ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO PROPICIADAS POR UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL UNIFAMILIAR UTILIZANDO VEDAÇÃO VERTICAL DE MATERIAIS ÁLCALI-ATIVADOS

Miriam de Oliveira Baumbach (1); Raquel Diniz Oliveira (2)
(1) Msc, Engenheira de Produção civil, miriam.baumbach@gmail.com, CEFET-MG
(2) Dra., Professora do Departamento de Engenharia Civil, raqueldiniz@cefetmg.br, CEFET-MG, Av. Amazonas, 7675. Prédio 12, sala 221. Belo Horizonte-MG, 30510-000

RESUMO
A inadequação do uso de sistemas de vedação externa para um determinado clima pode ocasionar um comportamento térmico insatisfatório da edificação e, consequentemente, condições insatisfatórias de temperatura interna nos ambientes. Desta forma se faz necessário avaliar as condições de conforto térmico proporcionadas pelos sistemas construtivos utilizados na envoltória, em especial àqueles alternativos às opções convencionais. Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar as condições de conforto térmico propiciadas aos usuários de edificações residenciais cuja vedação vertical externa é composta por painéis de materiais álcali-ativados (MAA). Para tanto, criou-se a partir do *software* SketchUp associado à extensão Euclid, um modelo termoenergético de uma unidade habitacional unifamiliar de aproximadamente 44m² projetada para receber sistemas de vedação leves. O MAA escolhido para esta análise é composto por 70% de metakaulim e 30% de escória de alto forno como fonte de aluminosilicato e 100% de cinza de casca de arroz como fonte de sílica. Complementarmente, criou-se o modelo de referência com placa de cimento Portland convencional para fins de comparação. Posteriormente foram realizadas simulações termoenergéticas por meio do *software* EnergyPlus v. 8.7.0. Para ambas as simulações foi considerado o arquivo climático do tipo SWERA estabelecido para a cidade de Belo Horizonte, MG. Os valores das 8760 horas anuais de temperatura operativa dos ambientes de permanência prolongada obtidos pela simulação foram comparados com a faixa de conforto adaptativa da ASHRAE 55/17. Os resultados obtidos evidenciaram que o sistema de vedação vertical composto por MAA proporcionou mais de 90% de horas de conforto térmico aos usuários, o que representa um valor 44% maior do que o sistema de concreto convencional. Conclui-se, portanto, que para uma habitação unifamiliar localizada em Belo Horizonte - MG, os MAA's representam uma boa opção de revestimento externo em relação ao conforto térmico propiciado aos usuários. Este trabalho permite auxiliar o processo de tomada de decisão no que tange a soluções alternativas a placa de cimento Portland convencional.

Palavras-chave: conforto térmico, sistema de vedação vertical alternativo, materiais álcali-ativados, edificação habitacional, simulação computacional.

ABSTRACT
Building systems in disagreement with the climate can cause unsatisfactory thermal behavior and, consequently, poor indoor thermal comfort conditions. Thus, the thermal comfort conditions evaluation plays an important role to enhance building systems performance, especially to those set as an alternative option. The present work aims at evaluating the thermal comfort conditions provided by external vertical fence composed of alkali-activated material (AAM) panels of residential buildings. For that, a thermoenergetic model of a single-family house of approximately 44m² designed to receive light fencing systems was created using the SketchUp software associated with the Euclid extension. A AAM composed of 70% metakaolin and 30% blast furnace slag as aluminosilicate source and 100% rice husk ash as silica source was selected for this analysis. In addition, a reference model with a conventional Portland cement plate was created for comparison purposes. Then, some thermo-energetic simulations were carried out by using the EnergyPlus software, v. 8.7.0. For both simulations, the SWERA climatic file established for Belo Horizonte (Brazil) was inputted. The annual hours of operative temperature obtained for the extended-stay rooms through simulation were compared to ASHRAE 55/17 adaptive comfort range. The results showed that MAA's

panels provide more than 90% of comfort hours to its users, which represents a value 44% higher than the cement plates. It is concluded, therefore, that for a single-family house located in Belo Horizonte, AAM's represent a good option of external covering concerning the thermal comfort provided to its users. This work allows to assist the decision-making process regarding alternative solutions to conventional Portland cement plate.

Keywords: alternative vertical fence system, thermal comfort conditions, alternative vertical fence system, alkali-activated materials, single-family house, building simulation.

1. INTRODUÇÃO

O setor residencial é responsável por cerca de 30% do total de energia consumida no Brasil (EPE, 2020), sendo o uso para geração de conforto térmico o terceiro item de maior consumo energético de uma residência (CBCS, 2010). Tendo em vista que o envelope construtivo possui grande influência no desempenho energético predial e, consequentemente, no conforto dos seus usuários (CONSOLI *et al*., 2020; RIBEIRO *et al*., 2014), a escolha dos materiais durante a fase de projeto pode ser crucial para reduzir a demanda por climatização artificial como ação reguladora das condições internas de conforto no ambiente.

Seja com função estrutural ou de acabamento, o concreto é um dos materiais mais utilizados no mundo devido a sua grande versatilidade (SNELL *et al*., 2017). Entretanto, a produção do cimento Portland, seu principal constituinte, é um processo que emite um grande volume de CO_2, tendo sido responsável por pelo menos 5% de todas as emissões de CO_2 antropogênico no ano de 2009 (MADDALENA, 2018). De acordo com o *U.S. Geological Survey* (USGS, 2020) estima-se que tenham sido produzidas no Brasil, somente no ano de 2019, um total de 55 milhões de toneladas desse material.

Nesse contexto de busca por materiais alternativos que possam reduzir o impacto ambiental, os Materiais Álcali-Ativados (MAA) têm sido propostos como ligantes em substituição ao cimento Portland. Haja vista o amplo emprego de resíduos e rejeitos em sua produção, os MAA's reduzem sensivelmente a emissão de CO_2 (MADDALENA, 2018). Além de reduzido impacto ambiental, esses materiais apresentam resultados positivos em relação ao comportamento mecânico, durabilidade química e resistência térmica, (COLANGELO *et al*., 2018, LIU *et al*., 2014, DUXSON *et al*., 2007).

Também conhecidos na literatura como geopolímeros, os MAA são considerados polímeros inorgânicos obtidos a partir da reação entre um aluminosilicato e uma solução alcalina (ativadora). Eles podem ser obtidos pela ativação de materiais, tais como metacaulim, cinzas volantes, escórias de alto forno e sílica ativa (DUXSON *et*. al., 2007; TEMUUJIN *et al*., 2010; ŠKVÁRA *et al*., 2005; PALOMO *et al*., 1999).

Os geopolímeros têm sido propostos como materiais de isolamento alternativos para compósitos à base de cimento Portland, apresentando valores de condutividade térmica inferiores aos da argamassa ou cimento tradicional. Especialmente em locais mais frios, a melhoria no isolamento térmico em residências e edifícios de uso geral se mostra como um aspecto importante para a redução da perda de calor da edificação e consequente redução do consumo de energia para climatização artificial (COLANGELO *et al*., 2018, MADDALENA *et al*., 2018; VILLAQUIRAN-CAICEDO, 2015).

Atualmente, o principal obstáculo para a utilização dos MAA's na construção civil é a ausência de regulamentação do seu uso. Assim, pesquisas envolvendo estes materiais são necessárias para fomentar sua regulamentação, especialmente aquelas relacionadas com suas propriedades térmicas, as quais ainda são esparsas (SNELL *et al*., 2017, DUXSON *et al*., 2007).

Desta forma, a pesquisa de materiais alternativos em detrimento àqueles cimentícios, em especial os MAA's, se mostra de grande relevância para o desenvolvimento de produtos com menor impacto ambiental, além de impulsionar a meta global para mitigação das mudanças climáticas e aumento da sustentabilidade na cadeia produtiva do mercado da construção civil (MADDALENA *et al*., 2018). Neste contexto, verifica-se o potencial para a adoção de geopolímeros em sistemas de vedação vertical de edificações. No entanto, considerando a variação climática brasileira, devem-se investigar as condições de conforto térmico propiciadas por este tipo de sistema, bem como a necessidade de ajustes para as diferentes localidades.

2. OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é avaliar as condições de conforto térmico propiciadas por painéis de revestimento de vedação vertical compostos por materiais álcali-ativados aos usuários de edificações residenciais unifamiliares.

3. MÉTODO

A presente pesquisa é composta por 4 procedimentos metodológicos: 1) Modelagem da edificação definida para o estudo de caso; 2) Definição dos materiais construtivos da envoltória; 3) Definição das propriedades físicas e térmicas dos materiais; 4) Definição dos parâmetros de uso e ocupação da edificação e 5) Simulação computacional para determinada condição climática e análise dos resultados obtidos. A seguir são descritas todas as etapas de modelagem e ajuste dos parâmetros para a simulação.

Para a criação do modelo termoenergético da edificação foi utilizado o *software* SketchUp Make 2017 associado à extensão Euclid versão 0.9.3, que cria e modifica as entradas de geometria para modelos de energia de construção compreendidos como dados de *input* para o EnergyPlus. Ambos o programa e o *plug-in* são distribuídos gratuitamente.

O projeto utilizado como referência, denominado "Casa Buenos Aires", foi obtido no site da empresa Smart Sistemas construtivos (ESPAÇO SMART, 2020). A edificação consiste em uma unidade unifamiliar de aproximadamente 44m², com pé direito de 2,75m, contando com dois quartos, um banheiro, uma sala e uma cozinha, com distribuição conforme pode ser observado na planta baixa apresentada na Figura 1. Cada ambiente foi modelado como uma zona térmica.

(A) (B)



Figura 1 – Planta baixa (A) e fachada (B) da Casa Buenos Aires, unidade unifamiliar utilizada na pesquisa (ESPAÇO SMART, 2020).

Os materiais foram arbitrados com base em informações gerais obtidas (Figura 1), bem como nas exigências legais para o município de Belo Horizonte (CMBH, 2009) e requisitos mínimos estabelecidos na NBR 15.575 (2013), visando as melhores condições de conforto térmico do usuário.

A composição da envoltória utilizada na modelagem é apresentada na Tabela 1. Conforme o projeto de referência considerou-se o sistema *Steel Framing* como estrutura e a vedação vertical composta por duas placas de 3cm de espessura separadas por uma câmara de ar de 5cm e recobertas pelo lado interno por uma placa de gesso de 1cm e do lado externo por uma pintura com tinta de cor clara. A fim de realizar a comparação entre o material álcali-ativado (MAA - MK-BS) e cimento Portland convencional, foram realizadas duas simulações, uma com a envoltória de placas de materiais álcali-ativados e outra com placas de cimento Portland (CP).

Tabela 1 – Composição da envoltória

Componente		**Composição**	
Vedação vertical (*Steel Framing* + placa de vedação)	**CP**	1) Placa Cimentícia (3cm) 2) Câmara de ar (5cm)	3) Placa Cimentícia (3cm) 4) Placa Gesso interna (1cm)
	MAA - MK-BS	1) Placa 70MK/30BS/RHA (3cm) 2) Câmara de ar (5cm)	3) Placa 70MK/30BS/RHA (3cm) 4) Placa Gesso interna (1cm)
Cobertura		1) Telha cerâmica (15 mm) 2) Câmara de Ar (>5 cm)	3) Laje maciça de concreto (10 cm) 4) Forro de gesso (1 cm)
Piso		1) Laje maciça de concreto (10 cm) 2) Piso cerâmico (1 cm)	

A cobertura definida é composta por telha cerâmica de 15mm, um ático (câmara de ar com espessura maior do que 5cm), uma laje maciça de concreto de 10cm e um forro de gesso de 1cm. Finalmente, para o piso foi considerada uma laje maciça de concreto de 10cm e um piso cerâmico de 1cm de espessura.

As propriedades físicas e térmicas do MMA são apresentadas na Tabela 2. Tais dados foram obtidos por Villaquirán-Caicedo *et al.* (2015), os quais propuseram a utilização de fontes alternativas de ativadores à base de sílica, além de apresentarem maiores detalhes sobre a caracterização dos materiais e dos métodos utilizadosna pesquisa.

Tabela 2 – Propriedades físicas e térmicas dos MMA's à 25ºC (VILLAQUIRÁN-CAICEDO *et al*.,2015).

Material			Condutividade (W/m.k)	Calor específico (J/kg.k)	Densidade (kg/m^3)	Difusividade térmica (m^2/s)
SIGLA	Fonte de aluminosilicato	Fonte de sílica				
MK/BS	70%MK (Metakaulim) / 30% BS (escória de alto forno)	100% HSA (cinza de casca de arroz)	0,270	534,79	2110,00	2,4E-07

As propriedades físicas e térmicas das placas de concreto de cimento Portland, por sua vez, foram obtidas no anexo B da norma NBR 15.220 (ABNT, 2008) e são apresentadas na Tabela 3. Quando comparados aos do MAA, o concreto apresenta valores significativamente maiores, sendo que sua condutividade térmica é seis vezes maior que a do MK/BS e seu calor específico é próximo de duas vezes maior.

A fim de facilitar a avaliação destas propriedades, verificou-se a difusividade térmica dos materiais, a qual é representada pela razão da condutividade térmica pelo produto do calor específico pela densidade. A partir desta propriedade é possível avaliar a velocidade com a qual o calor se move em determinado material (SALAZAR, 2003). Assim, conforme dados apresentados nas Tabelas 2 e 3, observa-se que o MAA possui uma difusividade térmica 3 vezes menor do que a do concreto, sendo, portanto, o material que possui maior potencial isolante.

Tabela 3 – Propriedades físicas e térmicas do concreto (NBR 15.220, 2008).

Material	Condutividade (W/m.k)	Calor específico (J/kg.k)	Densidade (kg/m^3)	Difusividade térmica (m^2/s)
Concreto de CP	1,75	1000	2400	7,3E-07

É importante enfatizar que as únicas variáveis alteradas entre as diferentes simulações foram a densidade, a condutividade e o calor específico. Desta forma, com base no que foi observado acima, espera-se que a vedação vertical em concreto de cimento Portland apresente um desempenho térmico inferior à vedação com MAA.

As simulações computacionais foram realizadas por meio do *software* EnergyPlus, versão 8.7.0. O estudo de caso compreendeu um período de um ano, com verificações horárias, totalizando 8760 horas simuladas. Para tanto, foram criadas rotinas de ocupação, e uso do sistema de iluminação artificial e equipamentos elétricos com base no Manual para aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R, 2012).

Em relação ao padrão mínimo de ocupação nos ambientes, consideraram-se duas pessoas em cada quarto e quatro na sala, considerando todos os usuários dos dois dormitórios. Quanto ao padrão de ocupação e iluminação dos ambientes consideraram-se horários diferenciados para os dias de semana e finais de semana conforme porcentagem de pessoas disponíveis no horário. Complementarmente, em função do tipo de atividade desempenhada em cada ambiente adotou-se taxa metabólica específica baseada nas recomendações da ASHRAE *Handbook of Fundamentals* (2009), considerando o calor produzido em uma superfície de pele média de 1,80 m². Desta forma tem-se na sala 108 W para o usuário sentado ou vendo TV e 81 W no quarto para o indivíduo dormindo.

A densidade de potência instalada de iluminação foi de 5,0 W/m² no quarto e 6,0 W/m² na sala. Já para as cargas internas dos equipamentos considerou-se 1,5 W/m² na sala pelo período de 24 horas do dia durante todo o período de simulação. Quanto à rotina de isolamento térmico da vestimenta optou-se por valores diferenciados estabelecidos na norma ISO 7730 (2005) conforme as estações do ano sendo na primavera e outono 0,5 Clo, no verão 0,3 Clo e no inverno 1,0 Clo.

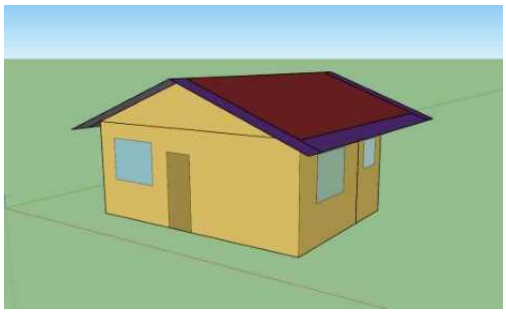
A ventilação natural foi considerada das 06h00 às 21h00, período no qual as janelas foram abertas ao longo de todo o ano. Nos horários fora desta faixa foi considerada a infiltração do ar por frestas. Todas as

portas internas foram mantidas abertas, sendo apenas a porta principal mantida fechada. Para o coeficiente de rugosidade do entorno, adotou-se o valor de 0,33, que representa um terreno em um centro urbano, fator que influencia na incidência solar e velocidade do vento. Para janelas e portas retangulares adotou-se o valor de 0,60 para coeficiente de descarga (CD), 0,001 kg/s.m para o coeficiente do fluxo de ar por frestas (CQ) e 0,65 para o expoente do fluxo de ar (n). Quanto à temperatura do solo, consideraram-se os valores presentes no arquivo climático. Não foram considerados sistemas artificiais para a climatização dos ambientes.

Os materiais e sistemas construtivos da envoltória da edificação (paredes e coberturas) foram considerados conforme estabelecido na Tabela 1. Considerou-se o uso do vidro simples incolor 4mm nas janelas. Desta forma foram considerados 2 arquivos para a simulação sendo 1 modelo de referência em painéis de concreto e 1 de vedação em material álcali-ativado. Os beirais foram considerados como elemento de sombra e o ático como uma zona separada, conforme se observa na Figura 2A.

Conforme se observa na Figura 2B, além da parte do ático considerou-se 5 zonas térmicas no modelo referentes aos 2 Quartos, corredor, banheiro bem como a sala e a cozinha conjugada. Apesar de o corredor ter sido considerado como uma zona térmica criou-se uma porta fictícia de ligação com a sala na qual se manteve sempre aberta para fins de representação do comportamento da realidade. Tal simplificação foi necessária para criar ambientes mais regulares e minimizar os erros provenientes da criação da geometria. Para a orientação da edificação definiu-se o ângulo de 0º para o norte, o que favorece o conforto térmico, uma vez que as janelas são orientadas para o leste, priorizando o sol da manhã nos ambientes.

(A)



(B)

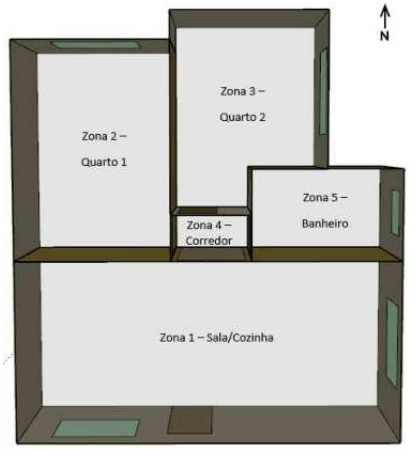


Figura 2 – Perspectiva do modelo (A) e zonas térmicas do modelo (B).

Assim, tendo em vista o objetivo do estudo de avaliar as condições de conforto dos usuários, foram selecionadas como variáveis de saída a temperatura do ar externa (Temperatura de Bulbo Seco) e a temperatura operativa em todos os ambientes de permanência prolongada da casa, bem como os limites de temperatura para a obtenção das condições de conforto térmico de acordo com a faixa de conforto adaptativa proposta na ASHRAE 55 (2017).

A análise foi realizada para o município de Belo Horizonte, MG. Para tanto, foi utilizado o arquivo climático do tipo *Solar and Wind Energy Resource Assessment* – SWERA, disponível no Website do EnergyPlus (SWERA, 2020). Esta extensão foi desenvolvida pelo Programa de mesmo nome que teve apoio do U.S. *Department of Energy* (DOE) e da *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). A sua estruturação baseia-se em arquivos do tipo *Test Meteorological Year* (TMY2) que consistem em uma compilação de meses sem extremos de temperatura do ar provenientes de diferentes anos, resultado em um ano climático para referência, posteriormente convertido no formato utilizado pelo Energy Plus.

A partir dos resultados anuais obtidos com a simulação, foi feita uma comparação da temperatura operativa horária dos ambientes de permanência prolongada (sala-cozinha e quartos) com a temperatura média mensal externa do ar definida como referência para o limite superior e inferior para a zona de conforto adaptativa conforme definição estabelecida pela ASHRAE 55 (2017).

4. RESULTADOS

A comparação entre a temperatura operativa anual e a faixa de conforto definida pela ASHRAE 55 (2017) fornecem as horas de conforto e de desconforto para o frio e para o calor. Considerando-se a faixa de 80% de

aceitabilidade dos usuários, o limite inferior do conforto térmico ficou compreendido entre 20,2 e 21,9°C ao longo dos meses do ano. Já o limite superior apresentou valores entre 27,2 e 28,9°C.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados de horas de conforto e de desconforto para o frio e para o calor nos ambientes de permanência prolongada para cada uma das simulações realizadas. É possível observar que o revestimento de placas de MAA proporcionou um total de 93,6% de horas de conforto, enquanto o revestimento de placa cimentícia apresentou uma média de 52% de horas de conforto, o que representa 44% menos horas de conforto total em todos os ambientes de permanência prolongada. Com exceção da sala-cozinha, é possível observar que o desconforto para o calor ocorre durante um maior número de horas que o desconforto para o frio, sendo que essa relação é bastante atenuada com o uso de materiais álcali-ativados. Este resultado condiz com o esperado, uma vez que, com base na difusividade térmica dos materiais analisados, o MAA apresenta um potencial de isolamento térmico 3 vezes maior do que a do concreto produzido a partir do cimento Portland. Entretanto, maiores investigações podem ser feitas para analisar quais parâmetros influenciaram resultado.

Ainda em relação à Tabela 4, é possível observar que o ambiente que teve um maior percentual de horas de conforto com o revestimento de placas de MAA foi o quarto 2 (com janela voltada para leste e parede cega a norte), enquanto o ambiente mais desconfortável, tanto para o frio quanto para o calor, foi a sala-cozinha (com janela voltada para leste e parede cega e outra janela a sul). Já no caso do revestimento de placa cimentícia, o ambiente mais confortável foi a sala-cozinha, ainda que este ambiente tenha apresentado também o maior número de horas de desconforto para o frio. Já o quarto 1 (com janela a norte e parede cega para oeste) foi o que apresentou o maior percentual de horas de desconforto para o calor quando da utilização deste material.

Tabela 4 – Resultados de horas de desconforto para o frio e para o calor e horas de conforto nos ambientes de permanência prolongada – Sala-cozinha, Quarto 1 (Q1) e Quarto 2 (Q2) para as 2 simulações realizadas, sendo A) placa Metacaulim-BS (70%Metacaulim/30% escória e 100% cinza de casca de arroz) e B) placa cimento Portland.

(A)

Zona Térmica	Horas de Desconforto MK-BS						Horas de Conforto	
	Frio [hs]	Calor [hs]	Total [hs]	Frio [%]	Calor [%]	Total [%]	Total [hs]	Total [%]
Sala_Coz	432	373	805	4,9%	4,3%	9,2%	7955	90,8%
Q1	150	327	477	1,7%	3,7%	5,4%	8283	94,6%
Q2	137	251	388	1,6%	2,9%	4,4%	8372	95,6%
						Média	8203,3	93,6%

(B)

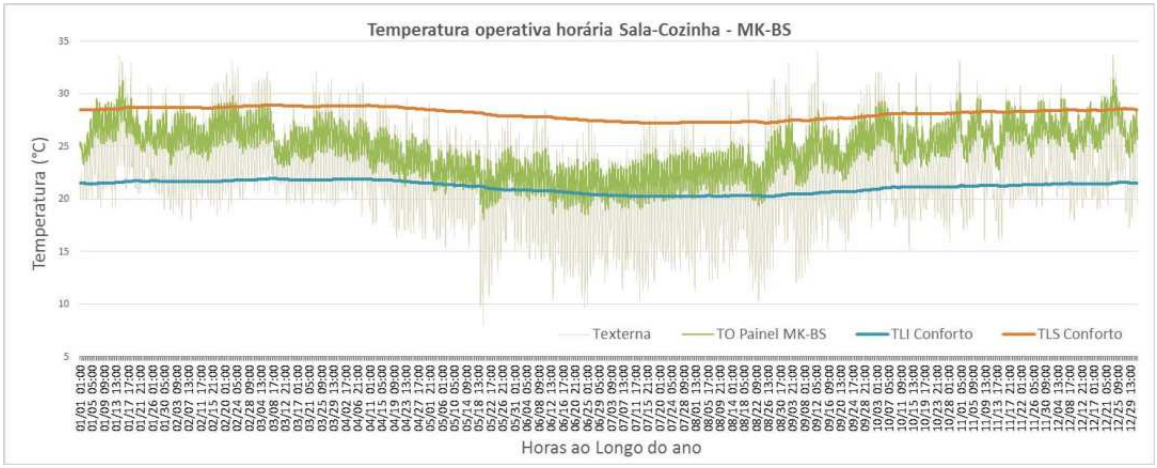
Zona Térmica	Horas de Desconforto - PC						Horas de Conforto	
	Frio [hs]	Calor [hs]	Total [hs]	Frio [%]	Calor [%]	Total [%]	Total [hs]	Total [%]
Sala-Coz	216	3798	4014	2,5%	43,4%	45,8%	4746	54,2%
Q1	190	4141	4331	2,2%	47,3%	49,4%	4429	50,6%
Q2	139	4120	4259	1,6%	47,0%	48,6%	4501	51,4%
						Média	4558,7	52,0%

Em estudo semelhante, Baumbach *et al.* (2019) compararam as condições de conforto térmico propiciadas por revestimentos geopoliméricos e cimentícios para uma residência unifamiliar em Belo Horizonte. Os autores verificaram igualmente que os materiais álcali-ativas tiveram um melhor desempenho que o concreto a base de cimento Portland, porém este último apresentou mais de 80% de horas de conforto térmico. Acredita-se que esta diferença nos resultados pode estar relacionada ao material utilizado na cobertura, à orientação da edificação, ou ainda à cor do revestimento externo.

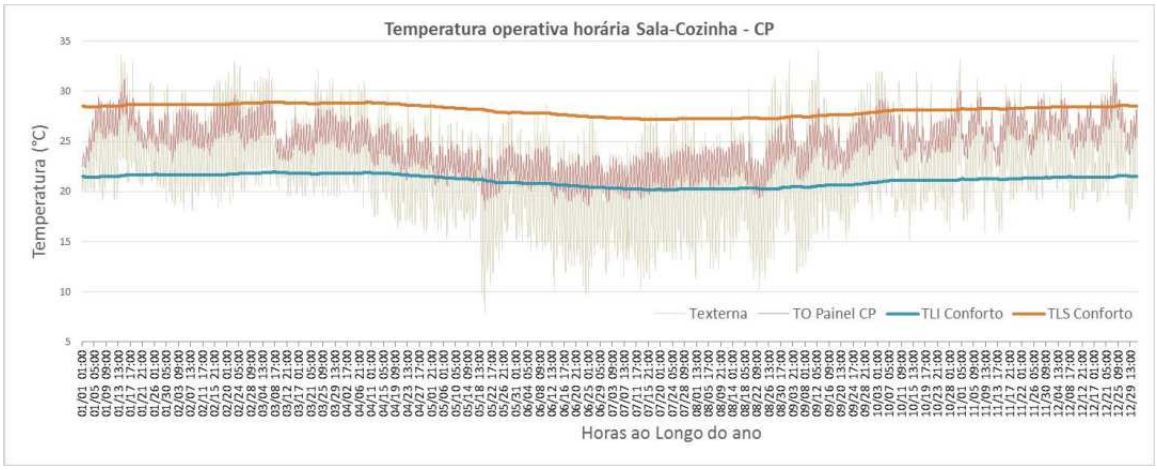
As Figuras 3, 4 e 5 apresentam um comparativo entre a temperatura operativa dos ambientes de permanência prolongada com a faixa de conforto térmico definida conforme ASHRAE 55 (2017) para as duas opções de revestimento vertical simuladas, durante o período de um ano. Nelas, é possível observar a variação da temperatura externa e da temperatura operativa interna em comparação com os limites inferior e superior de conforto. Os valores que ultrapassam o limite inferior são considerados como horas de desconforto para o frio, enquanto que os que ultrapassam o limite superior são considerados como horas de desconforto para o calor, já os valores que se encontram entre os dois limites são considerados como horas de conforto.

Figura 3 - Comparação entre a temperatura operativa da Sala-Cozinha com a faixa de conforto térmico conforme ASHRAE 55 para A) placa Metacaulim-BS (70%Metacaulim/30% escória e 100% cinza de casca de arroz) e B) placa cimento Portland. A linha azul representa a Temperatura Limite Inferior de Conforto (TLI) e a linha laranja representa a Temperatura Limite Superior de Conforto (TLS)

(A)



(B)



A Figura 3 apresenta os resultados obtidos para a sala-cozinha. Este ambiente foi o que apresentou maior percentual de horas de desconforto tanto para o frio quanto para o calor com a placa de MAA. No total, observou-se neste ambiente uma temperatura confortável durante 90,8% do tempo simulado para este revestimento. Por outro lado, ao analisarmos a Figura 3b, observa-se que este foi o ambiente que apresentou menor percentual de horas de desconforto e, consequentemente, maior percentual de horas de conforto com o revestimento de placas cimentícias.

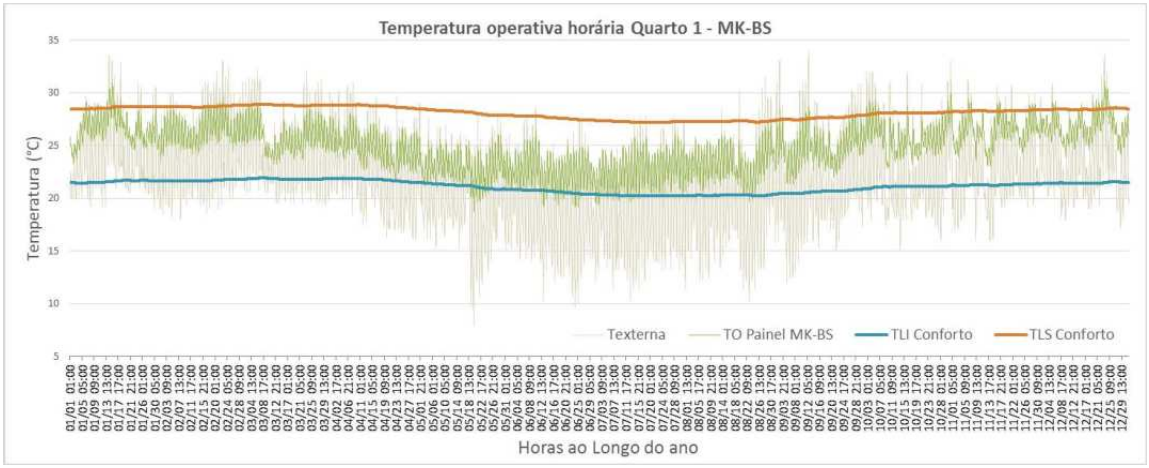
Na Figura 4 é possível observar os resultados obtidos para o quarto 1. Este ambiente apresentou o segundo maior percentual de conforto térmico com a placa de MAA, com um total de 94,6% de horas de conforto. Por outro lado, quando analisado com o revestimento composto de placas cimentícias, foi o ambiente que apresentou o pior desempenho, com apenas 50,6% de horas de conforto.

Por fim, os resultados obtidos para o quarto 2 são apresentados na Figura 5. Neste ambiente foi observado o melhor desempenho de conforto térmico para a análise realizada com o revestimento de placas de MAA. Em 95,6% do tempo as temperaturas no quarto 2 estavam dentro dos limites de conforto. Para a análise realizada com as placas cimentícias foi observado um total de 51,4% de horas de conforto térmico, o segundo melhor ambiente considerando-se as placas cimentícias.

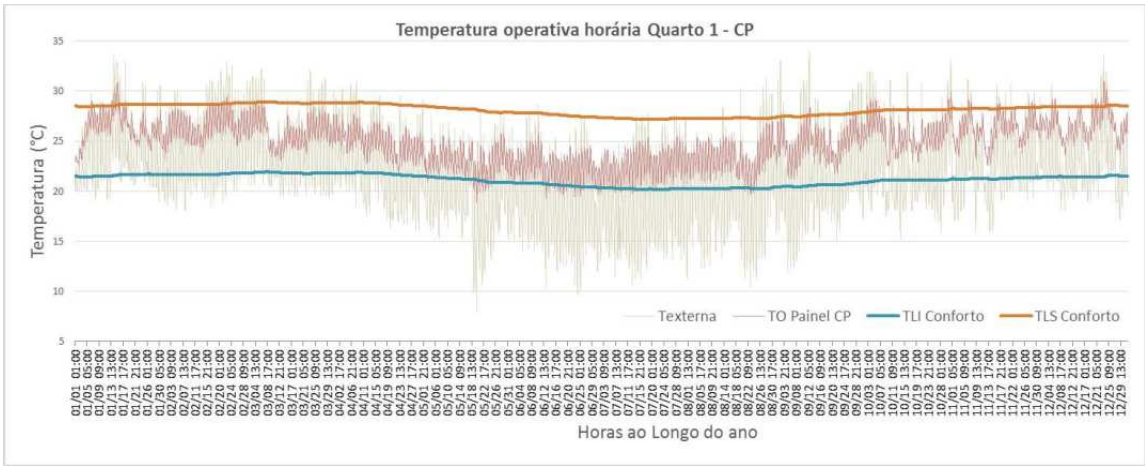
De forma geral, verificou-se que os painéis de vedação compostos por materiais álcali-ativados apresentaram desempenho térmico satisfatório para o clima testado, garantindo um número de horas confortáveis do ponto de vista térmico, com 80% de satisfação dos usuários. Verifica-se, ademais, amortecimento dos picos de máximos e mínimos de temperatura bem como menor faixa de variação da temperatura operativa nos ambientes (amplitude térmica).

Figura 4 - Comparação entre a temperatura operativa do Quarto 1 com a faixa de conforto térmico conforme ASHRAE 55 para A) placa Metacaulim-BS (70%Metacaulim/30% escória e 100% cinza de casca de arroz) e B) placa cimento Portland. A linha azul representa a Temperatura Limite Inferior de Conforto (TLI) e a linha laranja representa a Temperatura Limite Superior de Conforto (TLS)

(A)



(B)

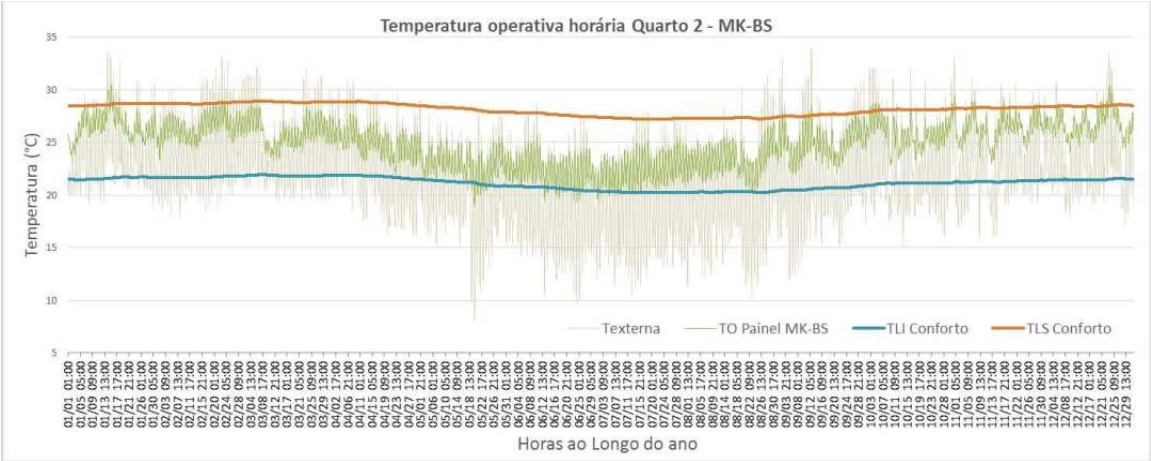


Ademais, no período noturno e nos meses mais frios (outono e inverno) as temperaturas mínimas internas ficaram muito acima dos valores externos, se mantendo em grande parte do tempo acima da faixa de 20ºC. Já nos períodos mais quentes do dia e ao longo dos meses de primavera e verão, também se verificou amortecimento dos picos máximos de temperatura. Assim, nos períodos mais quentes ao longo do dia bem como no verão as temperaturas máximas internas mantiveram-se abaixo de 28ºC em grande parte do tempo.

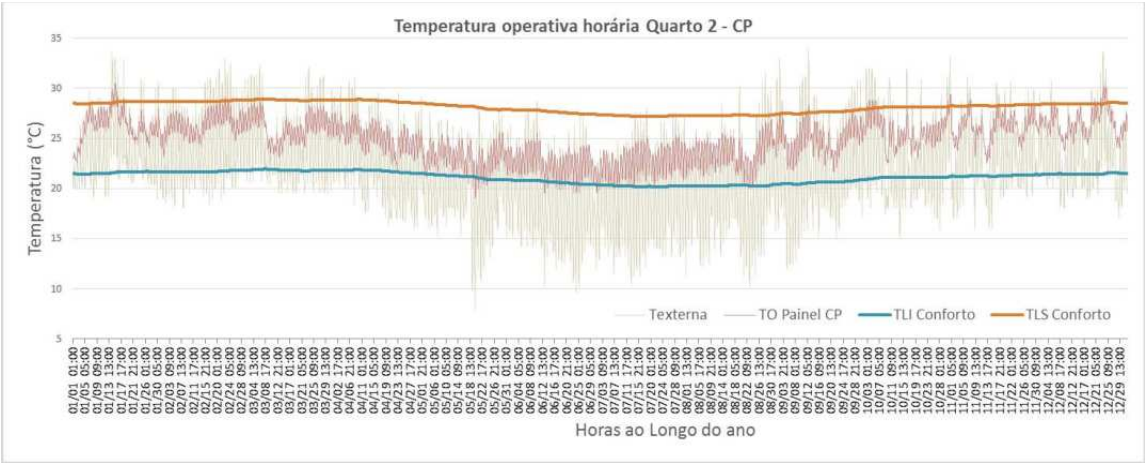
Em síntese, foi possível verificar a viabilidade desta opção alternativa de sistema de vedação vertical como fechamento de habitações unifamiliares para o clima da cidade de Belo Horizonte – MG. Tais resultados poderão estimular o desenvolvimento de variações de produtos no mercado que envolvam materiais álcali-ativados em alternativa ao uso de materiais cimentícios, bem como auxiliar a tomada de decisão de construtores e usuários com o objetivo de otimizar as condições de conforto térmico ambiental.

Figura 5 - Comparação entre a temperatura operativa do Quarto 2 com a faixa de conforto térmico conforme ASHRAE 55 para A) placa Metacaulim-BS (70%Metacaulim/30% escória e 100% cinza de casca de arroz) e B) placa cimento Portland. A linha azul representa a Temperatura Limite Inferior de Conforto (TLI) e a linha laranja representa a Temperatura Limite Superior de Conforto (TLS)

(A)



(B)



5. CONCLUSÕES

O presente trabalho procurou avaliar o desempenho térmico de materiais álcali-ativados a partir da análise do conforto térmico propiciado aos usuários de uma habitação unifamiliar localizada no município de Belo Horizonte conforme a faixa de conforto adaptativa proposta pela ASHRAE 55 (2017). Foi desenvolvido um modelo de referência e a partir dos dados de propriedades térmicas obtidos na literatura foram feitas as simulações horárias para um período de um ano, totalizando 8760 horas simuladas.

Os resultados obtidos neste estudo permitem concluir que o revestimento externo em placas de materiais álcali-ativados para uma residência unifamiliar em Belo Horizonte é viável em termos de conforto térmico para os usuários, pois apresentou um percentual médio de horas de conforto superior a 90%. Por outro lado, os resultados obtidos para a simulação de revestimento com placa cimentícia apresentaram um percentual médio de horas de conforto de 52%, o que indica que este material, da forma como foi aplicado no presente trabalho, não é indicado para revestimento de forma isolada sem ajustes na composição dos componentes construtivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. ASHRAE, Atlanta, 2017.

_____. **ASHRAE Handbook** – Fundamentals. Atlanta, 2009.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. **NBR 15.220-5 - Desempenho térmico de edificações. Parte 3:**

Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2008.

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 Conf.** Volume 274, 2019. doi.org/10.1051/matecconf/201927403003.

CÂMARA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE, Lei nº 9.725, de 15 de julho de 2009. Institui o Código de Edificações do Município de Belo Horizonte e dá outras providências. **Diário Oficial do Município.** Belo Horizonte, 16 jul. 2009.

COLANGELO, F., ROVIELLO, G., RICCIOTTI, L., FERRANDIZ-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**, 86, 266 e 272. 2018

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL - CBCS. JOHN, V. M.; CSILLAG, D.; TAKAOKA, M. V., BESSA, V. M. T., SUZUKI, E. H. SUSTAINABLE SOCIAL HOUSING INITIATIVE – SUSHI: **Mapeamento dos principais interessados e dos processos que afetam a seleção de soluções (tecnologias e materiais) para projetos de habitação social.** BRASÍLIA: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME - UNEP, 2010.

CONSOLI, I. O., ANDRADE, C. A. R., TABALIPA, N. L., Analysis of Heat Balance in a Light Steel Frame Residence with Different Insulating Thickness. **KnE Engineering**. 5(6), p. 547–557. 2020. DOI 10.18502/keg.v5i6.7077.

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'. **Cem. Concr. Res.** 37, 1590–1597. 2007.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **CONSUMO NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA NA REDE POR CLASSE: 1995 – 2018**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/consumo-de-energia-el%C3%A9trica>. Acesso em 1 nov. 2020.

ESPAÇO SMART, Casa Buenos Aires. Disponível em: <https://www.espacosmart.com.br/produtos/casas-catalogo/modelos/buenos-aires-43m%c2%b2/>. Acesso em 10 ago. 2020.

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

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.** Vol. 186, 933-942. 2018

PALOMO, A., GRUTZECK, M.W., BLANCO, M. T., *Alkali-activated fly ashes: A cement for the future*, **Cem. Concr. Res.** 29, 1323–1329. 1999. doi:10.1016/S0008-8846(98)00243-9.

RIBEIRO, W. B., RIZZO, M. V., BORTOLUZ, N., ZENI, M., NUNES, M. F. O., GRISA, A. M. C. Characterization of Polyurethan Skin Agglomerates for Acoustic Insulation from Impact Noise. **Materials Research.** 17(Suppl. 1): 210-215, 2014. doi: D httpI://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.226513.

RTQ-R. **Manual para aplicação do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**. 2012.

SALAZAR, A. On thermal diffusivity, **Eur. J. Phys.** 24, 351–358. 2003. doi: 10.1088/0143-0807/24/4/353

ŠKVÁRA, F., JÍLEK, T., KOPECKÝ, L., *Geopolymer materials based on fly ash,* **Ceram. - Silikaty**. 49**,** 195–204. 2005.

SNELL, C., TEMPEST, B., ASCE, A. M., GENTRY, T. Comparison of the Thermal Characteristics of Portland Cement and Geopolymer Cement Concrete Mixes. **J. Archit. Eng.** 23, 2017.

SWERA - Solar and Wind Energy Resource Assessment. Belo.Horizonte-Pampulha.835830. Disponível em: < https://energyplus.net/weather-search/Belo%2520Horizonte>. Acesso em 30 set. 2020.

TEMUUJIN, J., RICKARD, W., LEE, M., VAN RIESSEN, A., *Preparation and thermal properties of fire resistant metakaolin-based geopolymer-type coatings,* **J. Non. Cryst. Solids.** 357, 1399–1404. 2011. doi:10.1016/j.jnoncrysol.2010.09.063.

U.S. Geological Survey - USGS, 2020, **Mineral commodity summaries 2020**: U.S. Geological Survey, 200 p., 2020. https://doi.org/10.3133/

VILLAQUIRAN-CAICEDO, M. A., GUTIERREZ, R. M., SULEKAR, S., DAVIS, C., NINO, J. C. Thermal properties of novel binary geopolymers based on metakaolin and alternative silica sources. **Appl. Clay Sci.** 118, 276-282. 2015.