

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

JULIO CESAR BANDEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DO ENVOLTÓRIO DE EDIFICAÇÕES:
UM ESTUDO DE CASO DE CONFORTO TÉRMICO**

PONTA GROSSA

2021

JULIO CESAR BANDEIRA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DO ENVOLTÓRIO DE EDIFICAÇÕES:
UM ESTUDO DE CASO DE CONFORTO TÉRMICO**

**BUILDING ENVELOPE THERMAL PERFORMANCE ANALYSIS: A CASE STUDY
OF THERMAL COMFORT**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador: Gerson Henrique dos Santos.

PONTA GROSSA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DO ENVOLTÓRIO DE EDIFICAÇÕES : UM ESTUDO DE CASO DE CONFORTO TÉRMICO

por

JULIO CESAR BANDEIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 20 de outubro de 2021 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr.Gerson Henrique dos Santos
Orientador

Prof. Dr.Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Dr.Luiz Eduardo Melo Lima
Membro Titular

Prof.Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Roger Navarro Verastegui
Coordenador do Curso

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, aos colegas de trabalho, e aos professores da UTFPR que por nove anos me ajudaram a construir uma base sólida de lições e aprendizados para a minha jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador pela vida e chance de fazer a diferença no mundo para torná-lo um lugar melhor.

Aos meus pais que sempre me colocaram no melhor caminho da educação, pelo amor, cuidado e incentivo deles.

À minha esposa Francine por estar sempre comigo e me apoiar em todos os momentos e decisões desde o início da faculdade.

Ao professor Gerson Henrique dos Santos pela oportunidade de trabalhar com ele, pelos ensinamentos, paciência e conduta exemplar como professor.

Para todas as pessoas que tive contato e prazer de conhecer nessa trajetória de UTFPR ao longo dos anos.

RESUMO

É cada vez mais buscado pela sociedade buscar a melhoria do conforto térmico e bem estar nos ambientes que suas atividades são desempenhadas. Dito isto, este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento térmico de diferentes configurações de envoltórios de edificações e compará-lo ao padrão brasileiro, verificando principalmente seu efeito no conforto térmico, formado por reboco e tijolos nas paredes verticais e laje com cerâmica na cobertura. Desta maneira, foram realizadas simulações em uma edificação comercial de pequeno porte, nas cidades de Curitiba e Recife para o inverno e verão, considerando um cenário comum de atividades e vestimentas de escritório. O aplicativo utilizado para as simulações deste estudo foi o Domus - Eletrobrás, que é uma ferramenta computacional brasileira de simulação termoenergética de edificações. Verificou-se nos resultados, por meio do índice de conforto (PMV - *Predicted Mean Vote*), que durante os dias com condições climáticas mais críticas, as melhorias foram notáveis quando algumas alterações no envoltório foram adotadas. As configurações de blocos de concreto, propostas para as paredes verticais, superaram o desempenho do padrão brasileiro em quase todos os cenários. Em alguns casos, melhorias de até 35% no conforto térmico foram observadas, quando utilizaram-se cores claras na pintura e cobertura (laje) com preenchimento de blocos de poliestireno expandido. No entanto, a absorvância solar considerada para acabamento externo mostrou-se ser tão importante, quanto a configuração do envoltório.

Palavras-chave: conforto térmico; blocos de concreto; simulação de ambientes; otimização.

ABSTRACT

It is increasingly sought by society to improve thermal comfort and well-being in the environments in which their activities are performed. That said, this paper aims to evaluate the thermal behavior of different building envelope configurations and compare them to the Brazilian standard, mainly verifying their effect on thermal comfort, formed by plaster and bricks on the vertical walls and ceramic slab on the roof. Thus, simulations were performed in a small commercial building in the cities of Curitiba and Recife for winter and summer, considering a common scenario of office activities and clothing. The application used for the simulations in this study was Domus - Eletrobrás, which is a Brazilian computational tool for thermoenergetic simulation of buildings. The results showed, through the comfort index (PMV - Predicted Mean Vote), that during the days with more critical weather conditions, the improvements were remarkable when some changes in the envelope were adopted. The concrete block configurations, proposed for the vertical walls, outperformed the Brazilian standard in almost all scenarios. In some cases, improvements of up to 35% in thermal comfort were observed when light colors were used in the paint and the roof (slab) was filled with expanded polystyrene blocks. However, the solar absorptance considered for the external finish proved to be as important as the configuration of the envelope.

Keywords: thermal comfort; concrete blocks; environment simulation; optimization.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Base Case – Light Mass	19
Figura 2 – Padrão brasileiro para construção de paredes	20
Figura 3 – Configurações geométricas para o bloco M-20	21
Figura 4 – Configuração do bloco com escudo radiante	21
Figura 5 – Configuração da laje com enchimento de EP	22
Gráfico 1 – Valores de PMV no verão em Curitiba com cobertura de laje padrão	25
Gráfico 2 – Valores de PMV no verão em Curitiba com cobertura de laje preenchida com EPS	26
Gráfico 3 – valores de PMV no inverno em Curitiba com cobertura padrão.....	27
Gráfico 4 – Valores de PMV no inverno em Curitiba, com cobertura de laje preenchida com EPS	28
Gráfico 5 – Valores de PMV no verão em Recife com cobertura padrão	29
Gráfico 6 – Valores de PMV no verão em Recife com cobertura de laje preenchida com EPS	30
Gráfico 7 – Valores de PMV no inverno em Recife com cobertura padrão	31
Gráfico 8 - Valores de PMV no inverno em Recife com cobertura de laje preenchida com EPS	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Escala de índices de sensação térmica	13
Tabela 2 – Condições iniciais para o ambiente simulado.....	23
Tabela 3 – Configurações utilizadas na simulação	24

LISTA DE SIGLAS

ANSI American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Normas)

ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air-conditioning Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Frigoríficos e de Ar Condicionado)

EPS Expanded Polystyrene (Poliestireno Expandido)

NBR Norma Brasileira

PMV Predicted Mean Vote (Voto Médio Estimado)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da transferência de calor (m^2)
c_{ar}	Calor específico do ar [$J/ (kg.K)$]
\dot{E}_g	Energia gerada internamente (W/m^2)
\dot{E}_t	Fluxo de energia que atravessa o ambiente (W/m^2)
\dot{E}_{sk}	Perda de calor latente pela pele (W/m^2)
f_f	Fator de forma
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [$W/ (m.K)$]
h_c	Coeficiente de convecção entre o ar e roupas [$W/ (m.K)$]
K_{cl}	Condução de calor da pele até a superfície (W/m^2)
L	Carga térmica (W/m^2)
M	Atividade desempenhada pelo indivíduo (W/m^2)
\dot{m}_{ger}	Taxa de geração de vapor interna (kg/s)
\dot{m}_{inf}	Fluxo de massa por infiltração (kg/s)
\dot{m}_{vent}	Fluxo de massa por ventilação (kg/s)
p_a	Pressão de vapor no ar úmido (kPa)
t_{cl}	Temperatura superficial das roupas ($^{\circ}C$)
T_{int}	Temperatura do ar ambiente ($^{\circ}C$)
$T_n(t)$	Temperatura da superfície interna do envoltório ($^{\circ}C$)
t_r	Temperatura radiante média ($^{\circ}C$)
V_{ar}	Volume do ambiente (m^3)
W	Trabalho mecânico realizado pelo corpo (W/m^2)
W_{ext}	Umidade específica externa ($kg \text{ água}/kg \text{ ar seco}$)
W_{int}	Umidade específica interna ($kg \text{ água}/kg \text{ ar seco}$)
α	Absortância
ε	Emissividade
ρ_{ar}	Massa específica do ar
λ	Condutividade térmica [$W/ (m.K)$]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann [$W/ (m^2.K^4)$]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Justificativa.....	100
1.2	OBJETIVOS.....	11
1.2.1	Objetivo Geral	11
1.2.2	Objetivos Específicos	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1	CONFORTO TÉRMICO	12
2.2	SOFTWARE E MODELO MATEMÁTICO.....	14
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
4	PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO	19
5	RESULTADOS E DISCUSSOES	24
5.1	RESULTADOS DE PMV PARA CURITIBA.....	24
5.2	RESULTADOS DO PMV PARA RECIFE.	28
6	CONCLUSÕES	33
	REFERÊNCIAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

Não é de hoje que a preocupação do homem com o conforto térmico está presente em sua vida. Desde os tempos mais remotos, o ser humano busca otimizar e inovar maneiras de se manter protegido e bem aconchegado em seu recinto. Formas de manter o ambiente interno em que se vive, agradável e aquecido, foram sempre almejadas por qualquer pessoa. Hoje em dia, grande parte da energia elétrica consumida em edificações é para suprir a demanda de aparelhos utilizados para o conforto térmico (KRÜGER, 2012).

Atualmente, a energia consumida em residências, estabelecimentos comerciais e públicos, representa uma cota significativa no consumo total de energia no país. De acordo com o Ministério de Minas e Energia do Governo Federal, esse número corresponde a 15,4% do consumo total (Balanço Energético Nacional, 2020). Nos Estados Unidos esse número é ainda maior (20% do consumo total), sendo atribuído principalmente à utilização de climatizadores em edificações (Santos, Fogiatto e Mendes, 2017).

Nesse contexto, a transferência de calor através dos envoltórios de um edifício é um fator crucial que influencia o consumo de energia em aparelhos de climatização. A escolha da orientação da planta no espaço destinado à construção, posicionamento de janelas, materiais do envoltório, aberturas para ventilação e dispositivos de sombreamento são parâmetros cruciais para se obter o conforto para os usuários e bom desempenho térmico do recinto (KRÜGER, 2012).

Para que um edifício seja considerado mais eficiente que outro, ele deve proporcionar as mesmas condições internas (ou melhores) com menor gasto de energia. Em edifícios há muitas oportunidades de melhoria, desde a etapa de construção até uso de aparelhos de climatização modernos e de iluminação eficientes, além da conscientização dos funcionários/habitantes em pequenos atos. Estima-se que o custo operacional ao longo de sua vida útil provavelmente superará o custo da própria construção (LAMBERTS, 2011).

Quando se projeta uma edificação energeticamente eficiente, o retorno não é apenas na conta de energia, mas também no desempenho de funcionários que irão realizar as suas atividades com maior eficiência e qualidade. Estabelecimentos

projetados para serem economicamente eficientes também trazem a vantagem de atenuar efeitos do aquecimento global.

Uma maneira de aumentar a eficiência energética da edificação, seria através da redução da transmitância térmica do envoltório de edificação, utilizando-se de blocos vazados de concreto com diferentes configurações, como proposto por Fogiatto, Santos e Catelan (2019).

1.1 JUSTIFICATIVA

Infelizmente no Brasil, a redução dos custos construtivos muitas vezes torna-se mais importante do que a busca da eficiência energética nestes ambientes, gerando assim, a necessidade de um consumo de energia excessivo devido aos sistemas de climatização. Neste contexto, a configuração do envoltório da edificação desempenha um papel fundamental no seu desempenho termoenergético. Na literatura encontram-se diversos trabalhos, como por exemplo, os realizados por Bouchair (2008), Fioretti (2014), Zhang e Wang (2017), Santos (2017), em que a transmitância térmica de diferentes configurações de blocos de concreto foram verificados. No entanto, os efeitos destas configurações no conforto térmico dos ocupantes, foram ainda pouco explorados. Deste modo, comparações com a configuração padrão brasileira do envoltório devem ser apresentadas. Efeitos da absorvância solar da pintura também devem ser verificados.

1.2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a melhor configuração de envoltório de uma edificação comercial, para duas cidades brasileiras (Curitiba e Recife). Deste modo, busca-se obter o menor consumo de energia com sistemas de climatização, a fim de proporcionar o melhor conforto térmico aos usuários, por meio de simulação computacional utilizando o aplicativo Domus- Eletrobrás.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o desempenho de diferentes configurações de blocos de concreto apresentados por Fogiatto, Santos e Catelan (2019), em relação ao conforto térmico, comparando-os com o envoltório padrão brasileiro, formado por tijolos e reboco.

- Analisar os efeitos no conforto térmico do EPS usado no preenchimento da laje da edificação, em comparação a laje padrão formada por concreto e bloco de cerâmica.

- Verificar os efeitos da absorvância solar da pintura do envoltório no conforto térmico do ambiente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para analisar o desempenho térmico de envoltórios de edificações e o seu efeito no conforto térmico dos ocupantes, faz-se necessário o conhecimento dos modelos matemáticos utilizados pelo software Domus-Eletróbrás para a determinação destes índices. Deste modo, apresentam-se na sequência as equações governantes para a determinação dos índices PMV (Predicted Mean Vote) de conforto térmico, e para o balanço de massa e energia nos ambientes construídos.

2.1 CONFORTO TÉRMICO

Um aspecto importante em ambientes de trabalho é o conforto térmico. Este pode afetar diretamente no desempenho das pessoas, podendo trazer consequências danosas no dia a dia. Um ambiente satisfatório termicamente faz com que a qualidade interna do ar melhore e também a eficiência energética da edificação.

Para entender melhor esse tema, é necessário conhecer qual é a definição de conforto térmico e neutralidade térmica. De acordo com a norma 55 da ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento e Refrigeração e Ar Condicionado), o conforto térmico é definido como “a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”. Já a neutralidade térmica é “a condição na qual uma pessoa não prefira nem calor nem frio no ambiente ao seu redor”.

Para que se atinja o conforto térmico, é necessário uma combinação adequada de variáveis pessoais e ambientais. Isto pode ocorrer com a melhoria técnica do ambiente em que a pessoa se encontra para que se crie um ambiente confortável termicamente.

O modelo de conforto térmico proposto por Fanger baseado no PMV é um dos índices mais utilizados para avaliar esse parâmetro. Ele mostra a média da sensação térmica de um grupo de pessoas exposta às mesmas condições em um ambiente.

O PMV pode variar de -3 a +3, onde cada ponto na escala representa a sensação da pessoa relacionada ao ambiente em que se encontra. A escala de valores pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Escala de índices de sensação térmica.

PMV	Sensação Térmica
+3	Muito quente
+2	Quente
+1	Aquecido
0	Neutro
-1	Resfriado
-2	Frio
-3	Muito frio

Fonte: Fanger (1970)

No modelo proposto por Fanger (1970), considera-se que o corpo está em equilíbrio térmico, não ocorrendo acúmulo de calor em seu interior.

A equação de balanço térmico entre o corpo e o ambiente, considerando troca de calor por convecção, radiação e evaporação, pode ser expressa pela equação (1):

$$(1) \quad (M - W) - C_{res} - E_{sk} - E_{res} = K_{cl} = C + R$$

onde M é a taxa metabólica de produção de calor (W/m^2), W o trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo (W/m^2), C_{res} a perda de calor sensível pela respiração por convecção (W/m^2), E_{sk} a perda de calor latente pela pele através de evaporação (W/m^2), K_{cl} a condução de calor da pele até a superfície externa das roupas (W/m^2) e $C + R$ as perdas de calor sensível pela pele por convecção e radiação (W/m^2).

As perdas de calor associadas à transpiração e condução são expressas por equações empíricas (Fanger, 1970) que quando substituídas na equação de balanço térmico, resultam na seguinte expressão:

$$(2) \quad (M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42 [(M - W) - 58,15] - 0,0173 M (5,87 - p_a) - 0,0014 M (34 - T_a) = 3,96 \times 10^{-8} fcl [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + fcl hc (T_{cl} - T_a)$$

onde p_a é a pressão de vapor no ar úmido (kPa), T_a é a temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), T_{cl} é a temperatura superficial das roupas ($^{\circ}\text{C}$), f_c (I_{cl}) é a razão de área do corpo vestido e corpo nu (adimensional), T_r é a temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$), h_c é o coeficiente de convecção entre o ar e roupas [$\text{W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$].

Da Equação (2), todos os termos são estimados por tabelas de variáveis pessoais ou por medições de variáveis ambientais, com exceção da temperatura superficial externa das roupas, que precisa ser calculada iterativamente (função implícita).

Fanger (1970) também definiu a carga térmica L como sendo a diferença entre o calor gerado pelo corpo e o calor trocado com o ambiente:

$$(3) \quad L = M - 3,05 (5,73 - 0,007 M - p_a) - 0,42 (M - 58,15) - 0,0173 M (5,87 - p_a) - 0,0014 M (34 - T_a) = 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (T_{cl} - T_a)$$

Para ambientes que não são termicamente neutros, Fanger (1970) estende sua correlação dando origem à conhecida equação do PMV, considerando o equilíbrio de calor entre o ambiente e o corpo, conforme mostrado na Equação (4):

$$(4) \quad PMV = [0,0303 \exp(-0,036 M) + 0,028] L$$

sendo L a carga térmica (W/m^2) e M a taxa metabólica (W/m^2).

2.2 APLICATIVO E MODELO MATEMÁTICO

Proposto por Mendes, Oliveira e Santos (2005), o modelo matemático utilizado pelo aplicativo Domus-Eletróbrás descreve um balanço de energia em um ambiente submetido a cargas de condução, convecção e radiação solar, dado pela Equação (5):

$$(5) \quad \dot{E}_t + \dot{E}_g = \rho_{ar} c_{ar} V_{air} \frac{dT_{int}}{dt}$$

em que \dot{E}_t representa a taxa de energia que atravessa o envoltório da edificação (W), \dot{E}_g a energia gerada internamente (W), ρ_{air} a massa específica do ar (kg/m^3), c_{air} o calor específico do ar [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$], V_{air} o volume do ambiente (m^3) e T_{int} a temperatura do ar do ambiente interno ($^{\circ}\text{C}$).

O fluxo de calor $\dot{Q}(t)$ convectivo, que atravessa o envoltório da edificação, pode ser calculado pela lei de resfriamento de Newton:

$$(6) \quad \dot{Q}(t) = hA[T_n(t) - T_{int}(t)]$$

sendo h o coeficiente de transferência de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$), A , a área de transferência de calor (m^2) e $T_n(t)$ a temperatura da superfície interna do envoltório ($^{\circ}\text{C}$).

Para o lado externo do envoltório, propõe-se que paredes, tetos, portas e janelas estão expostas à radiação solar e à convecção do ambiente externo, de acordo com a Equação (7):

$$(7) \quad -(\lambda \frac{\partial T}{\partial x})_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r$$

Sendo que o termo $h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0})$ representa a transferência de calor por convecção (W/m^2), αq_r a radiação solar absorvida (W/m^2) e λ a condutividade térmica [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$].

Para a superfície interna do ambiente, além da convecção, considera-se também a troca de calor por radiação de ondas longas entre as superfícies:

$$(8) \quad -(\lambda \frac{\partial T}{\partial x})_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r$$

sendo que f_f representa o fator de forma, ε , a emissividade, σ , a constante de Stefan-Boltzmann e T_{sup} , a temperatura das outras superfícies internas do ambiente (K).

A respeito do piso da edificação, Mendes, Oliveira e Santos (2005) adotaram uma temperatura imposta, a uma profundidade de 2 m, como condição de contorno.

No teto, foi considerado a perda de temperatura por meio da radiação de ondas longas (R_{lw}), conforme a equação (9):

$$(9) \quad -\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r - (\varepsilon)_{teto} R_{lw}$$

em que o termo ε_{teto} representa a emissividade de onda longa do teto.

Para o balanço de vapor de água, considera-se a ventilação, infiltração e a geração interna proveniente de pessoas e equipamentos, conforme a Equação (10):

$$(10) \quad (\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent})(W_{ext} - W_{int}) + \dot{m}_b + \dot{m}_{ger} = \rho_{ar} V_{ar} \frac{dT_{int}}{dt}$$

onde \dot{m}_{inf} representa o fluxo de massa por infiltração (kg/s), \dot{m}_{vent} , o fluxo de massa por ventilação (kg/s), W_{ext} , a umidade específica externa (kg água/kg ar seco), W_{int} , a umidade específica interna (kg água/kg ar seco), \dot{m}_b o fluxo de vapor de água da respiração dos ocupantes (kg/s), \dot{m}_{ger} , o fluxo de geração de vapor interna (kg/s), ρ_{ar} , a densidade do ar (kg ar seco/s) e V_{ar} , o volume do ambiente (m³).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desempenho térmico das edificações depende de vários fatores, tais como: propriedades termofísicas e espessura dos materiais utilizados no envoltório do uso ou não de ventilação natural e mecânica, sombreamento, localização geográfica, localização de janelas, entre outros.

Neste contexto, diferentes configurações de blocos vazados usados na construção trazem diferentes resultados no quesito de transferência de calor e conforto térmico no interior do ambiente. A quantidade de cavidades no interior destes blocos pode aumentar ou diminuir a transmitância térmica, devendo-se chegar a um ponto ótimo para determinar a configuração a ser utilizada. Ainda, com o aumento do número de cavidades dos blocos, os efeitos de radiação e de convecção natural internos são minimizados (LI *et al.*, 2008).

Bouchair (2008) verificou que a transmitância térmica das paredes pode ser diminuída de três formas: com o aumento da altura da cavidade em relação à sua espessura, com o preenchimento da cavidade com material isolante e com a diminuição da emissividade da superfície interna da cavidade. Em um estudo semelhante, Antar e Baig (2009) concluíram que quanto maior o número de cavidades, considerando uma mesma espessura de bloco, menor a transmitância térmica do bloco.

Um estudo a respeito do desempenho térmico de blocos de cerâmica vazados, com revestimento de baixa emissividade no interior das cavidades, foi apresentado por Fioretti e Principi (2014). Quando eles consideram um revestimento com emissividade de 0,1, a transmitância térmica dos blocos sofreu reduções de 26% a 45%, dependendo da geometria do bloco.

O efeito do transporte de umidade no interior de blocos também tem sido verificado (SANTOS *et al.*, 2009). Neste estudo numérico eles mostraram que a transferência de calor através de blocos vazados difere consideravelmente daquela quando se assume apenas condução pura de calor.

Zhang e Wang (2017) mostraram que aumentar o espaçamento entre cavidades pode trazer um resultado interessante em relação a diminuição da

transmitância térmica, ao invés de aumentar a espessura do bloco para comportar mais cavidades. Outra maneira eficiente de diminuir a transmitância térmica dos blocos vazados, seria por meio do uso de materiais isolantes no interior das cavidades, podendo reduzir o fluxo de calor em até 50% (XAMÁN *et al.*, 2017).

Quando as coberturas das edificações são formadas basicamente por laje, esta desempenha um papel importante em relação aos efeitos da radiação no desempenho térmico da edificação. Moreira e Marco (2019) mostraram que a laje com blocos de EPS apresenta melhor desempenho térmico e também econômico, sendo uma escolha muito superior em relação à laje pré-moldada comum, além de ser um material 100% biodegradável. Dalberto (2019) também observou que o desempenho térmico de uma estrutura de laje pré-moldada com EPS foram em média 35% superior quando comparado ao de uma laje comum, montada com blocos cerâmicos. Esta configuração está cada vez sendo mais utilizada nas construções, visto as vantagens obtidas em relação ao peso estrutural e custos, quando comparada à laje padrão com cerâmica.

Um estudo realizado por (KRÜGER, 2012) que propôs uma diferente configuração de envoltório de uma edificação, com maiores mudanças do que as apresentadas nesse trabalho, apresentou resultados referentes à economia de energia devido à otimização do conforto térmico do ambiente.

Além da configuração do envoltório, a pintura externa desempenha um papel importante no desempenho térmico das edificações (CHOSUÈ *et al.* 2017). Desta forma, os efeitos do acabamento externo também são analisados neste trabalho. As melhores configurações de envoltório são propostas para duas cidades brasileiras: Curitiba (clima ameno) e Recife (clima quente), levando-se em conta os índices de conforto térmico obtidos para uma edificação comercial.

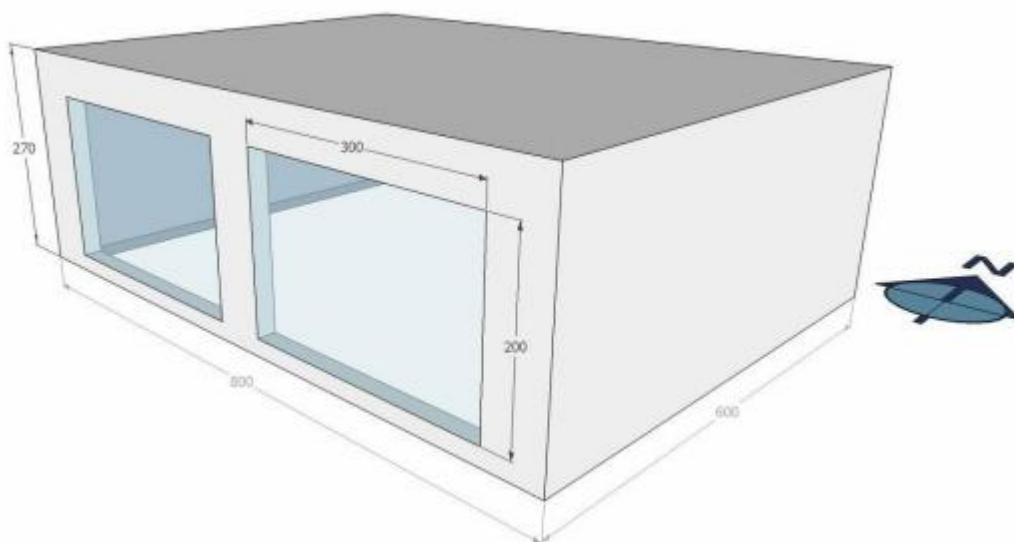
4 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo tem como objetivo mostrar todas as considerações levadas em conta para realizar o estudo numérico das diferentes configurações de blocos e apresentar suas propriedades térmicas.

Para realizar o estudo do conforto térmico diante das diferentes configurações de blocos propostas neste trabalho, utilizou-se um modelo de edificação simples, chamado de BASE Case, de acordo com a norma ANSI/ASHRAE 140-2007. Esta norma é utilizada para a validação de aplicativos de simulações térmicas de edificações, a qual o Domus-Eletróbrás foi submetida.

O ambiente possui dimensões de 8 m x 6 m x 2,7 m contendo uma única zona, com duas janelas de 6 m² posicionadas na face sul em um nível de 0,2 m do solo. A Figura 1 ilustra o modelo de edificação proposto para a realização deste estudo.

Figura 1 - Base Case (light mass)

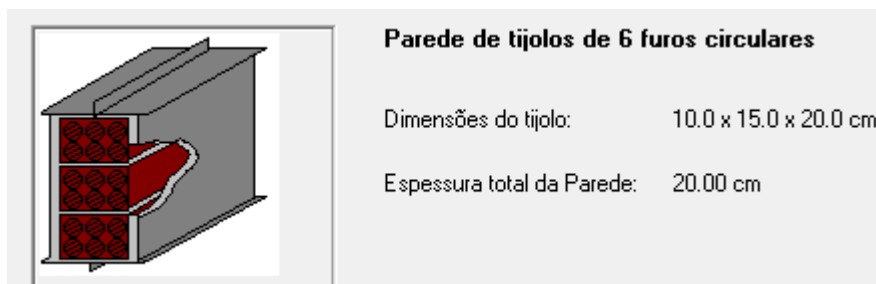


Fonte: Abadie (2008)

As zonas climáticas que foram consideradas nesse trabalho foram as da cidade de Curitiba (zona bioclimática 1) e de Recife (zona bioclimática 8). Cada zona climática do aplicativo representa um histórico de clima baseado na realidade e possui seu próprio arquivo, o qual aplica as condições de contorno pertinentes ao período selecionado durante o ano para que a simulação aconteça para a edificação

construída no software. A configuração padrão brasileira do envoltório utilizada no comparativo deste trabalho é ilustrada na Figura 5, consistindo de uma camada de 2,5 cm de concreto, seguida de tijolos, e outra camada de concreto de 2,5 cm. A transmitância térmica para essa configuração é de 2,27 W/(m.K) e a capacitância térmica de 358 kJ/(m.K) (Mendes, Oliveira e Santos, 2017).

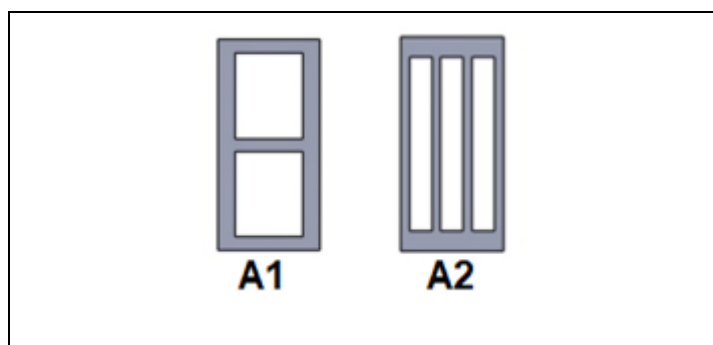
Figura 2 – Padrão brasileiro para construção de paredes



Fonte: Duarte (2016)

Para cada cidade foram determinadas 8 diferentes configurações de envoltório para realizar as simulações e ilustrar como o ambiente interno se comporta em termos do conforto térmico, mostrando o PMV para cada caso. Além da mudança do tipo dos blocos das paredes verticais, também foi utilizado uma configuração de laje preenchida com poliestireno expandido, com o intuito de melhorar o isolamento térmico. A influência da cor da pintura utilizada no envoltório também foi levada em conta, atuando diretamente nos efeitos da radiação solar.

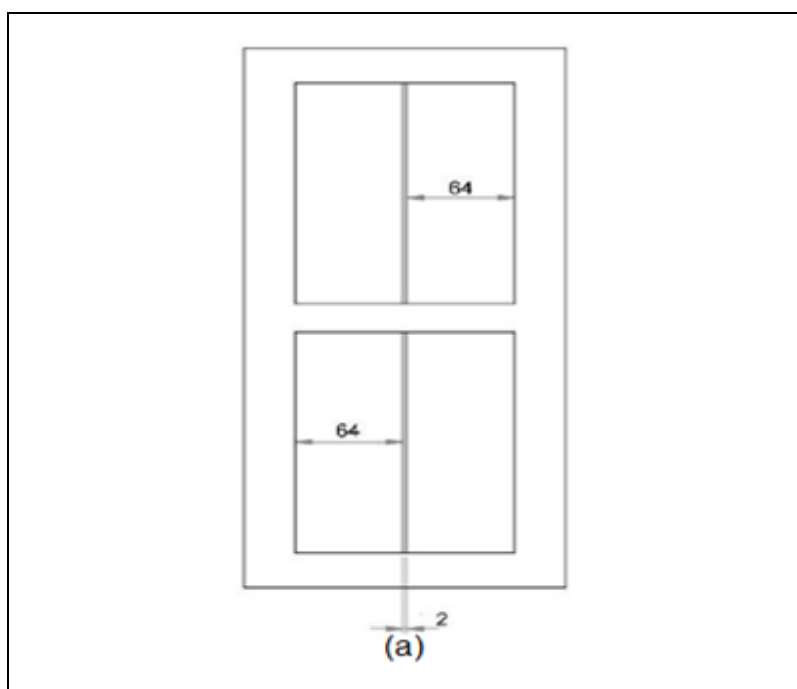
Para os blocos em questão, as dimensões externas são apresentadas na Norma Brasileira (NBR) 6136 (ABNT, 1994), tendo para um bloco de concreto padrão, denominado M-20, as dimensões de 190 mm de comprimento, 390 mm de largura e 190 mm de altura como observado na Figura 3.

Figura 3 – Configurações geométricas para o bloco M-20

Fonte: adaptada de SANTOS, Fogiatto e Mendes (2017)

Para estas duas configurações, as transmitâncias térmicas são de 5,32 W/(m.K) (A1) e de 3,66 W/(m.K) (A2), de acordo com Santos, Fogiatto e Mendes (2017).

Os acessórios utilizados no bloco A1, alterando sua transmitância térmica, serão estudados neste trabalho a partir de duas configurações diferentes de envoltório apresentadas. Seguindo o padrão M-20 de dimensão externa, consideraram-se acessórios dentro de suas cavidades, com isolamento de poliestireno ou escudos radiantes de alumínio em seu interior, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Configuração do bloco com escudo radiante (a)

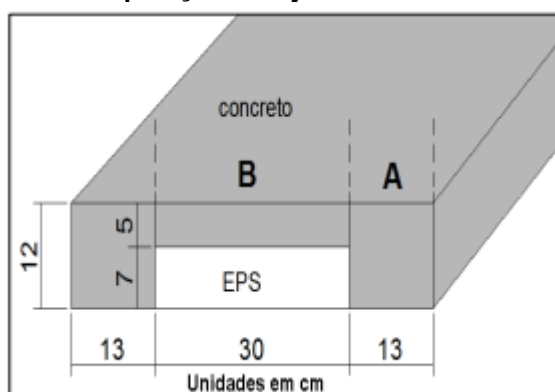
Fonte: adaptada de Fogiatto, Santos e Catelan (2019)

Os valores de transmitância térmica para esses 2 blocos, de acordo com Fogiatto, Santos e Catelan (2019), são de 1,89 W/(m.K) para o bloco com preenchimento de poliestireno e 3,39 W/(m.K), para o bloco com escudos radiantes de alumínio.

Para a pintura externa da edificação, consideraram-se as condições de acabamento de concreto aparente, com uma absorvância solar média de 0,55 (ÇENGEL, 2012) e pintura com cores claras, resultando num valor de absorvância solar média de 0,25 de acordo com o anexo B da NBR 15220-2.

Para a cobertura da edificação foram considerados dois casos. No primeiro deles utilizou-se o padrão brasileiro para confecção de lajes, considerando uma composição mista de concreto e cerâmica, com um valor de transmitância térmica de 3,93 W/(m.K) (Mendes, Oliveira e Santos, 2017). Para o segundo caso adotou-se uma laje de concreto e EPS, com as dimensões mostradas na Figura 5.

Figura 5 – Composição da laje com enchimento de EPS



Fonte: adaptado de Crema e Pelisser (2014)

Para esse tipo de laje foi adotado um valor de transmitância térmica de 2,3 W/(m.K), de acordo com um estudo feito por Dalberto (2017), sendo 38% menor que o padrão. Para aumentar a influência da laje na carga térmica do ambiente, não se considerou o telhado em ambos os casos. Este efeito pode ser melhor verificado no trabalho de Diedrich (2018).

As condições iniciais para as simulações são apresentadas na tabela 2, para a cidade de Curitiba e Recife, respectivamente. Para o cálculo do PMV, considerou-se

uma taxa metabólica de 1,2 *met*, no qual representa as atividades rotineiras de escritório, com a pessoa sentada trabalhando. No inverno para a cidade de Curitiba, utilizou-se um valor de 1,2 *clo* para o índice de vestimenta, e para o verão de 0,4 *clo*. Para a cidade de Recife, um valor médio de 0,4 *clo* foi utilizado durante todo o ano, devido as poucas variações climáticas desta cidade.

Tabela 2 - Condições iniciais para o ambiente simulado

Cidade	Taxa metabólica M (met)	Índice de vestimenta	Velocidade do ar (m/s)	Umidade inicial (%)	Passo de tempo de simulação (s)
Curitiba	1,2	0,4 (verão) e 1,2 (inverno)	0,01	50	30
Recife	1,2	0,4 (verão e inverno)	0,01	50	30

Fonte: Autoria própria (2021)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são mostrados e analisados os resultados obtidos nas simulações para desempenho de conforto térmico dos diferentes blocos de concreto em função do índice de conforto PMV.

Para a análise de resultados, a Tabela 4 mostra as diferentes configurações testadas no aplicativo, apresentando suas características e propriedades físicas para um bloco de modelo M-20.

Tabela 3 - Configurações utilizadas nas simulações

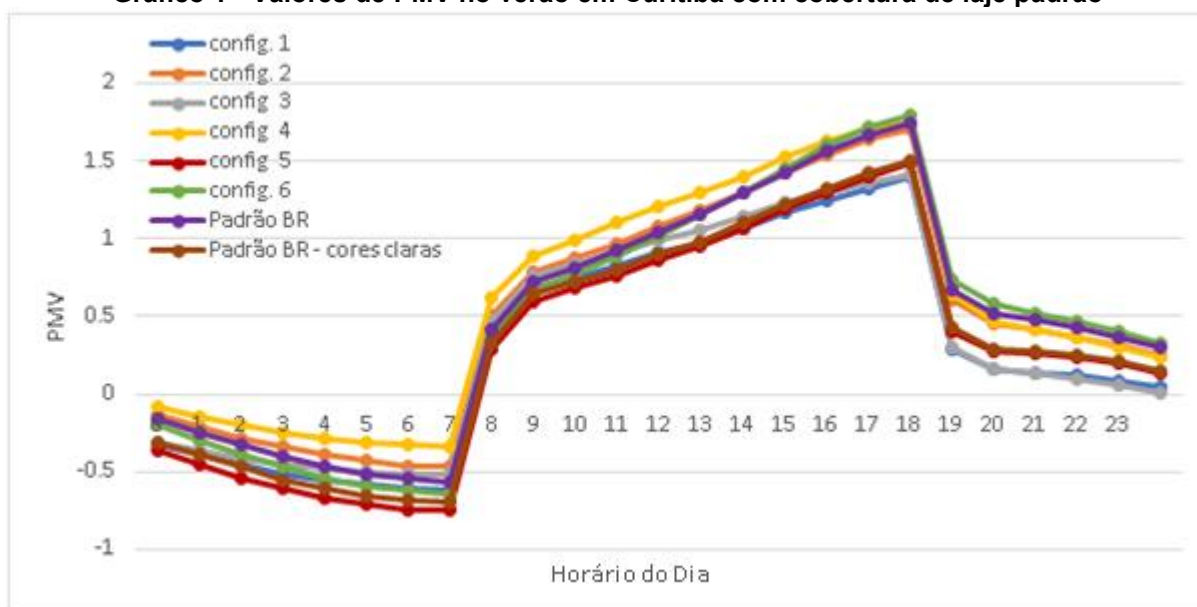
Configuração	Acessórios	Transmitância térmica [W/(m.K)]	Capacitância térmica [W/(m.K)]	Absortância solar
1	Escudos radiantes de alumínio	3,39	442	0,25
2	Escudos radiantes de alumínio	3,39	442	0,55
3	Isolante EPS	1,89	425	0,25
4	Isolante EPS	1,89	425	0,55
5	Bloco com 3 cavidades	3,66	325	0,25
6	Bloco com 3 cavidades	3,66	325	0,55

Fonte: Autoria própria (2021)

5.1 Resultados de PMV para Curitiba

Os gráficos 1 e 2 apresentam os resultados dos valores de PMV, obtidos nas simulações para o verão, mais especificamente no dia mais quente da última semana do mês de janeiro, na cidade de Curitiba.

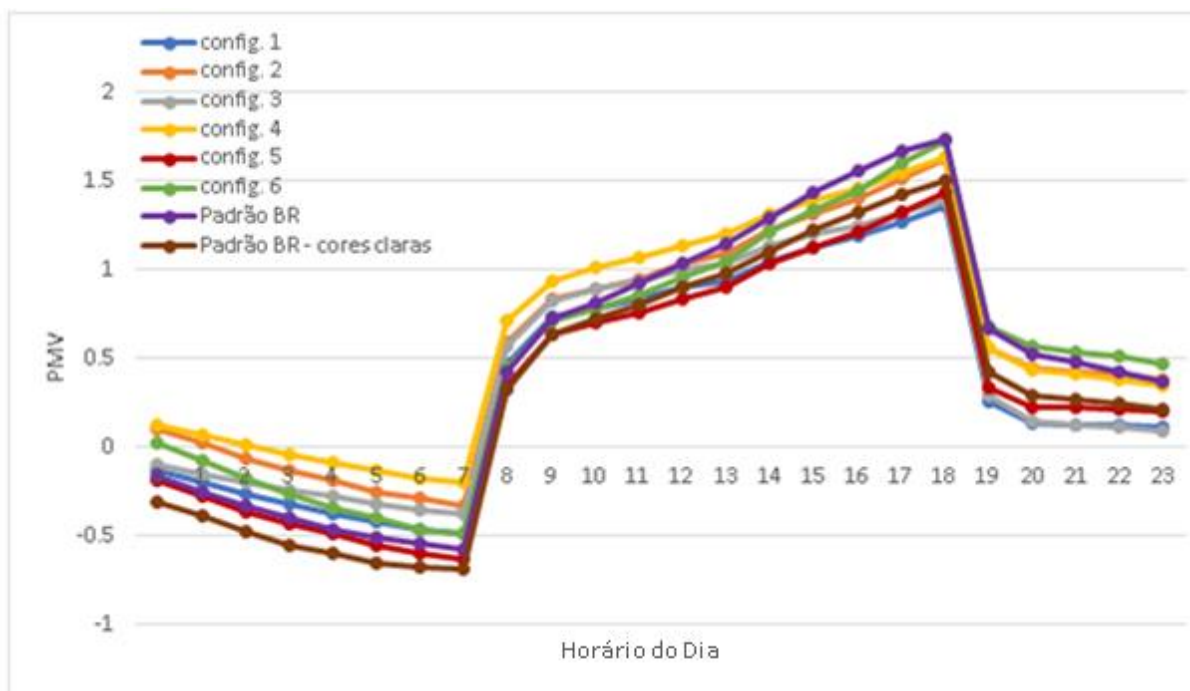
Gráfico 1 - Valores de PMV no verão em Curitiba com cobertura de laje padrão



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 1, observou-se que o padrão brasileiro é um dos piores casos de desempenho para o período diurno, ao contrário da configuração 1. Para um melhor conforto térmico durante o período noturno, a configuração 4 mostrou-se eficiente. A influência da pintura de cor clara durante o período diurno foi evidentemente, gerando uma melhora de 0,5 no valor do PMV. Como trata-se de uma edificação comercial, onde o período de trabalho concentra-se entre 8 h e 18 h, as configurações 1, 3 e 5 mostraram-se mais apropriada para o envoltório, mostrando que a absorção solar baixa é tão importante quanto a transmitância do envoltório. O padrão brasileiro pintado com cores claras, mostra-se eficiente como as demais propostas.

Gráfico 2 - Valores de PMV no verão em Curitiba com cobertura de laje preenchida com EPS

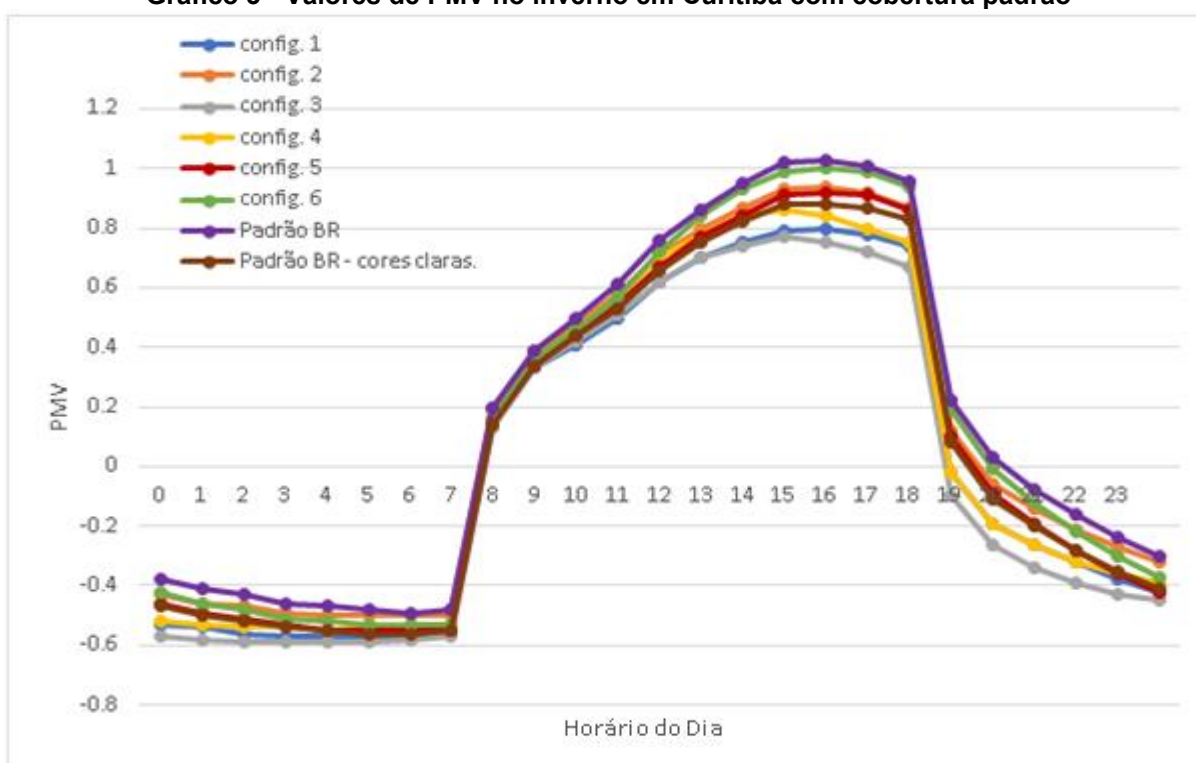


Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 2, mostra-se os valores de PMV utilizando a cobertura de laje com EPS. Os valores de PMV, quando comparados ao Gráfico 1, foram ligeiramente melhores (5% a 10 % menor). Este efeito pode ser atribuído ao clima ameno de Curitiba, mesmo no verão. O padrão brasileiro apresentou ainda o pior desempenho. A configuração 3 apresentou um bom desempenho de conforto térmico ao longo das 24 horas; porém, a configuração 5 mostrou-se a melhor durante os horários mais quentes do dia. O padrão brasileiro com cores claras ficou ligeiramente com desempenho inferior do que as propostas no trabalho.

Os Gráficos de 3 e 4 apresentam os resultados dos valores de PMV para o inverno, no dia mais frio da última semana do mês de julho, para a cidade de Curitiba.

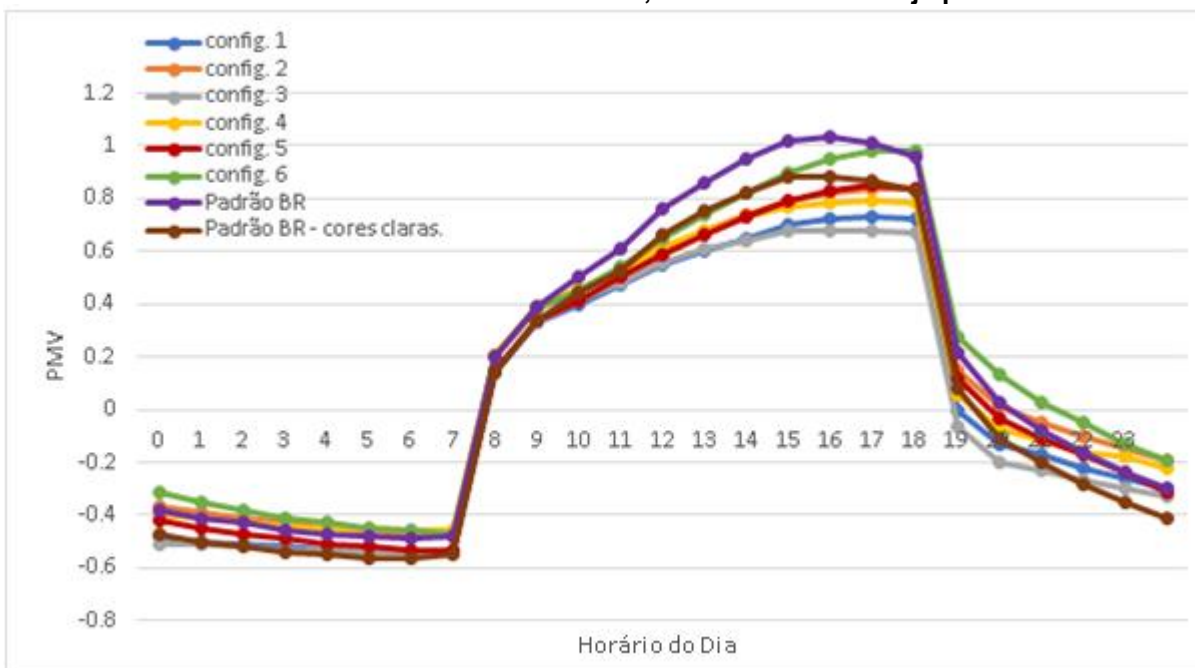
Gráfico 3 - Valores de PMV no inverno em Curitiba com cobertura padrão



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 3 pode-se observar que o desempenho do padrão brasileiro foi novamente o pior para o período diurno, ao contrário da configuração 3 que possui uma transmitância menor. Na média, atribui-se a melhor performance à configuração 5, durante todo o período. O padrão brasileiro mesmo com cores claras claramente teve um desempenho inferior que as demais propostas com mesma absorptância solar.

Gráfico 4 - Valores de PMV no inverno em Curitiba, com cobertura de laje preenchida com EPS



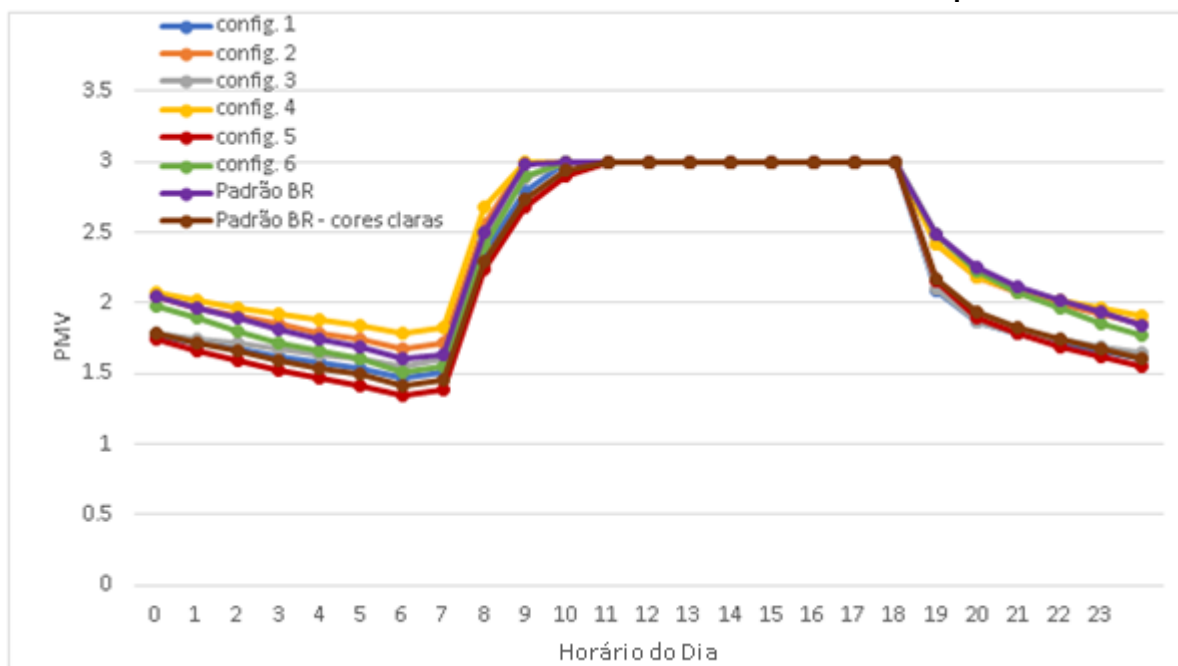
Fonte: autoria própria (2021)

Observa-se no Gráfico 4, que os valores do PMV tiveram uma pequena melhora durante todo o período, para todas as configurações. As configurações 1 e 3 continuaram com o melhor desempenho durante o dia. Devido a incidência menor de sol no envoltório do que no verão, as cores claras geraram uma diferença de apenas 0,2 no PMV. O padrão brasileiro com cores claras se mostra inferior às configurações com menor valor de transmitância térmica.

5.2 Resultados de PMV para Recife

Os Gráficos 5 e 6 apresentam os resultados dos valores de PMV obtidos nas simulações para o verão, no dia mais quente da última semana do mês de janeiro, para a cidade de Recife.

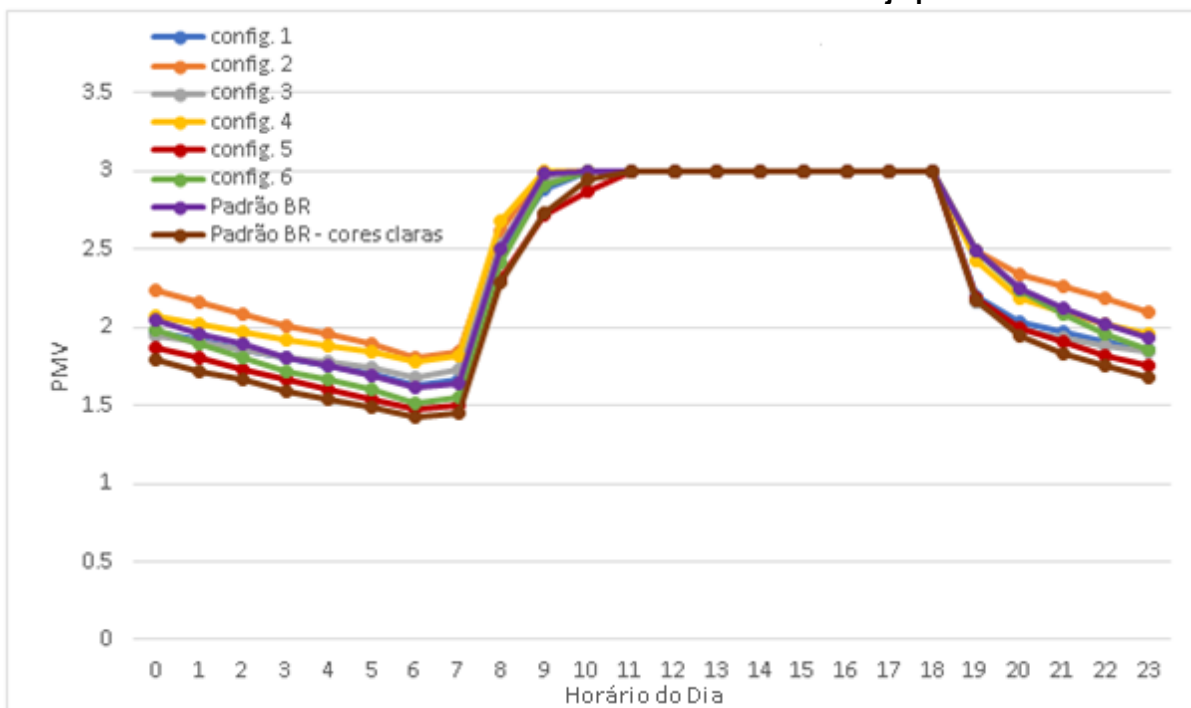
Gráfico 5 - Valores de PMV no verão em Recife com cobertura padrão



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 5, observa-se que a configuração 5 obteve os melhores índices para o período noturno. Verifica-se também que durante o período diurno, os valores de PMV atingem o valor máximo, independente da configuração do envoltório. Deste modo, somente com a utilização de um sistema de climatização, os índices de conforto térmico seriam melhorados.

Gráfico 6 - Valores de PMV no verão em Recife com cobertura de laje preenchida com EPS

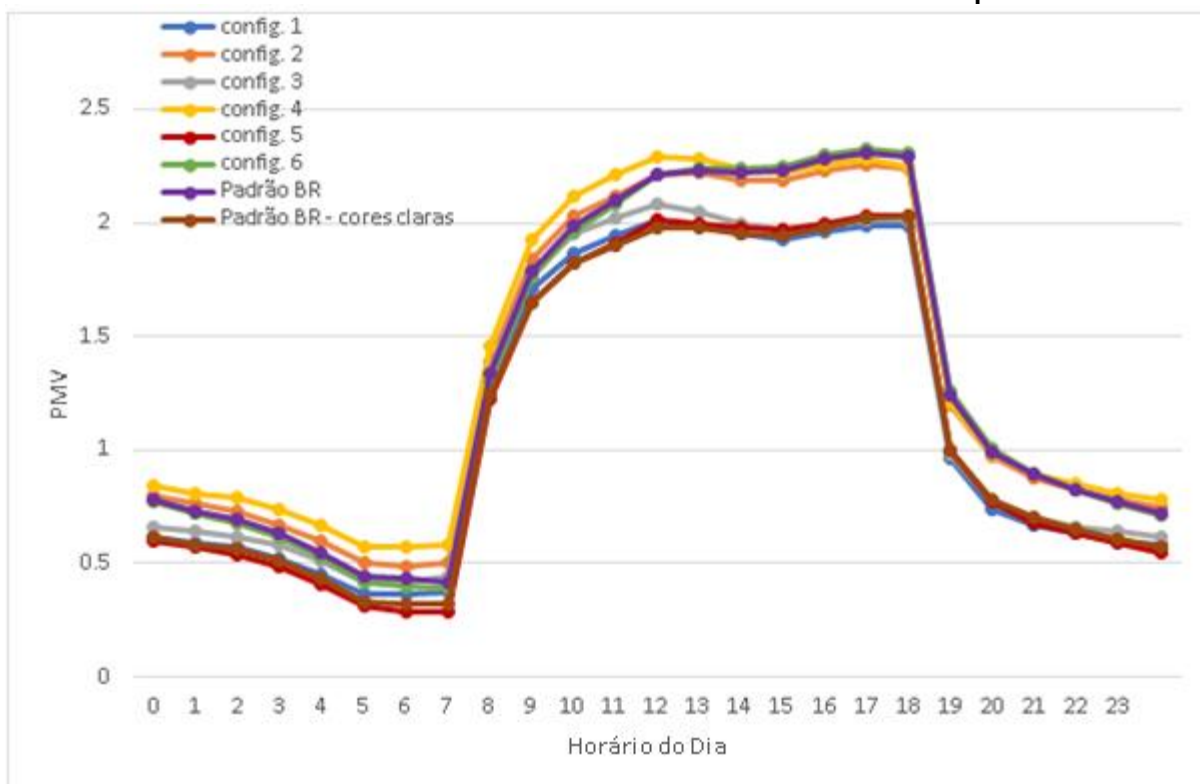


Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 6 mostram-se os valores de PMV utilizando a cobertura de laje com preenchimento de EPS. Os índices obtiveram um pequeno aumento para todas as configurações. Como no período noturno, a tendência seria do ambiente perder calor para o meio externo, um maior isolamento da laje diminuiu este efeito. No período diurno, este tipo de laje não trouxe uma melhora nos índices, indicando também a necessidade de climatização.

Valores de PMV para o inverno, no dia mais frio da última semana do mês de julho, para a cidade de Recife, são apresentados nos Gráficos 7 e 8.

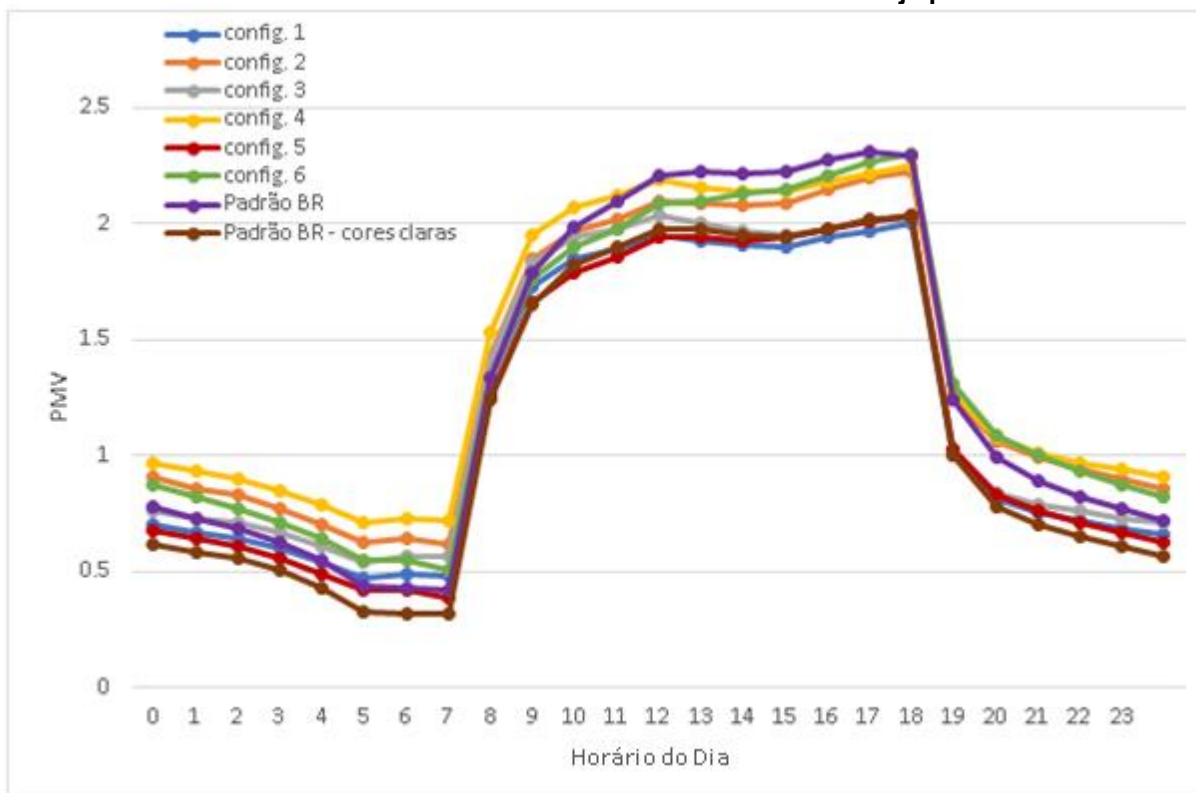
Gráfico 7 - Valores de PMV no inverno em Recife com cobertura padrão



Fonte: Autoria própria (2021)

No Gráfico 7 observa-se que o desempenho do padrão brasileiro é o segundo pior. As configurações 1, 3 e 5 obtiveram os melhores índices para todo o período. O padrão brasileiro com cores claras apresenta desempenho similar aos demais envoltórios no clima quente.

Gráfico 8 - Valores de PMV no inverno em Recife com cobertura de laje preenchida com EPS



Fonte: Autoria própria (2021)

No caso do uso da laje com preenchimento de EPS para o inverno, os índices ficaram semelhantes, com uma diferença não superior a 10% para todos os casos. As configurações 1, 3 e 5 também obtiveram os melhores índices para todo o período, ao contrário da configuração padrão. Com a pintura da configuração padrão, o desempenho é similar aos blocos 1, 3 e 5.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo apresentaram-se os efeitos da configuração do envoltório no conforto térmico de um ambiente comercial. Duas cidades foram analisadas: Curitiba com um clima ameno e Recife com um clima quente. Diferentes configurações de blocos de concreto e laje foram analisadas. Os efeitos da absorvância solar da pintura também foram verificados.

A transmitância dos blocos pode trazer comportamento opostos do conforto térmico em relação ao período do dia. Nos períodos quentes, uma transmitância menor das paredes pode trazer melhores valores de conforto durante a noite, visto que o ambiente interno tenderia a perder mais calor para o ambiente externo. No entanto, como trata-se de uma edificação comercial, procurou-se analisar os efeitos principalmente durante o período diurno.

Os resultados mostraram que absorvância solar da pintura é tão importante quanto a transmitância do envoltório. Os melhores índices foram obtidos com configurações onde considerou-se o envoltório pintado com cores claras.

Para quase todas as situações, a configuração padrão brasileira para as paredes e cobertura apresentou piores índices. No entanto, a sua absorvância foi considerada de 0,55. Uma absorvância mais baixa devido à pintura claramente deixou os resultados da configuração padrão mais próximos aos valores dos demais envoltórios propostos, sendo então superado em desempenho apenas nos ambientes mais frios.

No geral, a configuração 3 apresentou na média os melhores índices para todos os casos e cidades. Entretanto, ressalta-se que esta configuração formada por isolante tem um alto custo em comparação as outras configurações. Por outro lado, a configuração com laje preenchida com EPS trouxe uma pequena melhora nos índices de conforto.

Para trabalhos futuros propõe-se a análise da utilização da ventilação natural nesta edificação, para a verificação dos índices de conforto térmico e desempenho do envoltório.

REFERÊNCIAS

- ABADIE, M.O. **DOMUS Testing with Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests from ANSI/ASHRAE Standard 140-2007**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, PR. 2008.
- ANTAR, M.A.; BAIG, H. Conjugate conduction-natural convection in a hollow building block. **Applied thermal engineering**, dez. 2009. v. 29, n. 17-18, p. 3716-3720.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6136**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.
- BOUCHAIR, A. Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. **Building and Environment**, 2008. v.43, n.10, p.1603–1618.
- CREMA, D.B.; PELISSER, F. **Cálculo do desempenho térmico de lajes pré-moldadas com tabelas cerâmicas e blocos de EPS**. 2014. Trabalho de conclusão de curso – Universidade do Extremo Sul Catarinense. Criciúma, SC, 2014.
- DIEDRICH, C.H. **Análise do comportamento térmico de coberturas em residências de interesse social**. 2018. Trabalho de conclusão de curso- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, PR, 2018.
- DUARTE, V. C. P. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis – Universidade Federal de Santa Catarina, 7ª edição. 2016. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ApostilaECV5161_v2016.pdf. Acesso em: 19 set. 2021.
- FANGER, P. O. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. McGraw-Hill, New York, USA., 1972.
- FIORETTI, R.;PRINCIPI, P. Thermal performance of hollow clay brick with low emissivity treatment in surface enclosures. **Coatings**, 2014. v.4, p.715–731.
- FOGIATTO, M. A.; SANTOS, G. H.; CATELAN, J. V. R. Numerical two-dimensional steady-state evaluation of the thermal transmittance reduction in hollow blocks. **Energies**, 2019. v. 12, n. 3.
- KRÜGER, E. L.; MORI, F. Análise da eficiência energética da envoltória de um projeto padrão de uma agência bancária em diferentes zonas bioclimáticas brasileiras. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre, jul./set. 2012. v. 12, n. 3, p. 89-106.
- LAMBERTS, R. **Conforto e stress térmico**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2011.

LI, L.P. *et al.* Numerical thermal optimization of the configuration of multi-holed clay bricks used for constructing building walls by the finite volume method. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2008. v.51, n.13–14, p.3669–3682.

MENDES, N; OLIVEIRA, C. R; SANTOS, G.H.; Energy Efficiency and Thermal Comfort Analysis Using the Powerdomus® Hygrothermal Simulation Tool. In: **9th IBPSA International Building Performance Simulation Association**, 2005, Montreal. Proceedings of the 9th International Building Performance Simulation Association (IBPSA), 2005. p. 755-762.

MOREIRA, D.; MARCO, G. **Vantagens e desvantagens da utilização de blocos de poliestireno expandido como enchimento para lajes pré-moldadas em relação a lajota cerâmica convencional.** 2019. Monografia. Universidade de Araraquara. Araraquara, SP, 2019.

SANTOS, G.H.; FOGIATTO, M. A.; MENDES, N. Numerical analysis of thermal transmittance of hollow concrete blocks. **Journal of Building Physics**, 2017. v. 41, n. 1, p. 7–24.

XAMÁN, J. *et al.* Thermal performance of a hollow block with/without insulating and reflective materials for roofing in Mexico. **Appl. Therm. Eng.**, 2017. v.123, p.243–255.

ZHANG, Y.; WANG, Q. Influence of hollow block's structural configuration on the thermal characteristics of hollow block wall. **Procedia Eng**, 2017. v.205, p.2341–2348.

ÇENGEL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, 4ª Edição, Editora McGrawHill, 2012.