropileno (200 cm) e uma placa de gesso acartonado (12,5 cm).
	 Diagrama de piso horizontal. A estrutura é composta por um piso cerâmico (10 cm) no topo, seguido por uma camada de concreto (100 cm).

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

Tabela 2 – Dimensões das aberturas

Local	Tipo de abertura	
	Porta	Janela
Suíte e Dormitórios	Porta de correr 2 folhas (1,8x2,1m)	-
Closet e Bwc	-	Janela de abrir (0,6x0,6m)
Escada	Cortina de vidro (1,2x3,1m)	
Sala de TV/Jantar	Porta de correr 2 folhas (1,8x2,1m)	Janela de correr 2 folhas (1,5x1,2m)
Sala de Estar	Porta de abrir (0,9x2,1m)	Janela de correr 2 folhas (1,5x1,2m)
Cozinha	-	Janela de correr 2 folhas (1,5x1,2m)

Fonte: Elaborado pelo autor (2019).

3.2.2. Parâmetros de modelagem: padrões de uso e ocupação do edifício, propriedades termofísicas e variáveis climáticas.

Durante o processo de confecção do modelo cada ambiente da residência estudada foi modelado como uma zona térmica. Além disso, foram incluídos na simulação, os ganhos internos de calor oriundos da ocupação da edificação e da utilização dos equipamentos e sistemas de iluminação. Considerou-se ainda, que a habitação é naturalmente ventilada. Assim, a partir das recomendações do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2012), foram criadas rotinas de ocupação da edificação e uso de seus componentes.

Conforme o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) o tamanho médio da família brasileira é de três pessoas. Entretanto, como a edificação estudada possui três dormitórios, suas rotinas de uso e ocupação foram estipuladas considerando-se 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 ($1 \text{ clo} = 0.155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$) e possuem uma taxa média de liberação de calor igual 120 W^1 . A densidade potência instalada de iluminação foi fixada em $6 \text{ W}/\text{m}^2$, conforme recomendação do RTQ-R (2012). Na Tabela 3 são descritos os padrões de uso e ocupação da edificação.

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.

Tabela 3 - Padrões de uso e ocupação

Ambiente	Ocupação	Uso Iluminação	Uso Equipamentos
Sala	50% de 13h – 18h 100% de 18h – 22h	16h – 22h	14h – 22h
Quartos	100% de 22h – 08h	06h-08h 22h – 00h	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

Os ganhos internos de calor devido à utilização de equipamentos foram fixados em 9,18 W/m². Tal valor foi calculado levando em consideração os eletrodomésticos comuns à maior parte das residências brasileiras (PROCEL, 2007; IBGE, 2015) e os padrões de utilização estipulados pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL (2019). Na Tabela 4 são apresentados os equipamentos considerados, bem como o cálculo do consumo médio diário de cada equipamento.

Tabela 4 - 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			
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: Elaborado pelo autor (2019).

De acordo com Frota e Schiffer (2001), a ventilação natural pode ser utilizada como estratégia passiva de resfriamento de ambientes, uma vez que, além de promover a renovação do ar ela pode proporcionar a redução da sua carga térmica quando a temperatura externa for menor que a interna. Por este motivo, visando o melhor aproveitamento da ventilação natural, a estratégia adotada foi baseada no controle automático por temperatura. Assim, sempre que a temperatura interna fosse superior a temperatura externa e tivesse superado a média do limite inferior de temperaturas de neutralidade mensal de cada cidade, as janelas seriam abertas caso o contrário elas permaneceriam fechadas. 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%. A inserção da ventilação no modelo termoeenergético, foi realizada por meio do objeto *AirflowNetwork*, conforme demonstrado por Pereira *et al.* (2013).

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 15220-2 (ABNT, 2005a), conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Propriedades dos materiais

Material	Espessura (m)	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)	Condutividade térmica (W/(m*K))	Calor específico (KJ / Kg*K)
Gesso acartonado	0,0125	1000	0,35	0,84
Lã de vidro	0,050	60	0,045	0,70
Concreto	0,100	2400	1,75	1,00
Vidro comum	0,004	2500	1,00	0,84
Telha cerâmica	0,010	1900	1,05	0,92
Placa OSB	0,115; 0,185	550	0,12	2,30
Piso Cerâmico	0,010	1600	0,90	0,92

Fonte: Adaptado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

Tabela 6 - Resistência das câmaras de ar não ventiladas, com largura maior que a espessura

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} m ² .(K/W)		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

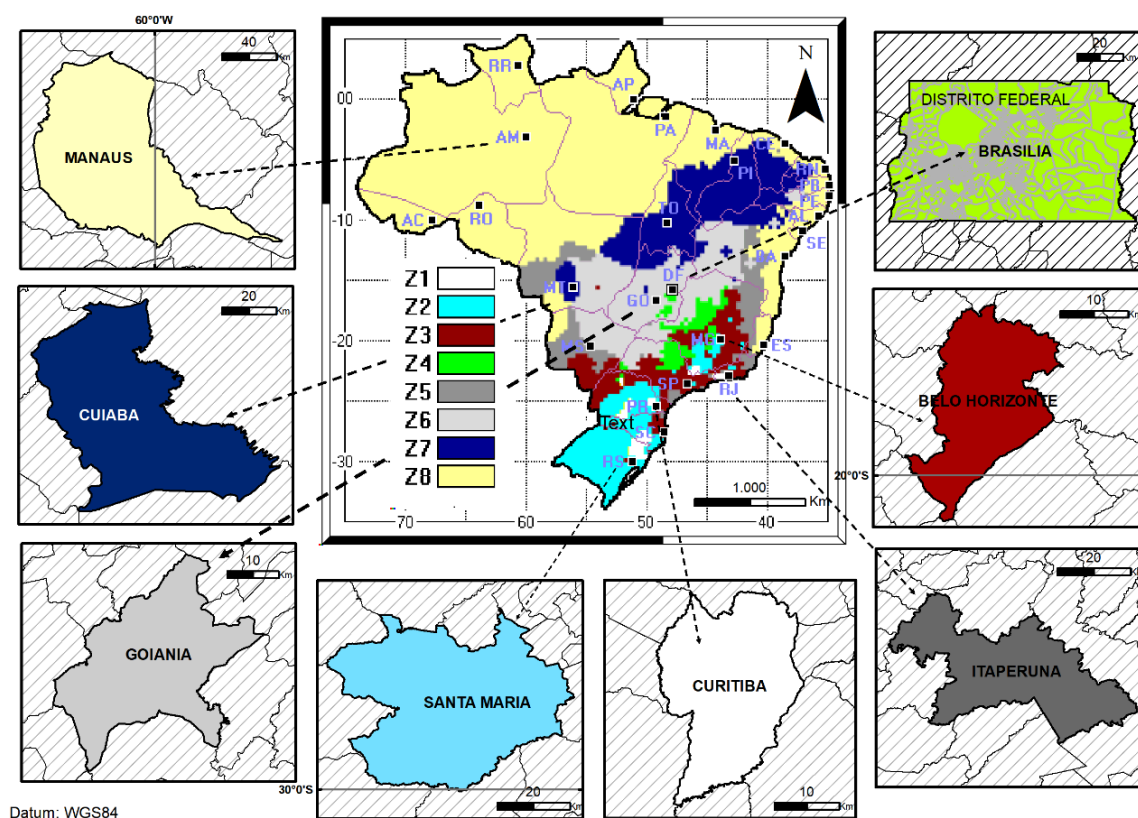
Fonte: NBR 15220-2 2 (ABNT, 2005a).

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 15220-3 (ABNT, 2005b). Assim, ao final, a partir das placas originais, serão modeladas 120 “amostras”: 5 placas x 3 tratamentos x 8 zonas bioclimáticas.

Devido a maior facilidade para obtenção de dados climáticos, 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) foram escolhidas como cidades representativas das zonas bioclimáticas brasileiras para a realização das simulações (Figura 20). 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.

Figura 20- Zonas Bioclimáticas



Fonte: Adaptado do programa ZBBR v.1.1 (2020).

² Apesar de pouco usual, a cidade de Itaperuna-RJ foi escolhida como representativa da Z05 de forma a aumentar a diversidade de cidades estudadas.

3.2.3. Dados de modelagem: arquivos climáticos

Para a realização das simulações foram utilizados arquivos climáticos em formato TMY (*Typical Meteorological Year*), das oito cidades escolhidas neste estudo. Tais arquivos estão disponíveis no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2019) da Universidade Federal de Santa Catarina e são compostos por um conjunto de variáveis que caracterizam um determinado clima, para todas as 8760 horas do ano.

A metodologia utilizada para a obtenção desses arquivos, consiste na compilação de dados referentes a vários meses sem extremos de temperaturas, provenientes de diversos anos (RORIZ, 2012). No caso deste estudo, o ano climático de referência foi criado levando em consideração os dados climáticos obtidos no período de 2003 a 2017, para cada uma das cidades escolhidas.

Este formato de arquivo foi escolhido pelo fato de estar disponível para todas as cidades escolhidas e por ser composto por um intervalo de referência recente. Além disso, a ASHRAE 55 (2017) referência a utilização deste tipo de arquivo para simulação de ambientes naturalmente ventilados.

3.3. ANÁLISE DOS DADOS

3.3.1. 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 (2017), no qual a partir de uma temperatura neutra interna (obtida pela Equação 8), são previstos intervalos confortáveis de temperatura com limites de tolerância ou aceitabilidade de 80% ou 90% de satisfação. Nesta pesquisa foi adotado um limite normativo de aceitabilidade de 80% ($T_n \pm 3,5^\circ\text{C}$).

$$T_n = 0,31 \times T_e + 17,8 \quad (8)$$

Onde:

T_n = Temperatura neutra

T_e = Temperatura média externa mensal ³

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.

3.3.2 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 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 (SHAPIRO; WILK, 1965). 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 (JOHNSON; BHATTACHARYYA, 2006). 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. Em nosso 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

³ Para o cálculo da temperatura neutra foram utilizadas as normais climatológicas (1981-2010) disponibilizadas no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2019).

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 deveu ao fato do mesmo ser uma solução não paramétrica destinada a comparar três ou mais populações distintas, no caso deste estudo 3 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. A visualização dos resultados foi realizada por meio de gráficos de *boxplot*, elaborados no *software* Microsoft Excel devidamente licenciado (Microsoft 365, 2020).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. DENSIDADE DE MASSA APARENTE

Os resultados dos ensaios de densidade de massa aparente das placas são apresentados na Tabela 7. 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 (MEDRI; LANDI, 2014; OKADA *et al.*, 2009; ZUHUA *et al.*, 2009), 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 7 - Resultados dos ensaios de densidade ρ (kg/m³)			
Nr	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
DESV. PAD.	19,24	58,01	40,87

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 que as 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.

4.2. ABSORTÂNCIA DA RADIAÇÃO SOLAR

Após a realização dos ensaios de densidade procedeu-se os ensaios de absorvência da radiação solar. Como resultado, observa-se na Tabela 8 que a placa PCAA1 apresenta valor de absorvência 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 absorvência 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 8 - Resultado dos ensaios de absorvência à radiação solar (α) das placas

Nr	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
DESV. PAD.	0,006	0,009	0,011

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Considerando apenas os valores de absorvência 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 temperatura mais elevadas.

Entretanto, quando as placas foram pintadas com tinta acrílica cor branco neve seus valores de absorvência reduziram significativamente e diferiram muito pouco entre si (Tabela 9). Isso possivelmente ocorreu porque conforme constatado por (PEREIRA *et al*, 2017) 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 9 - Resultado dos ensaios de absorvência à radiação solar (α) das placas após serem pintadas com tinta cor branco neve

Nr	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
DESV. PAD.	0,025	0,017	0,021

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.3. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Por meio do medidor de fluxo de calor HFM 436 foram obtidos os valores de condutividade térmica das placas analisadas (Tabela 10). 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; NBR 15220-2, 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. Por fim, devido ao fato das placas terem sido fornecidas por uma empresa, como relatado no item 3.1, e pela composição das mesmas não ter sido completamente detalhada não se pode tirar conclusões sobre o porquê das PCPs apresentarem melhores resultados.

Tabela 10 – Resultados dos ensaios de condutividade térmica λ (W/(m.K))

Nr	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
DESV. PAD.	0,022	0,026	0,023

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.4. CAPACIDADE DE CALOR ESPECÍFICO

Por meio do método de calorimetria diferencial exploratória a capacidade de calor específica das placas foi determinada. Na Tabela 11 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 para placas cimentícias e em estudos como os de Snell *et al.* (2017) e Villaquirán-Caicedo *et al.* (2015) para materiais álcali-ativados.

Tabela 11 – Resultados dos ensaios de capacidade de calor específico c (J / Kg.K)

Nr	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
DESV. PAD.	74	33	42

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4.5. DESEMPENHO TÉRMICO DAS PLACAS

De acordo com os procedimentos descritos no item 3.3.1, foram calculadas as faixas de temperatura neutra e os limites inferiores e superiores de temperatura para o limite de aceitabilidade de 80% definido pela ASHRAE 55 (2017). Tais resultados são apresentados na Tabela 12 e foram utilizados como parâmetro para avaliar o desempenho térmico proporcionado pela aplicação de cada tipo de placa.

Tabela 12 - Temperatura neutra e limites máximos e mínimos de temperaturas mensais

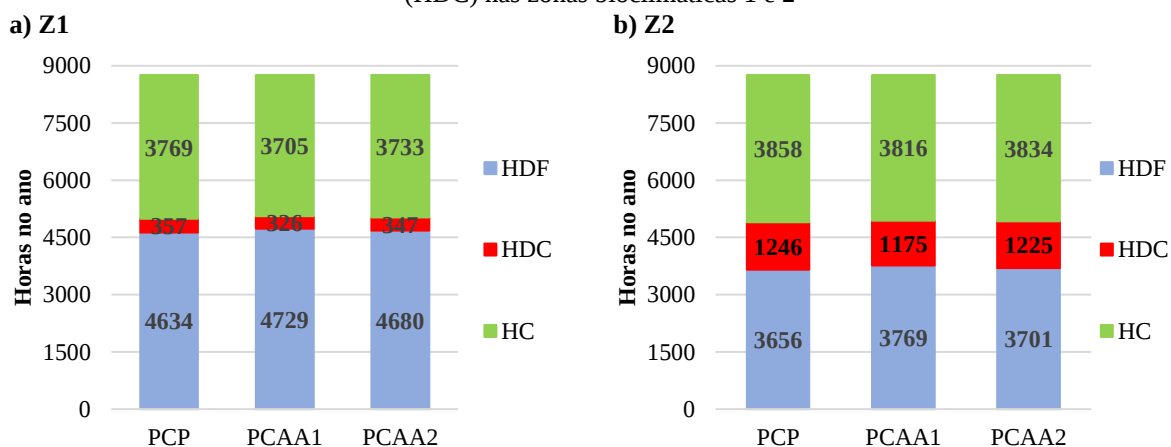
CURITIBA												
Meses	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. Média Ponderada	20.9	21.0	20.1	18.3	15.1	13.9	13.5	14.6	15.3	17.1	18.9	20.2
Limite Inferior	20.8	20.8	20.5	20.0	19.0	18.6	18.5	18.8	19.0	19.6	20.2	20.6
Limite Superior	27.8	27.8	27.5	27.0	26.0	25.6	25.5	25.8	26.0	26.6	27.2	27.6
Temperatura Neutra	24.3	24.3	24.0	23.5	22.5	22.1	22.0	22.3	22.5	23.1	23.7	24.1
SANTA MARIA												
Temp. Média Ponderada	24.9	24.0	22.9	19.4	16.0	14.2	13.4	15.1	16.4	19.4	21.6	24.1
Limite Inferior	22.0	21.7	21.4	20.3	19.3	18.7	18.5	19.0	19.4	20.3	21.0	21.8
Limite Superior	29.0	28.7	28.4	27.3	26.3	25.7	25.5	26.0	26.4	27.3	28.0	28.8
Temperatura Neutra	25.5	25.2	24.9	23.8	22.8	22.2	22.0	22.5	22.9	23.8	24.5	25.3

BELO HORIZONTE												
Temp. Média Ponderada	23.4	23.8	23.4	22.5	20.5	19.3	19.1	20.3	21.6	22.6	22.7	22.9
Limite Inferior	21.6	21.7	21.6	21.3	20.7	20.3	20.2	20.6	21.0	21.3	21.3	21.4
Limite Superior	28.6	28.7	28.6	28.3	27.7	27.3	27.2	27.6	28.0	28.3	28.3	28.4
Temperatura Neutra	25.1	25.2	25.1	24.8	24.2	23.8	23.7	24.1	24.5	24.8	24.8	24.9
BRASILIA												
Temp. Média Ponderada	21.6	21.7	21.6	21.3	20.2	19.0	19.0	20.6	22.2	22.4	21.5	21.4
Limite Inferior	21.0	21.0	21.0	20.9	20.6	20.2	20.2	20.7	21.2	21.2	21.0	20.9
Limite Superior	28.0	28.0	28.0	27.9	27.6	27.2	27.2	27.7	28.2	28.2	28.0	27.9
Temperatura Neutra	24.5	24.5	24.5	24.4	24.1	23.7	23.7	24.2	24.7	24.7	24.5	24.4
ITAPERUNA												
Temp. Média Ponderada	26,8	27,0	26,3	24,9	22,3	20,9	20,8	21,7	22,9	24,3	25,0	25,9
Limite Inferior	22,6	22,7	22,5	22,0	21,2	20,8	20,7	21,0	21,4	21,8	22,1	22,3
Limite Superior	29,6	29,7	29,5	29,0	28,2	27,8	27,7	28,0	28,4	28,8	29,1	29,3
Temperatura Neutra	26,1	26,2	26,0	25,5	24,7	24,3	24,2	24,5	24,9	25,3	25,6	25,8
GOIANIA												
Temp. Média Ponderada	24.4	24.5	24.5	24.6	23.1	21.8	22.0	24.0	25.5	25.6	24.7	24.3
Limite Inferior	21.9	21.9	21.9	21.9	21.5	21.1	21.1	21.7	22.2	22.2	22.0	21.8
Limite Superior	28.9	28.9	28.9	28.9	28.5	28.1	28.1	28.7	29.2	29.2	29.0	28.8
Temperatura Neutra	25.4	25.4	25.4	25.4	25.0	24.6	24.6	25.2	25.7	25.7	25.5	25.3
CUIABA												
Temp. Média Ponderada	27.0	26.9	26.8	26.6	24.7	23.5	23.4	25.3	26.8	27.9	27.5	27.2
Limite Inferior	22.7	22.6	22.6	22.5	22.0	21.6	21.6	22.1	22.6	22.9	22.8	22.7
Limite Superior	29.7	29.6	29.6	29.5	29.0	28.6	28.6	29.1	29.6	29.9	29.8	29.7
Temperatura Neutra	26.2	26.1	26.1	26.0	25.5	25.1	25.1	25.6	26.1	26.4	26.3	26.2
MANAUS												
Temp. Média Ponderada	26.3	26.3	26.3	26.4	26.6	26.7	27.0	27.6	28.0	28.0	27.6	26.9
Limite Inferior	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.6	22.7	22.9	23.0	23.0	22.9	22.6
Limite Superior	29.5	29.5	29.5	29.5	29.5	29.6	29.7	29.9	30.0	30.0	29.9	29.6
Temperatura Neutra	26.0	26.0	26.0	26.0	26.0	26.1	26.2	26.4	26.5	26.5	26.4	26.1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

O desempenho térmico das placas foi analisado por meio de simulação computacional e conforme pode-se observar nas Figuras 21a e 21b 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 21 - Horas em Conforto (HC), Horas em Desconforto por Frio (HDF) e Horas em Desconforto por Calor (HDC) nas zonas bioclimáticas 1 e 2

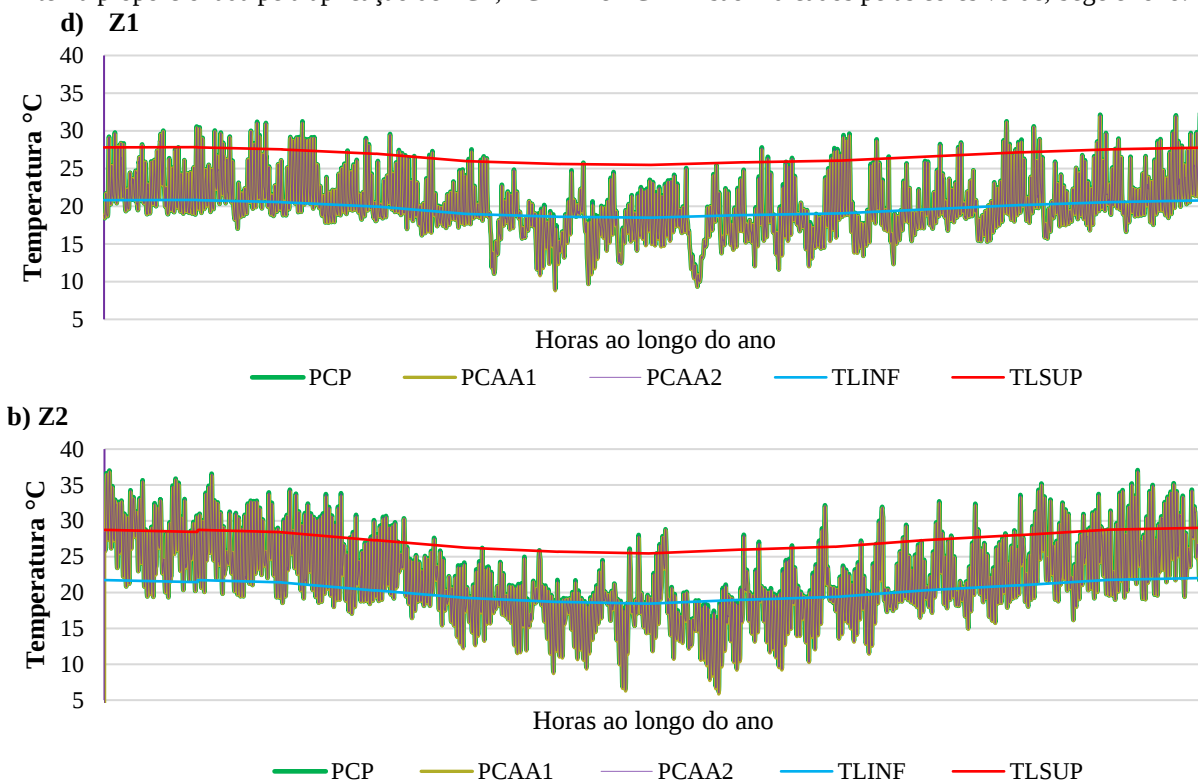


Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 absorvância a 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 absorvância, 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 22a e 22b) estabelecida pela (ASHRAE 55, 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 (Tabelas A1 e A2). 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 22 – Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z1 e Z2. Os limites superiores e inferiores de temperatura são representados pelas linhas vermelha e azul respectivamente. A variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de PCP, PCAA1 e PCAA2 são indicados pelas cores verde, bege e roxo.



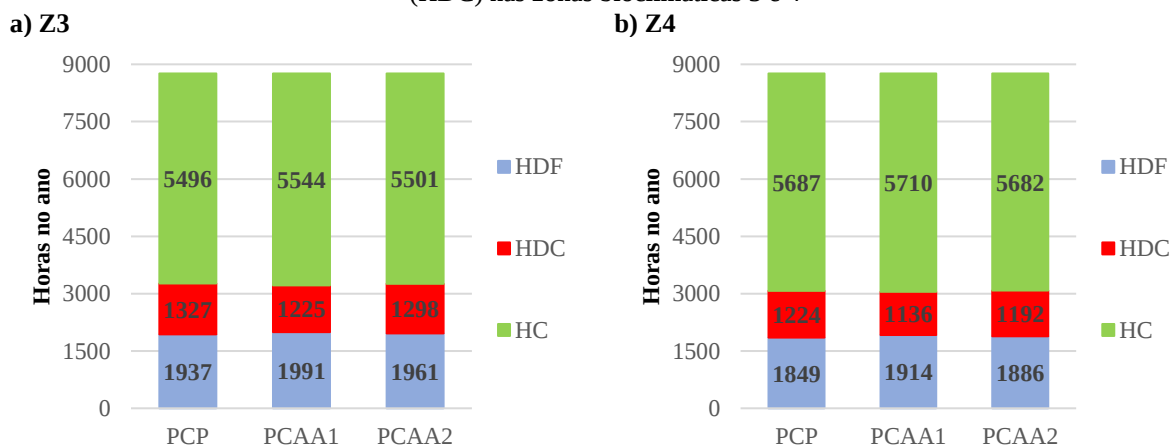
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 23^a e 23b, percebe-se que para as cidades de Belo Horizonte (Z3) e Brasília (Z4) a aplicação dos sistemas de vedação aqui 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 24^a e 24b. 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

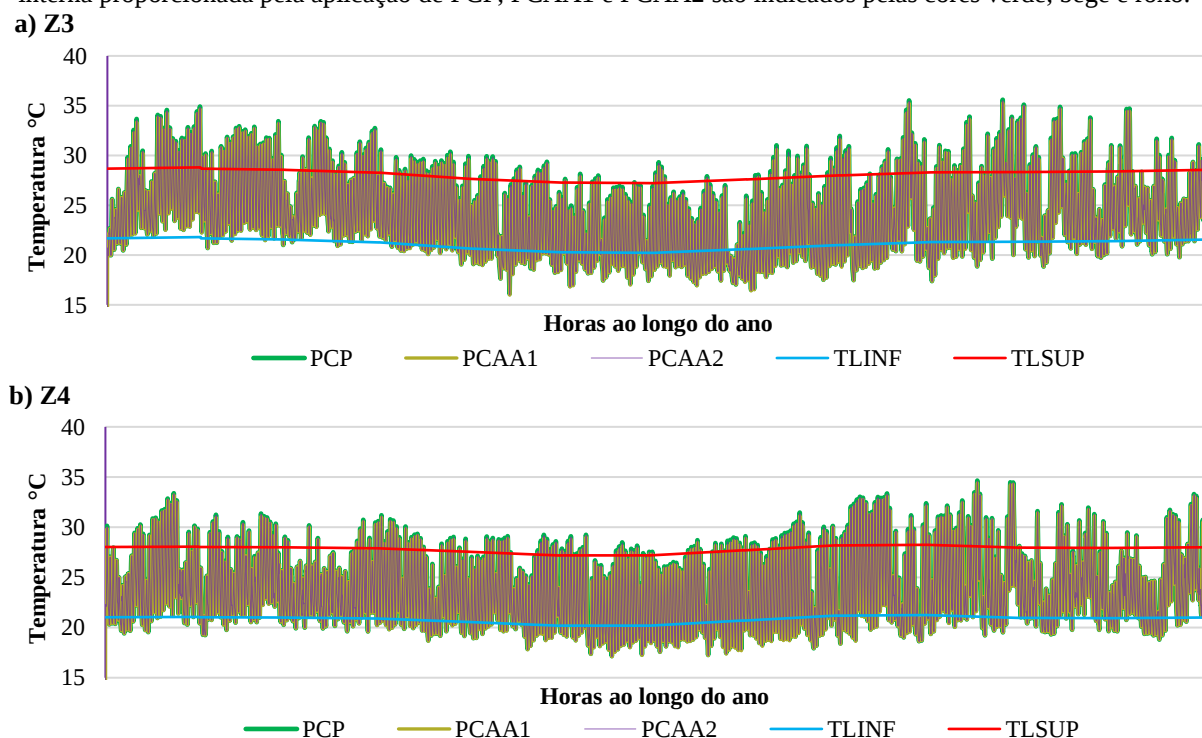
forma contrária ao que aconteceu na Z1 e Z2 os menores valores de absorvância das PCAA1, podem ter contribuído para o seu melhor desempenho térmico nessas zonas.

Figura 23 – Horas em Conforto (HC), Horas em Desconforto por Frio (HDF) e Horas em Desconforto por Calor (HDC) nas zonas bioclimáticas 3 e 4



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 24 – Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z3 e Z4. Os limites superiores e inferiores de temperatura são representados pelas linhas vermelha e azul respectivamente. A variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de PCP, PCAA1 e PCAA2 são indicados pelas cores verde, bege e roxo.



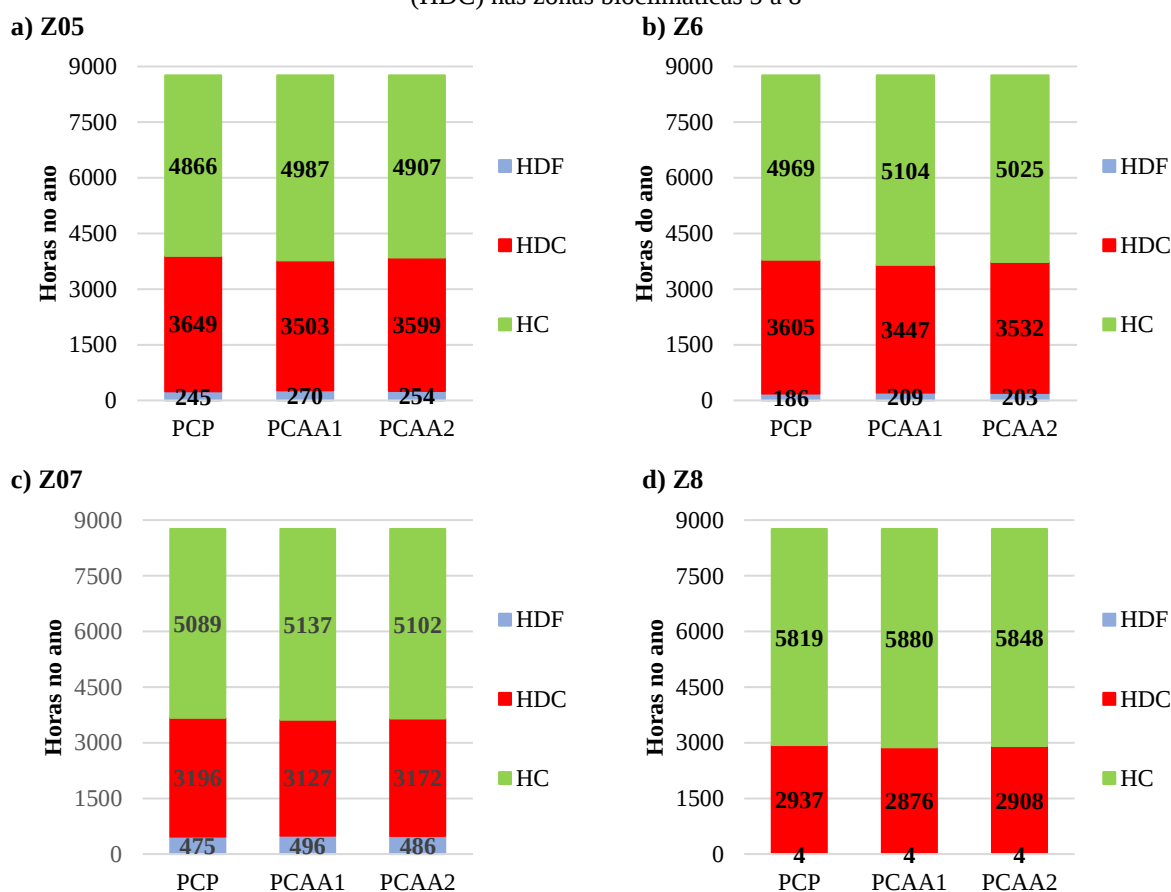
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 (Tabelas A3 e A4), 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 mesmas 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 25^a a 25d). Entretanto, como nessas regiões predominam temperaturas mais elevadas, em alguns períodos as temperaturas internas das edificações ficaram por diversos períodos acima dos 35°C, tendo chegado a mais de 43°C na Z5 em todos os três casos. Nessas zonas bioclimáticas o desconforto por calor foi o principal fator que influenciou no desempenho térmico da edificação.

Figura 25 – Horas em Conforto (HC), Horas em Desconforto por Frio (HDF) e Horas em Desconforto por Calor (HDC) nas zonas bioclimáticas 5 a 8



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

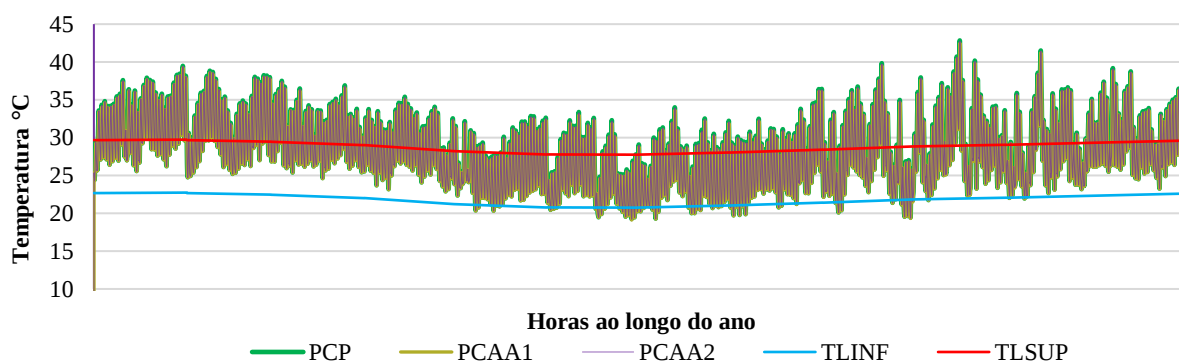
Devido ao fato de possuir menor absorvância e essa propriedade ser a que mais impactou no desempenho térmico das placas, a PCAA1 obteve melhores resultados que os outros dois tipos de placas nessas zonas. Além disso como todas as placas possuem baixa condutividade

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.

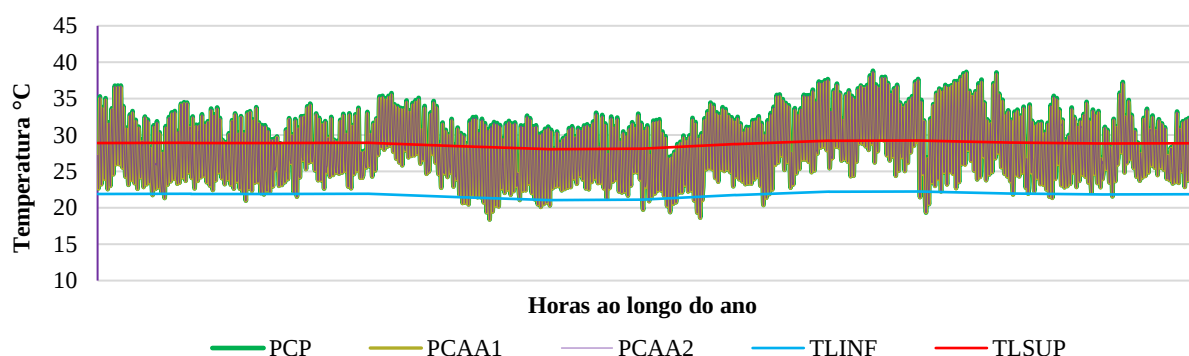
No geral as temperaturas médias mensais nessas zonas ficaram entre 24,7°C nos meses de inverno e 31,6°C nos meses de verão (Tabelas A5 a A8), para os três tipos de sistema de vedação, com uma pequena variação entre 0 e 0,2°C dependendo do sistema utilizado. Porém, conforme apresentado nas Figuras 26^a a 26^d, 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. Adequações no projeto e a adoção de dispositivos de sombreamento das aberturas conforme recomendado pela 15220-3 (ABNT, 2005^a), poderiam auxiliar na melhoria das condições de conforto da edificação nessas zonas. O auto sombreamento 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.

Figura 26 - Temperatura horária ao longo do ano nas zonas Z5 a Z8. Os limites superiores e inferiores de temperatura são representados pelas linhas vermelha e azul respectivamente. A variação horária da temperatura interna proporcionada pela aplicação de PCP, PCAA1 e PCAA2 são indicados pelas cores verde, bege e roxo.

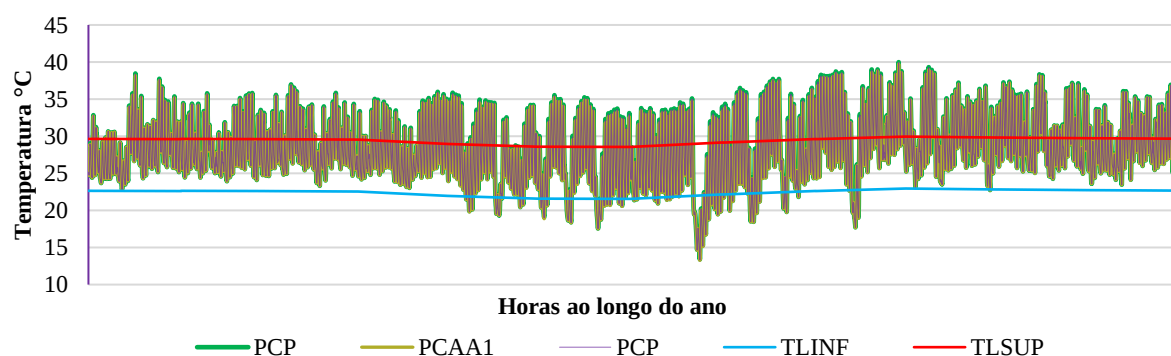
a) Z5



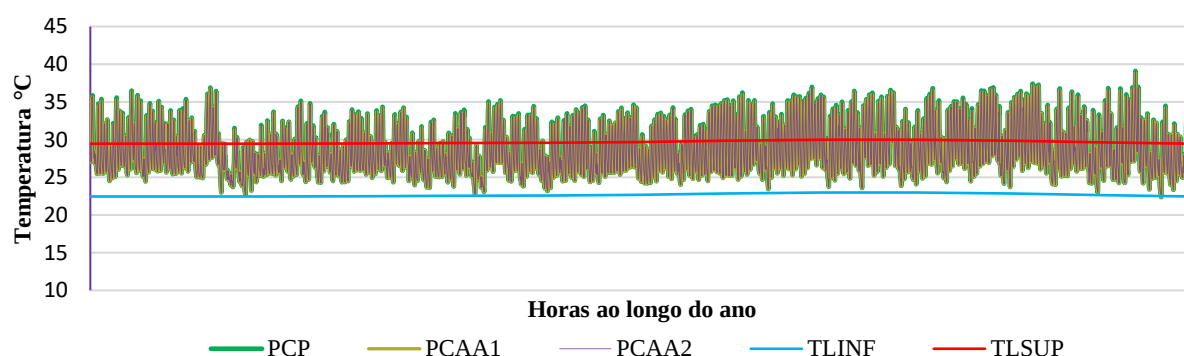
b) Z6



c) Z7



d) Z8



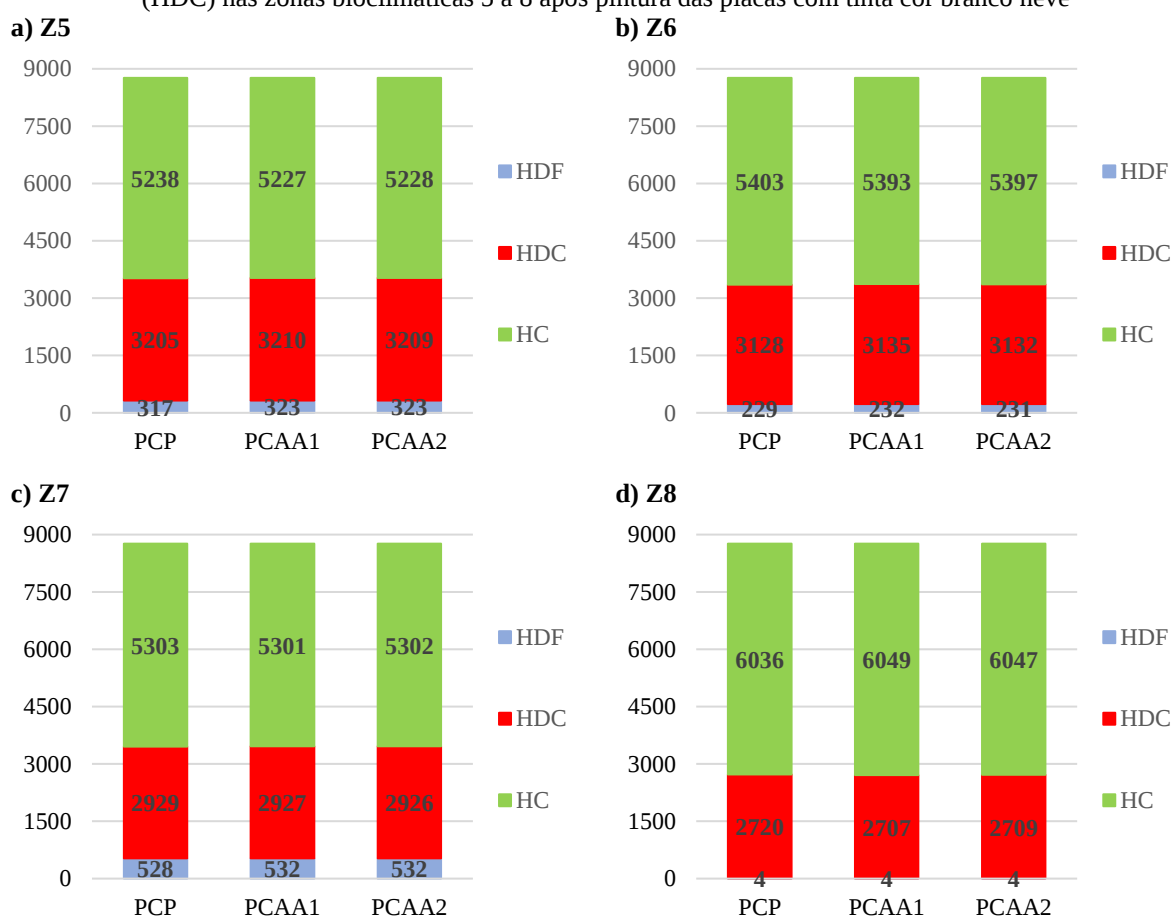
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 (PEREIRA *et al.*, 2017). Por este motivo como os resultados obtidos demonstram que a absorvância influenciou diretamente nas condições de conforto no interior da edificação, procedeu-se a pintura das placas para verificar se essa ação propiciaria redução das horas de desconforto por calor nessas 4 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 de até 6%, 7% e 9% no número HC proporcionados pelas placas PCAA1, PCAA2 e PCP

respectivamente em Z6, zona que apresentou os melhores resultados (Figura 27a a 27d). 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 superioridade 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 27 - Horas em Conforto (HC), Horas em Desconforto por Frio (HDF) e Horas em Desconforto por Calor (HDC) nas zonas bioclimáticas 5 a 8 após pintura das placas com tinta cor branco neve



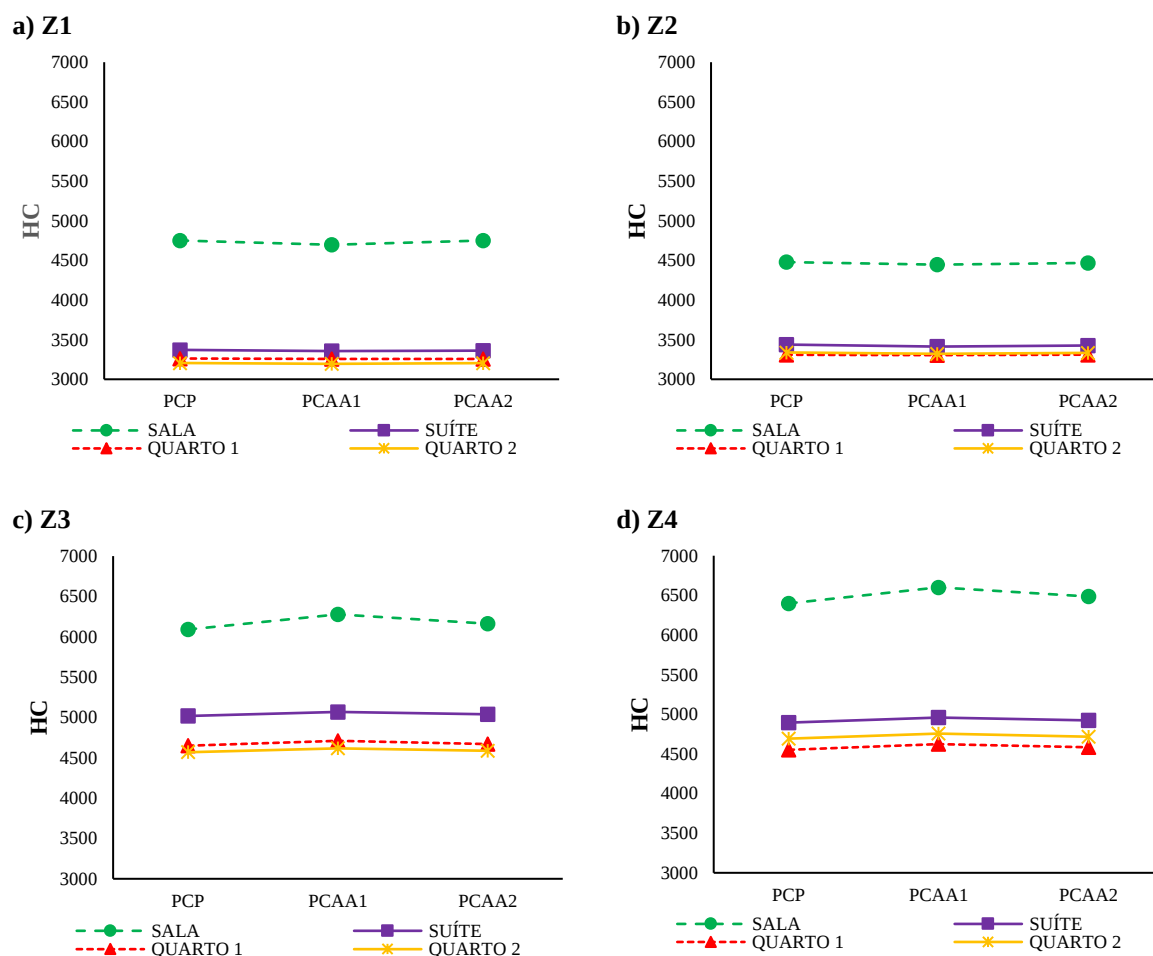
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

De forma geral, ao analisar todos os gráficos descritivos sobre 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, 2013c), que pode variar entre 7 e 12% dependendo da zona bioclimática.

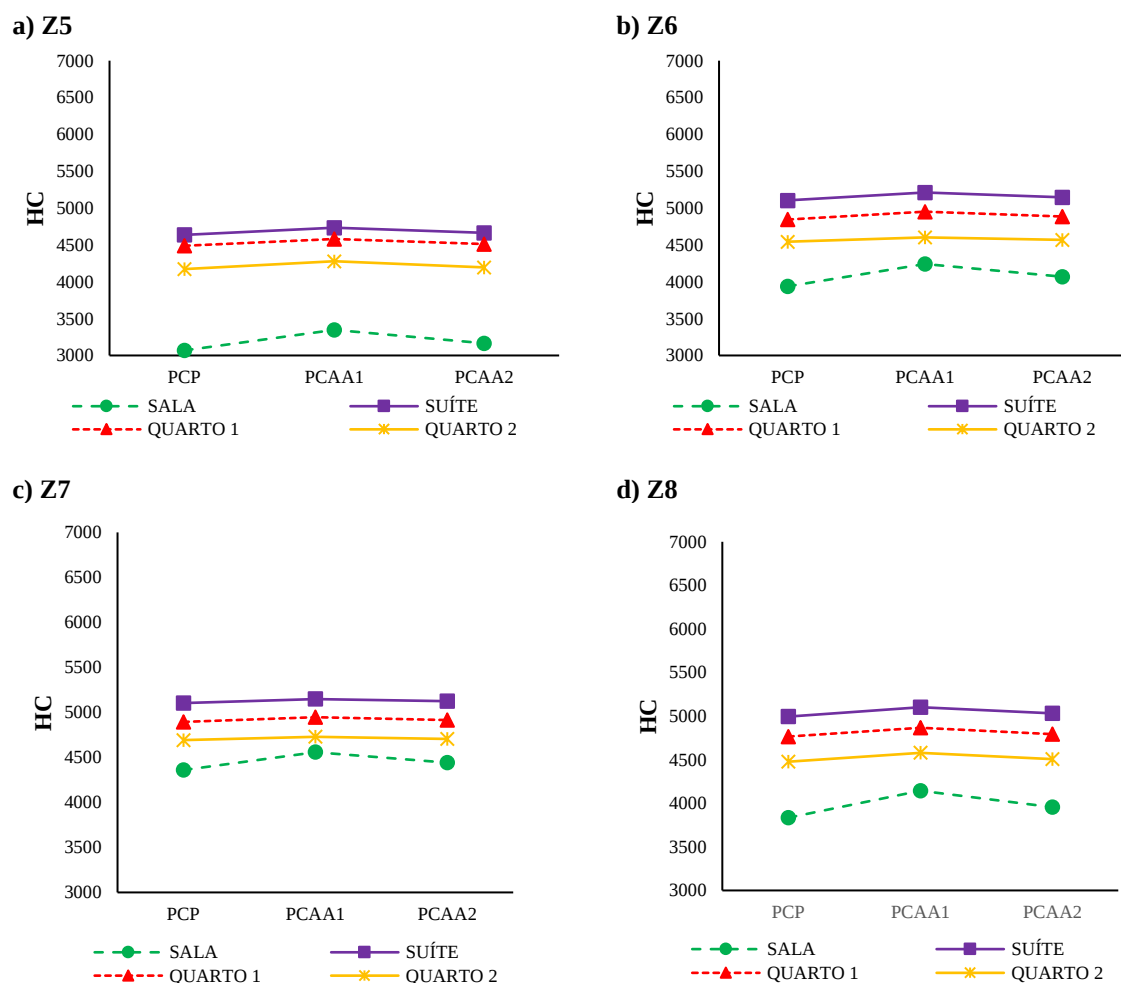
Os resultados obtidos para temperatura média mensal da habitação apresentam comportamento semelhante quanto às variações de temperatura operativa interna, para todas as zonas, uma vez que as diferenças entre os valores máximos e mínimos são pequenas (em média de 0,2°C) para os três tipos de sistemas 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 28a a 28d 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. 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.

Figura 28 - Horas de conforto por ambiente Z1 a Z4

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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 29a a 29d). 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 29 - Horas de conforto por ambiente Z5 a Z8

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

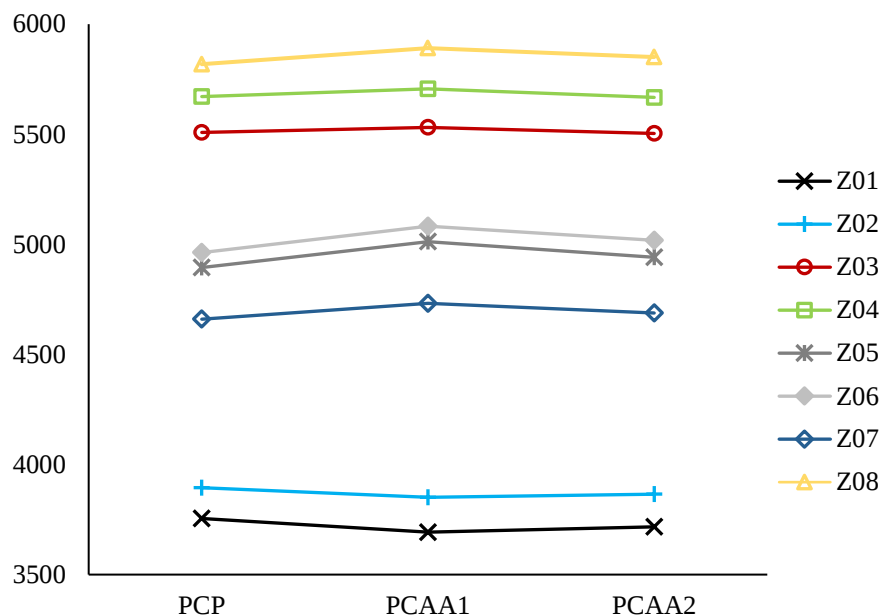
Por fim, ao se analisar todos os cenários propostos pode-se verificar que o processo de cura em autoclave pode ter favorecido o melhor desempenho da PCAA2 em climas frios quando comparadas a PCAA1. Tais diferenças se devem principalmente as variações nos valores de absorvância das duas placas, ocasionadas provavelmente pela variação de tonalidade e porosidade das suas superfícies.

4.6. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

Foi possível observar que a média da variável resposta “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 30). 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 30 - Comparativo horas de conforto térmico por zona



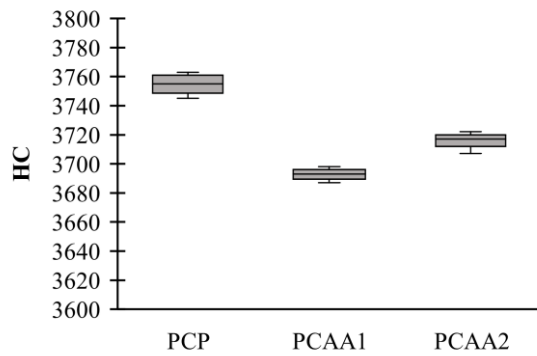
Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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; $p > 0,05$).

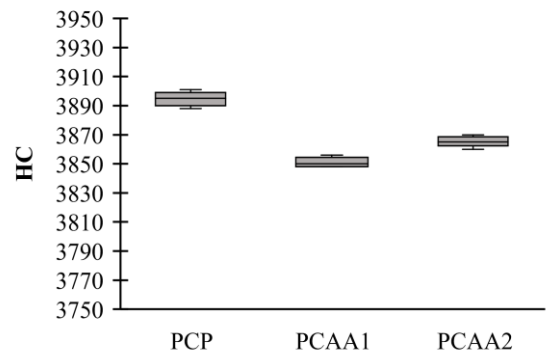
A análise de variância da variável HC nas zonas Z1, Z2, Z6 e Z8 e o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis realizado para os dados das zonas Z3, Z4, Z5 e Z7 revelaram diferenças significativas entre todas as placas, quando foram analisadas separadamente, dentro de cada zona bioclimática ($p < 0,05$) (Figura 31).

Figura 31 - Boxplot apresentando a variação da mediana das horas em conforto por zona bioclimática. As hastes inferiores e superiores representam os limites dos quartis; pontos pretos são valores atípicos (outliers).

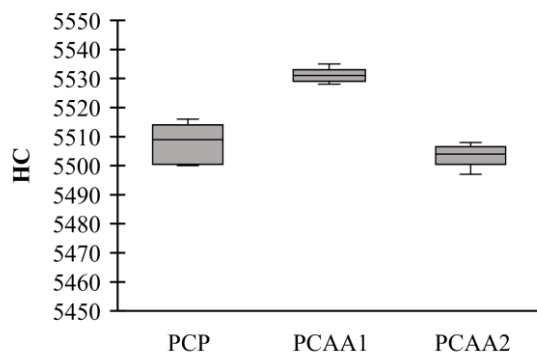
a) Z01



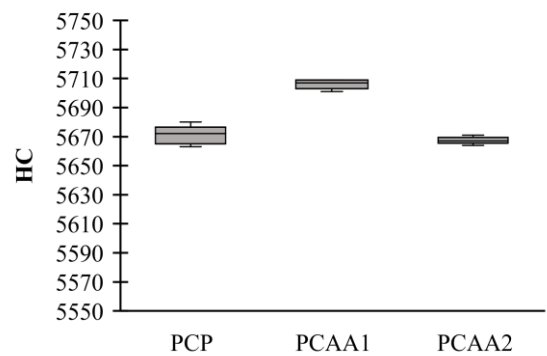
b) Z02



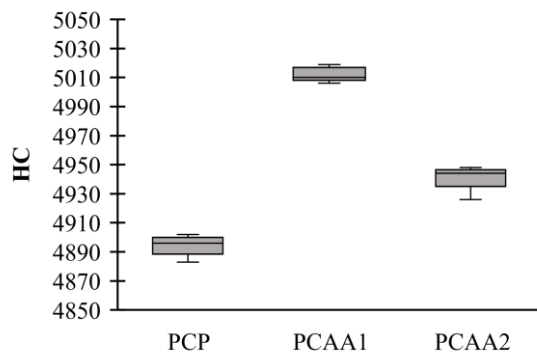
c) Z03



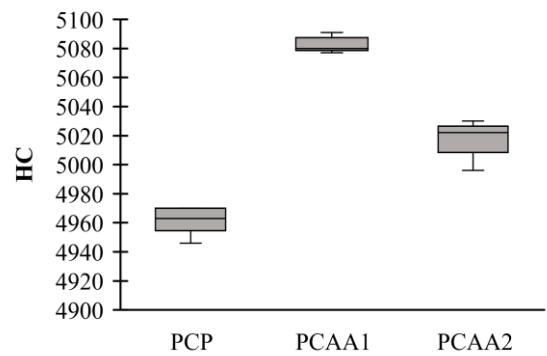
d) Z04



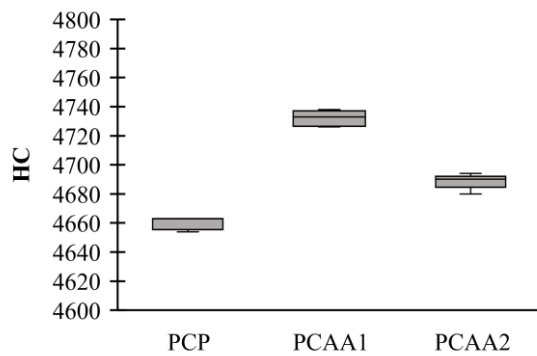
e) Z05



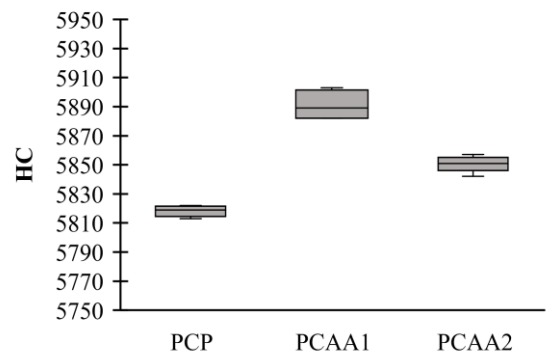
f) Z06



g) Z07



h) Z08



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

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.

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 (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 estão intimamente ligados à seus valores de absorvância a radiação solar, uma vez que as placas cimentícias apresentaram menores valores de condutividade térmica e maiores valores de capacidade de calor específico. 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.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho analisou o desempenho térmico de placas de cimento álcali-ativado em comparação com o de placas cimentícias convencionais. Adicionalmente foi investigado se as condições de cura das placas alternativas e o clima poderiam influenciar nos resultados. Três tipos de placa tiveram suas propriedades térmicas investigadas e foram testados para as oito zonas bioclimáticas definidas pela NBR 15.220-3 (ABNT, 2005a).

São conclusões deste trabalho:

- Os valores de absorvância da radiação solar das placas de cimento álcali-ativado foram até 32% menor que os apresentados pelas placas cimentícias convencionais. A tonalidade mais escura e a menor quantidade de poros na superfície da PCP impactaram diretamente nesses resultados. A placa alternativa que passou pelo processo de cura em autoclave (PCAA2) apresentou valores de absorvância mais altos que a PCAA1. Após serem pintadas com tinta branca todas as placas apresentaram redução significativa na quantidade de radiação solar absorvida, o que também reduziu as diferenças nos resultados obtidos por cada tipo de placa.

- A densidade apresentada pelas placas de cimento álcali-ativado também foi menor que o das placas cimentícias. Uma pequena diferença pode ser observada entre os valores de densidade apresentados pelas PCAA1 e PCAA2, 0,53 e 0,64, respectivamente.

- Embora tenha sido constatado que as placas de cimento álcali-ativado possuem baixa condutividade térmica, 0,207 e 0,203 W/m.K para PCAA1 e PCAA2, respectivamente, o resultado obtido para PCP foi até 38% menor.

- A capacidade de calor específico encontrada para PCAA1 foi de 737 J/Kg.K enquanto que para PCAA2 foi de 779 J/Kg.K. Tais valores ficaram pouco abaixo dos encontrados para a PCP 830 J/Kg.K.

- A análise do desempenho térmico das placas por meio de simulação computacional, permitiu verificar que para as zonas bioclimáticas brasileiras mais frias Z1 e Z2 as PCP tendem a proporcionar mais horas em conforto térmico no interior das edificações. Como as placas cimentícias apresentaram melhor condutividade térmica e capacidade de calor específica esses resultados estão ligados à sua maior capacidade de absorção da radiação solar. Entretanto o número de HC propiciado pela aplicação das três opções de sistema de vedação nesses climas ficou abaixo de 45% do período analisado. 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 Z8 a utilização da PCAA1 se mostrou como a opção que apresentou melhor desempenho térmico. Nessas zonas, para todas as placas apresentaram percentual de horas confortáveis foi superior a 55% do período analisado. Os melhores resultados foram propiciados pela PCAA1 quando aplicada na Z8, chegando a 67% das horas totais.

- O emprego de pintura branca nas placas como medida para redução do ganho de calor da edificação em zonas mais quentes (Z5, Z6, Z7 e Z8), propiciou um aumento de até 6%, 7% e 9% de HC para as placas PCAA1, PCAA2 e PCP respectivamente.

- A análise do desempenho térmico da edificação por ambiente mostrou que nas zonas Z01 a Z04 a sala foi o ambiente potencialmente mais confortável ao longo do ano, enquanto para as zonas Z05 a Z08 foi o local que propiciou o menor conforto térmico.

- A análise estatística das horas de conforto 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.

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. Porém em algumas zonas bioclimáticas se faz necessários ajustes na composição das paredes 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. Deixa-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Testar se a variação na espessura das placas pode influenciar diretamente no seu desempenho térmico. Para isso utilizar outras espessuras comerciais como 8mm e 12 mm;
- Avaliar o desempenho acústico das placas álcali-ativadas produzidas com resíduo de porcelanato e comparar com o desempenho de placas convencionais de cimento Portland.
- Investigar a influência da estratégia complementar de sombreamento (veneziana e/ou brises) na melhoria das condições de conforto nos ambientes, proporcionadas pela aplicação das PCAAs no sistema de vedação vertical externo.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL - ABDI. **Manual da construção industrializada: conceiros e etapas**. Brasília: ABDI, 2015. v. 1.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 518-04. **Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus**. West Conshohocken: 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM C 642-06. **Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete**. West Conshohocken: 2006

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E 1269-11. **Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning**. Standard Test Method for Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry. **Anais...**West Conshohocken: 2011

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM E 903-12. **Standard Test Method for Solar Absorptance , Reflectance , and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres**. West Conshohocken: 2012

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM G 173-03. **Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37° Tilted Surface**. West Conshohocken: 2003

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

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS - ANSI/ASHRAE STANDARD 169. **Climatic Data for Building Design Standards**. Atlanta: 2013

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro: 2005a

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15220-1: Desempenho térmico de edificações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: 2005c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-1:**

Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 1 : Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2013a

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-4: Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 4 : Sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE.** Rio de Janeiro: 2013b

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 15575-5: Edificações Habitacionais - Desempenho. Parte 4 : Requisitos para sistemas de cobertura.** Rio de Janeiro: 2013c

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **Consulta Nacional Atualização NBR 15575.** Disponível em: <https://www.abntonline.com.br/consultanacional/default.aspx>. Acesso em: 25 nov. 2020.

BALCIKANLI, M.; OZBAY, E. Optimum design of alkali activated slag concretes for the low oxygen/chloride ion permeability and thermal conductivity. **Composites Part B: Engineering**, v. 91, p. 243–256, 2016.

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.

BRASIL. INMETRO – **Instituto Nacional de Metrologia. Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R.** Rio de Janeiro, 2012.

CAO, V. D.; PILEHVAR, S.; SALAS-BRINGAS, C.; SZCZOTOK, A. M.; VALENTINI L.; CARMONA M.; RODRIGUEZ J. F.; KJØNIKSEN, A. L. Influence of microcapsule size and shell polarity on thermal and mechanical properties of thermoregulating geopolymer concrete for passive building applications. **Energy Conversion and Management**, v. 164, p. 198–209, 2018.

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.

COLANGELO, F.; ROVIELLO, G.; RICCIOTTI, L.; FERRÁNDIZ-MAS, V.; MESSINA, F.; FERONE, C.; TARALLO, O; CIOFFI, R.; CHEESEMAN, C. R.. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 266–272, 2018.

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, n. October 2018, p. 77–83, 2019.

DE DEAR, R. J.; BRAGER, G. S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 6, p. 549–561, 1 jul. 2002.

DHAKAL, U.; BERARDI, U.; RUSSEL, G.; RICHMAN, R. Hygrothermal performance of

hemcrete for Ontario (Canada) buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 142, p. 3655–3664, 2017.

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, n. April, p. 185–197, 2019.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas acrílica e PVA**. Campinas. Tese de Doutorado em Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, SP, 2008. 152p.

DUXSON, P.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; VAN DEVENTER, J. S.J. The role of inorganic polymer technology in the development of “green concrete”. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 12, p. 1590–1597, 2007a.

DUXSON, P.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; PROVIS, J. L.; LUKEY, G. C.; PALOMO, A.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007b.

EEMPRESA DE PESQUISA ENÉRGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 - ano base 2016**. Brasília. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2017vf.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2019

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Nota Técnica 030/2018**. Brasília. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT_EPE_030_2018_18Dez2018.pdf. Acesso em: 15 jun. 2019

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **International Energy Outlook 2017 Report**. Washington, 2017. Disponível em: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf). Acesso em: 24 jun. 2019.

FABIEN, A.; SEBAIBI, N.; BOUTOUIL, M. Effect of several parameters on non-autoclaved aerated concrete: use of recycling waste perlite. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 0, n. 0, p. 1–18, 2019.

FIRAWATI, I.; JASRUDDIN; SUBAER. On the Physico-Mechanics, Thermal and Microstructure Properties of Hybrid Composite Epoxy-Geopolymer for Geothermal Pipe Application. **MATEC Web of Conferences**, v. 97, p. 01007, 2017.

FRECHETTE, L. A. **Building Smarter With Alternative Materials**. Carlsband: Craftsman Book Comapny, 1999.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5ª ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 244p.

GARCIA-LODEIRO, I.; PALOMO, A.; FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A.; MACPHEE, D. E.

Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. Study in the ternary diagram $\text{Na}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 9, p. 923–931, 2011.

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.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, p. 11–23, 1992.

GOMES, A. P.; DE SOUZA, H. A.; TRIBESS, A. Impact of thermal bridging on the performance of buildings using Light Steel Framing in Brazil. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, n. 1, p. 84–89, 2013.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L.; LU, H.; LAN, W. Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. **Energy**, v. 35, n. 8, p. 3461–3473, 2010.

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

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.

IEA. **International Energy Agency. Technology Roadmap. Energy efficient building envelopes**. Paris: OECD/IEA, 2013. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapEnergyEfficientBuildingEnvelopes.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2019

IEA. **International Energy Agency. 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. 2019

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílio (PNAD)**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/habitacao/19897-sintese-de-indicadores-pnad2.html?edicao=9129&t=resultados>. Acesso em: 8 set. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Normais climatológicas do Brasil (1981-2010)**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 25 maio. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 7730-2005. **Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Genebra: 2005

JITABUT, P. Physical properties and thermal conductivity of soil geopolymer block. **Journal of Physics: Conference Series**. v.1380, p. 0,12038, 2019.

JOHNSON, R. A.; BHATTACHARYYA, G. K. **Statistics: Principles and Methods**. 5^a ed. John Wilky & Sons, Hoboken, NJ: 2006. 772p.

JUENGER, M. C. G.; WINNEFELD, F.; PROVIS, J. L.; IDEKER, J. H. Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1232–1243, 2011.

KAKALI, G.; KIOUPIS, D.; SKAROPOULOU, A.; TSIVILIS, S. Lightweight geopolymer composites as structural elements with improved insulation capacity. **MATEC Web of Conferences**. v. 149, p. 01042, 2018.

KAMSEU, E.; KAMSEU, E.; CERON, B.; TOBIAS, H.; LEONELLI, E.; BIGNOZZI, M. C.; MUSCIO, A.; LIBBRA, A. Insulating behavior of metakaolin-based geopolymer materials assess with heat flux meter and laser flash techniques. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 108, n. 3, p. 1189–1199, 5 jun. 2012.

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, out. 2017.

KAUARK, F. DA S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da Pesquisa: Um guia prático**. 1^a ed. Bahia: Via Litterarium, 2010.

KAYA, A.; KAR, F. Properties of concrete containing waste expanded polystyrene and natural resin. **Construction and Building Materials**, v. 105, p. 572–578, 2016.

KENWARD, A.; YAWITZ, D.; SANFORD, T.; WANG, R. **Summer in the City : Hot and getting hotter**. Princeton: Climate Central, 2014. Disponível em: <https://www.climatecentral.org/news/urban-heat-islands-threaten-us-health-17919>. Acesso em: 02 maio. 2019.

KHATIB, J. M.; HERKI, B. A.; ELKORDI, A. Characteristics of concrete containing EPS. In: **Use of Recycled Plastics in Eco-efficient Concrete**. Elsevier Ltd, p. 137–165, 2019.

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.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES-LABEEE. **Arquivo Climáticos INMET 2018**. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: 18 maio. 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3^a edição ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás / Procel, 2014. 382p.

LIU, M. Y. J.; ALENGARAM, U. J.; JUMAAT, M. Z.; MO, K. H. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. **Energy and Buildings**, v. 72, p. 238–245, 2014.

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.

MADDALENA, R.; ROBERTS, J. 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, jun. 2018.

MARÍN-LÓPEZ, C.; REYES ARAIZA, J. L.; MANZANO-RAMÍREZ, A.; RUBIO AVALOS, J. C.; PEREZ-BUENO, J. J.; MUÑIZ-VILLAREAL, M. S.; VENTURA-RAMOS, E.; VOROBIEV, Y. Synthesis and characterization of a concrete based on metakaolin geopolymer. **Inorganic Materials**, v. 45, n. 12, p. 1429–1432, 2009.

MARINOSKI, D. L.; ORIGE, L. P.; GUESSER, A.; GÜTHS, S.; LAMBERTS, R. Análise Comparativa de Valores de Refletância Solar de Superfícies Opacas Utilizando Diferentes Equipamentos De Medição em Laboratório. In: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), 2013, Brasília. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, v. 1, p. 1–9, 2014.

MCLELLAN, B. C.; WILLIAMS, R. P.; LAY, J.; VAN RIESSEN, A.; CORDER, G. D. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 9–10, p. 1080–1090, 2011.

MEDRI, V.; PAPA, E.; MAZZOCCHI, M.; LAGHI, L.; MORGANTI, M.; FRANCISCONI, J.; LANDI, E. Production and characterization of lightweight vermiculite/geopolymer-based panels. **Materials and Design**, v. 85, p. 266–274, nov. 2015.

MEDRI, V.; LANDI, E. Recycling of porcelain stoneware scraps in alkali bonded ceramic composites. **Ceramics International**, v. 40, n. 1, p. 307–315, jan. 2014.

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, n. October 2018, p. 103365, 2019.

MICHELINI, B. P.; SILVA, D. J. F. Análise Da Viabilidade De Construção De Casas Populares Utilizando Método Light Steel Frame Na Região De Dourados-Ms. **Revista da Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD**, 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima. Instituído pela Portaria MMA nº 150 de 10 de maio de 2016**. Brasília, Brasil, 2016.

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.

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.

NOVAIS, R. M.; BURUBERRI, L. H.; ASCENSÃO, G.; SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 99–107, 2016.

OKADA, K.; OYAMA, A.; ISOBE, T.; KAMESHIMA, Y.; NAKAJIMA, A.; MACKENZIE, K. J.D. Water retention properties of porous geopolymers for use in cooling applications. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, n. 10, p. 1917–1923, 2009.

OLIVEIRA, R. D. **Classificação do desempenho térmico da envoltória de habitação popular em concreto armado**. Belo Horizonte. Tese de Doutorado em Engenharia de Estruturas. Universidade Federal de Minas Gerais, MG. 2015. 227p.

OLIVIERI, H.; BARBOSA, I. C. A.; ROCHA, A. C.; GRANJA, A. D.; FONTANINI, P. S. P. A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 45–60, 2017.

PACHECO-TORGAL, F.; CASTRO-GOMES, J. P.; JALALI, S. Ligantes Geopoliméricos: Uma Alternativa ambiental ao Cimento Portland no Contexto da economia do carbono. **Revista da APEB**, p. 1–10, 2005.

PASUPATHY, K.; RAMAKRISHNAN, S.; SANJAYAN, J. Enhancing the mechanical and thermal properties of aerated geopolymer concrete using porous lightweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 264, p. 120713. 2020.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S.; GHISI, E. **Relatório de avaliação do espectrômetro portátil ALTA II**. CB3E. Florianópolis: 2015. 28p.

PEREIRA, C. D.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S.; GHISI, E. Avaliação experimental do espectrômetro Alta II e sua aplicação na normatização brasileira. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 197–213, 2017.

PEREIRA, H. A. C.; MELO, A. P.; VERSAGE, R.; SORGATO, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energyplus**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2013. 56p.

POONYAKAN, A.; RACHAKORNKIJ, M.; WECHARATANA, M.; SMITTAKORN, W. Potential use of plastic wastes for low thermal conductivity concrete. **Materials**, v. 11, n. 10, p. 1–17, 2018.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (PROCEL). **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso - Ano Base 2005 - Classe residencial**Eletrobrás. Rio de Janeiro: 2005.

PROCEL. **Tabela de Estimativa de Consumo Médio Mensal de Eletrodomésticos**. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BE6BC2A5F-E787-48AF-B485-439862B17000%7D¶ms=itemID=%7B96998AFB-8C12-466E-B38A-CFDE3FA44715%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>. Acesso em: 8 set. 2019.

PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: Why, how, and what?

Materials and Structures, v. 47, n. 1–2, p. 11–25, 2014.

PROVIS, J. L. Alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 40–48, 2018.

PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, v. 44, n. 1, p. 299–327, 2014.

PROVIS, J. L.; PALOMO, A.; SHI, C. Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110–125, 2015.

RAMESH, T.; PRAKASH, R.; SHUKLA, K. K. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. **Energy and Buildings**, 2010.

RHEINHEIMER, V.; WU, Y.; WU, T.; CELIK, K.; WANG, L.L.; WRIGGERS, P.; ZANG, M.H.; MONTEIRO, P.J.M. Multi-scale study of high-strength low-thermal-conductivity cement composites containing cenospheres. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 91–103, jul. 2017.

RIESSEN, S. A. V. Thermo-mechanical and microstructural characterisation of sodium-poly (sialate-siloxo) (Na-PSS) geopolymers. p. 3117–3123, 2007.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. In: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, SP. 2012.

SAKKAS, K.; PANIAS, D.; NOMIKOS, P.; SOFIANOS, A. Comparison of Fire Resistant Geopolymers for Passive Fire Protection of Concrete Tunnel Linings. **OALib**, v. 04, n. 01, p. 1–15, 2017.

SALAMANCA, F.; GEORGESCU, M.; MAHALOV, A.; MOUSTAOU, M.; WANG, M. Anthropogenic heating of the urban environment due to air conditioning. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 10, p. 5949–5965, 2014.

SANGOI, J. M.; RAMOS, G.; LAMBERTS, R. Análise das medições de absorptância através do espectrômetro Alta II. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), 2010, Canela, RS. **Anais...**Porto Alegre: ANTAC, 2010.

SANTIAGO, A. KOKKE; FREITAS, A. M. S.; CRASTO, R. C. M. **Manual de Construção em Aço - Steel Framing: Arquitetura**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Aço Brasil - Centro Brasileiro da Construção em Aço, 2012. 152p.

SANTOS, P.; DA SILVA, L. S.; UNGUREANU, V. **Energy Efficiency of Lightweight Steel-Framed Buildings**. Technical Committee 14 - Sustainability & Eco-Efficiency of Steel Construction. European Convention for Constructional Steelwork (ECCS), 2012. 182p.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 2 dez. 1965.

SINDICATO NACIONAL DA IDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC. **Relatório Anual de 2012**.

Disponível em: <http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 12 mar. 2019.

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. 2020.

SMART, S. CONSTRUTIVOS. **Casas Catálogo**. Disponível em: <https://www.espacosmart.com.br/casas-catalogo/>. Acesso em: 10 maio. 2019.

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. 1–10, 2017.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575. In: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (Encac), 2013, Brasília. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, v.12, p. 13-22, 2014.

STOLZ, J.; BOLUK, Y.; BINDIGANAVILE, V. Mechanical, thermal and acoustic properties of cellular alkali activated fly ash concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 24–32, nov. 2018.

UNDESA. **United Nations - Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects 2018**. Disponível em: <https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Report.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2019.

USGS. **United States Geological Survey. 2015 Minerals Yearbook: Cement Advance release**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/cement-statistics-and-information>. Acesso em: 16 fev. 2019.

VAN DEVENTER, J. S. J. et al. Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials. **Waste and Biomass Valor**, v. 1, n. 1, p. 145–155, 2010.

VAN DEVENTER, J. S. J.; PROVIS, J. L.; DUXSON, P. Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 89–104, 2012.

VILLALBA, J. L.; MACÍAS, J.; BAYKARA, H.; ULLOA, N.; SORIANO, G. Operational energy comparison of concrete and foamed geopolymer based housing envelopes. p. 1–6, 2018.

VILLAQUIRÁN-CAICEDO, M. A. et al. Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources. **Applied Clay Science**, v. 118, p. 276–282, 2015.

VINITH KUMAR, N.; ARUNKUMAR, C.; SRINIVASA SENTHIL, S. Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete. **Materials Today: Proceedings**, v.5, p. 8753-8760, 2018.

WONGSA, A. et al. Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar

incorporating crumb rubber. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1069–1080, 2018.

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.

ZHANG, Z. et al. Mechanical, thermal insulation, thermal resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 97–105, 2015.

ZUHUA, Z. et al. Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 2, p. 218–223, 2009.

APÊNDICE A – TEMPERATURA MÉDIA MENSAL INTERNA DOS MODELOS POR ZONA BIOCLIMÁTICA

1) Z1												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	22,35	22,48	21,85	20,30	17,82	17,59	17,37	18,14	19,09	20,15	20,89	22,33
PCAA1	22,31	22,42	21,78	20,23	17,71	17,45	17,25	18,01	18,99	20,09	20,83	22,27
PCAA2	22,34	22,45	21,82	20,27	17,77	17,53	17,31	18,08	19,05	20,13	20,86	22,30

2) Z2												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	27,43	26,11	24,28	21,56	18,12	16,92	16,08	18,51	20,07	21,79	24,89	26,47
PCAA1	27,27	25,97	24,12	21,42	17,94	16,73	15,84	18,31	19,92	21,66	24,74	26,31
PCAA2	27,37	26,06	24,22	21,50	18,04	16,83	15,97	18,42	20,01	21,73	24,83	26,41

3) Z3												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	26,23	26,40	25,73	24,52	22,54	21,60	21,12	22,59	23,75	25,41	24,70	24,88
PCAA1	26,13	26,30	25,64	24,39	22,41	21,46	21,00	22,44	23,63	25,29	24,61	24,83
PCAA2	26,18	26,36	25,69	24,47	22,49	21,55	21,08	22,53	23,70	25,36	24,66	24,86

4) Z4												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	24,69	24,47	23,52	23,84	23,04	22,32	22,46	23,58	24,72	25,29	23,90	23,92
PCAA1	24,62	24,38	23,47	23,72	22,92	22,17	22,31	23,42	24,58	25,18	23,84	23,86
PCAA2	24,65	24,43	23,49	23,79	22,99	22,26	22,40	23,51	24,66	25,24	23,87	23,89

5) Z5												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	31,65	31,23	30,09	28,48	25,82	24,67	24,97	26,41	27,32	29,41	28,43	30,16
PCAA1	31,49	31,05	29,92	28,31	25,64	24,49	24,80	26,23	27,15	29,23	28,27	30,00
PCAA2	31,58	31,16	30,02	28,41	25,75	24,60	24,90	26,34	27,25	29,33	28,36	30,10

6) Z6												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	27,76	27,05	27,53	29,37	25,89	26,76	26,51	29,04	31,40	29,71	27,43	27,95
PCAA1	27,59	26,88	27,39	29,20	25,68	26,56	26,32	28,85	31,23	29,53	27,26	27,80
PCAA2	27,69	26,98	27,47	29,30	25,81	26,68	26,43	28,97	31,33	29,64	27,36	27,88

7) Z7												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	28,16	28,44	28,65	28,23	26,80	26,40	25,70	27,73	30,51	29,78	30,13	29,09
PCAA1	28,10	28,35	28,56	28,12	26,64	26,20	25,49	27,55	30,35	29,68	30,03	29,01
PCAA2	28,13	28,40	28,61	28,19	26,74	26,33	25,62	27,67	30,45	29,74	30,09	29,05

8) Z8												
Placa	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
PCP	28,16	28,44	28,65	28,23	26,80	26,40	25,70	27,73	30,51	29,78	30,13	29,09
PCAA1	28,10	28,35	28,56	28,12	26,64	26,20	25,49	27,55	30,35	29,68	30,03	29,01
PCAA2	28,13	28,40	28,61	28,19	26,74	26,33	25,62	27,67	30,45	29,74	30,09	29,05



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado