

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE MECÂNICA
ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS EM
RESIDÊNCIAS DE INTERESSE SOCIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS EM
RESIDÊNCIAS DE INTERESSE SOCIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, departamento de Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos.

PONTA GROSSA

2018



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Mecânica
Bacharelado em Engenharia Mecânica



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COBERTURAS EM RESIDÊNCIAS DE INTERESSE SOCIAL

por

CARLOS HENRIQUE DIEDRICH

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 14 de Junho de 2018 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. Me. Tárik Linhares Tebchirani
Membro titular

Prof. Dr. Gilberto Zammar
Membro titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

– O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso –

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais: Carlos e Bady; que são minha força e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela força, auxílio e pela proteção.

A meus pais que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui, pelo amor, e constante incentivo durante todos os momentos.

Ao Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos, pela paciência, dedicação, respeito e ensinamentos a mim fornecidos durante os últimos anos.

A meus amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e que em pequenos gestos me ensinaram e ajudaram a compreender o verdadeiro valor da amizade.

A minha namorada pela paciência, compreensão e constante apoio e incentivo.

A todos os professores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná pelos ensinamentos.

A minha família e a todas as pessoas que contribuíram e/ou incentivaram a realização deste trabalho.

EPIGRAFE

*A ausência da evidência não significa
evidência da ausência.*
(Carl Sagan)

RESUMO

DIEDRICH, C.H. **Análise do comportamento térmico de coberturas em residências de interesse social**. 2018. 37. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico de coberturas em edificações de interesse social, como as do programa social "Minha Casa Minha Vida", apresentando assim, soluções de baixo custo para a melhora do conforto térmico do ambiente. Esta análise é feita em três etapas. Na primeira verifica-se o efeito do material do telhado (cerâmica e fibrocimento) na performance térmica do ambiente. Depois analisa-se o efeito do material do forro (policloreto de polivinila - PVC, gesso e madeira). Por último, mudança na cor do telhado e aplicação de isolante têm sido investigados. Para este estudo, a edificação foi simulada utilizando o programa DOMUS, que é um programa brasileiro de simulação termo-energética de edificações. Na seção de resultados, verificou-se a temperatura interna e o conforto térmico na edificação residencial através dos índices de PMV (*Predicted Mean Vote* – Voto Médio Estimado) para um período de 24 horas em dois períodos diferentes do ano (inverno e verão). Os resultados mostram que a variação do material do telhado ou forro não apresenta uma variação significativa no índice de conforto térmico, mas uma fina camada de isolante acrescentada no telhado ou uma simples mudança de cor (com absorção solar menor) pode apresentar diferenças relevantes nos índices de conforto e nos valores de temperatura interna do ambiente.

Palavras-chave: Telhados, Conforto Térmico, Simulação de Ambientes

ABSTRACT

DIEDRICH, C.H. **Thermal behavior analysis of the roofs in social interest buildings.** 2018. 37. Work Completion of Course (Graduate in Mechanical Engineering) - Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018.

This work has the objective of analyzing the thermal behavior of roofs in buildings of social interest, such as the social program "*Minha Casa Minha Vida*". Low cost solutions to improve the thermal comfort of the environment have been verified. This analysis is done in three stages. Firstly, the effect of the roof material (ceramics and fiber cement) on the thermal performance of the building is presented. Then, the effect of the ceiling material (polyvinyl chloride - PVC, plaster and wood) is analyzed. Finally, changes in the color of the roof and an application of insulation have been investigated. For this study, the building was simulated using the program DOMUS, which is a Brazilian program of thermo-energetic simulation of buildings. In the results section, the internal temperature and the thermal comfort of the building were verified through the Predicted Mean Vote (PMV) index for a period of 24 hours in two different periods of the year (winter and summer). The results show that the variation of the material of the roof or ceiling does not present a significant variation in the thermal comfort, but a thin layer of insulation added on the roof or a simple color change (with smaller solar absorption) can present relevant differences in the comfort indices and the internal temperature values of the environment.

Keywords: Roofs, Thermal Comfort, Building Simulation

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Evolução do consumo de energia elétrica em edificações e do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro. | 13 |
| Figura 2 - Modelo de simulação. | 21 |
| Figura 3 - Planta Baixa. | 22 |
| Figura 4 – Comparação entre as temperaturas internas, utilizando o telhado de cerâmica e de fibrocimento para o verão. | 26 |
| Figura 5 - Comparação entre as temperaturas do telhado de cerâmica e de fibrocimento para o inverno. | 27 |
| Figura 6 - Variação do índice de conforto para diferentes tipos de forros no verão. . | 28 |
| Figura 7 – Variação da temperatura para diferentes tipos de forros no verão. | 28 |
| Figura 8 – Variação da temperatura para diferentes tipos de forros no inverno. | 29 |
| Figura 9 - Influência das cores e do isolante nas temperaturas para o verão. | 30 |
| Figura 10 - Influência das cores e do isolante na temperatura para o inverno. | 30 |
| Figura 11 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico para o verão. | 31 |
| Figura 12 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico para o inverno. | 31 |
| Figura 13 - Comparação entre os índices de conforto para o telhado de cerâmica e de fibrocimento. | 33 |
| Figura 14 - Comparação entre as temperaturas internas para o telhado de cerâmica e de fibrocimento. | 33 |
| Figura 15 - Variação da temperatura para diferentes tipos de forro. | 34 |
| Figura 16 - Variação dos índices de conforto para diferentes tipos de forro. | 35 |
| Figura 17 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico. | 35 |
| Figura 18 - Influência das cores e do isolante nas temperaturas. | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Escala de índices de sensação térmica. | 19 |
| Tabela 2 - Combinações de características a serem simuladas. | 23 |
| Tabela 3 - Propriedades das cores para simulação. | 23 |
| Tabela 4 - Propriedades térmicas dos materiais. | 24 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|--------|--|
| ASHRAE | American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers |
| EPE | Empresa de Pesquisas Energéticas |
| ISO | International Organization for Standardization |
| PAC | Programa de Aceleração do Crescimento |
| PMV | Predicted Mean Vote |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PPD | Predicted Percentage of Dissatisfied |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------------|---|
| A | Área da transferência de calor |
| c_{ar} | Calor específico do ar (J/Kg.K) |
| C_{res} | Perda de calor sensível pela respiração, por convecção (W/m ²) |
| \dot{E}_g | Energia gerada internamente (W) |
| E_{sk} | Perda de calor latente pela pele, através da evaporação (W/m ²) |
| \dot{E}_t | Fluxo de energia que atravessa a sala (W) |
| f_f | Fator de forma (adimensional) |
| h | Coefficiente de transferência de calor por convecção (W/m ² .K) |
| h_c | Coefficiente de convecção entre ar e roupas (W/m ² .K) |
| K_{cl} | Condução de calor da pele até a superfície externa das roupas (W/m ²) |
| L | Carga térmica (W/m ²) |
| M | Taxa metabólica (W/m ²) |
| \dot{m}_{inf} | Fluxo de massa por infiltração (kg/s) |
| \dot{m}_{vent} | Fluxo de massa por ventilação (kg/s) |
| \dot{m}_b | Fluxo de vapor de água da respiração dos ocupantes (kg/s) |
| \dot{m}_{ger} | Taxa de geração de vapor interna (kg/s) |
| t_a | Temperatura do ar (°C) |
| t_{cl} | Temperatura superficial das roupas (°C) |
| T_{int} | Temperatura do ar ambiente (°C) |
| $T_n(t)$ | Temperatura da superfície interna do involucro (°C) |
| t_r | Temperatura radiante média (°C) |

| | |
|---------------|---|
| T_{sup} | Temperatura das superfícies internas das paredes (K) |
| λ | Condutividade térmica (W/m.K) |
| ε | Emissividade |
| σ | Constante de Stefan-Boltzmann (W/m ² .K ⁴) |
| V_{ar} | Volume do quarto (m ³) |
| W | Trabalho mecânico desenvolvido pelo corpo (W/m ²) |
| W_{ext} | Taxa de umidade externa (kg água/kg ar seco) |
| p_a | Pressão de vapor no ar (kPa) |
| ρ_{ar} | Densidade do ar (kg ar seco/s) |
| W_{int} | Taxa de umidade interna (kg água/kg ar seco) |

SUMÁRIO

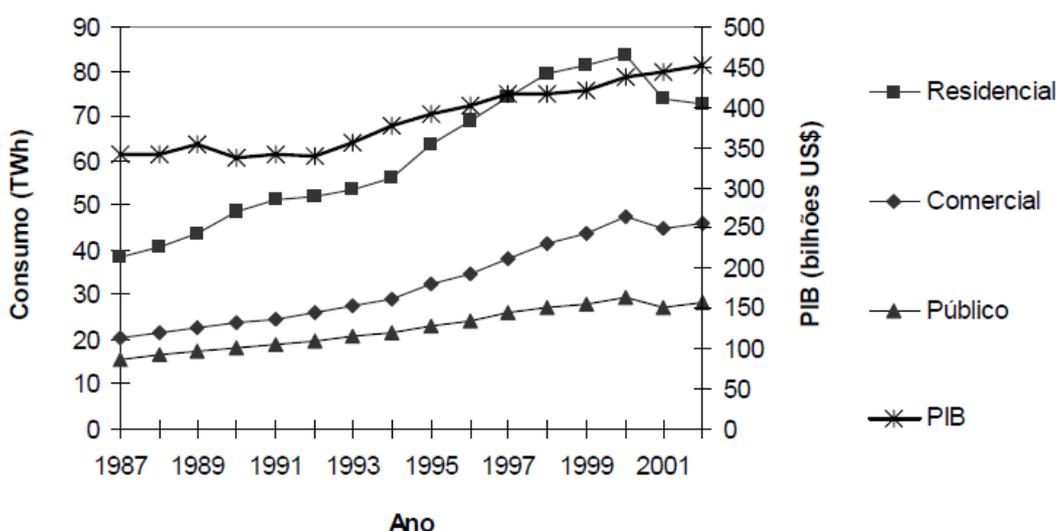
| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA | 15 |
| 1.2 OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.2.1 Objetivo Geral..... | 15 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos..... | 15 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 CARGA TÉRMICA..... | 16 |
| 2.2 MODELO MATEMÁTICO DE CARGA TÉRMICA..... | 16 |
| 2.3 CONFORTO TÉRMICO | 18 |
| 2.3.1 Modelo de conforto térmico | 18 |
| 3 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO..... | 21 |
| 3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO..... | 21 |
| 3.2 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO..... | 22 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 26 |
| 4.1 SIMULAÇÕES PARA A CIDADE DE CURITIBA | 26 |
| 4.2 SIMULAÇÕES PARA A CIDADE DE FORTALEZA..... | 32 |
| 5 CONCLUSÕES | 37 |
| REFERÊNCIAS..... | 38 |

1 INTRODUÇÃO

Devido à crise do petróleo ocorrida nos anos 70, surgiu a busca por novas formas de energia e pela economia de energia nos meios já existentes. Neste contexto, em razão do alto consumo de energia em sistemas de aquecimento e refrigeração, alguns países como os Estados Unidos, passaram a financiar iniciativas que promovessem edificações mais eficientes energeticamente, seja a partir da reforma (“*retrofit*”) ou ainda na fase de desenvolvimento do projeto.

No Brasil, o consumo de energia elétrica em edificações nos setores residencial, comercial e público correspondem em média a 45% da eletricidade consumida. A partir da Figura 1 é possível ver que a evolução do consumo de energia entre os anos de 1987 a 2002 acompanhou o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) neste período e segundo a EPE (empresa de pesquisas energéticas do governo) esses valores continuaram crescendo na mesma medida para os anos seguintes. Segundo Mendes et. al. (2005), esse comportamento demonstra um grande potencial de economia de energia a ser explorado com o uso mais eficiente da eletricidade em edificações.

Figura 1 - Evolução do consumo de energia elétrica em edificações e do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro.



Fonte: Ministério de Minas e Energia (MME).

Uma dificuldade encontrada em países em desenvolvimento é o de obter residências energeticamente eficientes associadas a um baixo custo construtivo,

devido ao grande déficit habitacional presente. Somente hoje no Brasil, existe a necessidade de 5,5 milhões de habitações de interesse social para suprir esta demanda.

Com este intuito, o governo brasileiro criou o Programa de Aceleração do Crescimento (PAC) em janeiro de 2007, que é um conjunto de políticas econômicas com prioridade de investimento em infraestrutura, englobando o programa habitacional "*Minha Casa, Minha Vida*" que prevê a construção de milhões de moradias. Deste modo, originou-se uma alta demanda de produção de habitações de construção rápida e de baixo custo, além do desenvolvimento de projetos padronizados para todo o país. Entretanto, neste tipo de projeto, o desempenho térmico das edificações praticamente não é levado em consideração.

Devido a utilização da mesma tipologia de projeto para as diferentes condições climáticas presentes no Brasil e de materiais que proporcionam baixos índices de isolamento, as habitações de interesse social têm sido caracterizadas pela baixa qualidade térmica em seu interior. Siqueira et al. (2005) colocam que o desempenho térmico de uma edificação é um fator de grande importância em habitações, principalmente quando destinadas a uma população com pouca condição de investimento em climatização. Neste caso, edificações projetadas levando-se em conta o clima local iriam potencializar o conforto térmico dos usuários bem como gerar economia de energia.

Deste modo, motivado pelo grande potencial de economia de energia e pelo grande número de habitações com baixa qualidade de conforto térmico, neste trabalho realizou-se um estudo a respeito do comportamento térmico dos diferentes materiais usados em coberturas de construções de interesse social. A avaliação do desempenho térmico destas edificações foi realizada através de simulações computacionais, seguindo os requisitos segundo a ABNT (2008).

O software utilizado para as simulações foi o Domus, desenvolvido no Laboratório de Sistemas Térmicos (LST) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). Ele permite simular múltiplos ambientes por meio da modelagem da transferência de calor combinada com a umidade de elementos porosos quando sujeitos a qualquer condição climática. Através de relatórios, é possível solicitar estatísticas de forma gráfica mensal e anual para cada zona de conforto térmico, bem como dados de temperatura interna, umidade relativa e índices de conforto *PMV* e *PPD*.

1.1 JUSTIFICATIVA

As soluções apresentadas hoje no Brasil, visando a diminuição do déficit habitacional, são voltadas exclusivamente para resolver os problemas quantitativos destas moradias. Deste modo, a redução dos custos construtivos torna-se mais importante do que a eficiência energética e o conforto térmico obtidos nestes ambientes. Mesmo para outros tipos de edificações, Xavier (2008) cita que muitas foram projetadas e construídas sem que fossem consideradas as características ambientais e climáticas locais. Deste modo, ocorre a necessidade de um consumo de energia excessivo devido aos sistemas de climatização, para alcançar as condições de conforto térmico.

Diante disto, cresceu nos últimos anos a importância e o enfoque a temas relacionados à melhoria do conforto térmico oferecido pelas residências, e a soluções simples e eficazes para as que não foram projetadas com este propósito.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o comportamento térmico de coberturas em edificações de interesse social (padrão), apresentando uma solução de baixo custo para melhora do conforto térmico em seu interior.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Comparar os diferentes materiais utilizados para o telhado (cerâmica ou fibrocimento) e forro (PVC, gesso e madeira), a fim de obter um melhor índice de conforto térmico;
- Analisar a influência da mudança de cor do telhado e o uso de isolantes térmicos para a melhora destes índices;
- Determinar qual a melhor configuração do telhado, para as residências de interesse social.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos utilizados para a realização deste trabalho.

2.1 CARGA TÉRMICA

Para analisar o desempenho e o conforto térmico de uma edificação é de fundamental importância obter a carga térmica que é transmitida pelo seu envoltório. Deste modo, a carga térmica é definida como a quantidade de calor (latente e sensível) retirada ou fornecida ao ar de um ambiente para manter condições desejáveis de temperatura e pressão.

Uma série de fatores pode influenciar a carga térmica de um ambiente como: condições climáticas, iluminação artificial, infiltrações, equipamentos eletrônicos, renovação do ar ambiente, quantidade de ocupantes, fechamentos opacos e transparentes, entre outros.

2.2 MODELO MATEMÁTICO DE CARGA TÉRMICA

Proposto por Mendes et. al. (2001), para o cálculo da carga térmica em uma edificação, o modelo matemático utilizado pelo programa Domus descreve um balanço de energia em um ambiente submetido a cargas de condução, convecção e radiação solar:

$$\dot{E}_t + \dot{E}_g = \rho_{ar} c_{ar} V_{ar} \frac{dT_{int}}{dt} \quad (1)$$

onde \dot{E}_t representa o fluxo de energia que atravessa o envoltório da edificação (W), \dot{E}_g , a energia gerada internamente (W), ρ_{ar} , a densidade do ar (Kg/m³), c_{ar} , o calor específico do ar (J/Kg.K), V_{ar} , o volume do ambiente (m³) e T_{int} , a temperatura do ar do ambiente interno (°C).

O fluxo de calor $Q(t)$ que atravessa o envoltório da edificação pode ser calculado pela lei de Newton do resfriamento como:

$$Q(t) = hA[T_n(t) - T_{int}(t)] \quad (2)$$

sendo h , o coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m²K), A , a área de transferência de calor (m²) e $T_n(t)$, a temperatura da superfície interna do envoltório.

Para o lado externo do envoltório, neste modelo propõem-se que as paredes, o teto, as portas e as janelas estão expostas a radiação solar e a convecção. Com isso a condição (X=0) da Eq.3 pode ser expressa como:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r \quad (3)$$

onde $h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0})$ representa a transferência de calor por convecção (W/m²), αq_r , a radiação solar absorvida (W/m²) e λ , a condutividade térmica (W/m K).

Para x=L (superfície interna), a troca de calor por radiação de ondas longas entre a superfície é considerada como:

$$\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=L} = h_{int}(T_{int} - T_{x=L}) + \sum \sigma f_f \varepsilon \theta (T_{sup}^4 - T_{x=L}^4) \quad (4)$$

onde f_f é o fator de forma, ε , a emissividade, σ , a constante de Stefan-Boltzmann (5.67*10⁻⁸ W/m² K⁴) e T_{sup} , a temperatura das outras superfícies internas (K).

Para o piso, Mendes et. al. (2001) adotaram uma temperatura imposta como condição de contorno, igualando $T_{x=0}$ a temperatura do solo a uma profundidade de 2m. Por outro lado, para o teto foram consideradas perdas de radiação por ondas longas (R_{lw}) de modo que a Equação (4) assumiu a seguinte forma:

$$-\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial t}\right)_{x=0} = h_{ext}(T_{ext} - T_{x=0}) + \alpha q_r - (\varepsilon)_{teto} R_{lw} \quad (5)$$

onde o termo $(\varepsilon)_{teto}$ representa a emissividade de onda longa do teto.

Neste modelo, para o balanço de vapor de água, consideraram-se a ventilação, infiltração e a geração interna, de equipamentos e pessoas como:

$$(\dot{m}_{inf} + \dot{m}_{vent})(W_{ext} - W_{int}) + \dot{m}_b + \dot{m}_{ger} = \rho_{ar} V_{ar} \frac{dT_{int}}{dt} \quad (6)$$

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).

2.3 CONFORTO TÉRMICO

Importante para o ser humano, o conforto térmico também está relacionado a várias outras áreas. Para Nicol (1993), o estudo do conforto térmico pode proporcionar um ambiente satisfatório para as pessoas, trazer a melhora do ar interno e aumentar a eficiência energética das edificações.

Para entender melhor este contexto é necessário conhecer a definição de conforto térmico e neutralidade térmica. Conforto térmico é definido pela ASHRAE Standart 55 como “A condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico”, e neutralidade térmica segundo Fanger (1970), é “A condição na qual uma pessoa não prefira nem calor nem frio no ambiente ao seu redor”.

Para Xavier (2000), a neutralidade térmica é o balanço entre o ambiente e o homem e embora necessária, não é suficiente para a verificação do conforto térmico. Tanabe (1988) define neutralidade térmica como sendo “o estado da mente que expressa satisfação com a temperatura do corpo como um todo”.

Segundo Fanger (1970), é possível chegar ao conforto térmico com diferentes combinações de variáveis pessoais e ambientais. Isto pode ocorrer através do uso de diferentes sistemas técnicos, onde o conforto térmico é criado para que o desejo das pessoas em se sentir confortável termicamente seja satisfeito.

2.3.1 Modelo de conforto térmico

Proposto por Fanger (1970), o *PMV* (*Predicted Mean Vote* – Voto Médio Estimado) é um dos índices mais usado para avaliar a sensação térmica. Ele mostra a média da sensação térmica de um grupo de pessoas expostas ao mesmo ambiente.

Este índice pode variar de -3 a +3, onde cada ponto representa a sensação da pessoa relacionada ao ambiente em que é encontrada. A escala de valores pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1- Escala de índices de sensação térmica.

| | |
|----|--------------|
| +3 | Muito quente |
| +2 | Quente |
| +1 | Aquecido |
| 0 | Neutro |
| -1 | Resfriado |
| -2 | Frio |
| -3 | Muito Frio |

Fonte: Fanger (1970).

No modelo desenvolvido por Fanger (1970) considera-se que o corpo em um ambiente está em equilíbrio, desde modo não ocorrendo acúmulo de calor em seu interior.

A equação do balanço de energia entre o corpo e o ambiente, considerando mecanismos de perda de calor por convecção, radiação e evaporação, pode ser escrita como:

$$(M - W) - C_{res} - E_{sk} - E_{res} = K_{cl} = C + R \quad (8)$$

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

As perdas parciais de calor pela pele através da respiração e por condução, são expressas por equações empíricas que quando substituídas na equação do balanço térmico em função das variáveis ambientais e pessoais, resultam na seguinte equação:

$$\begin{aligned}
(M - W) - 3,05[5,73 - 0,007(M - W) - p_a] - 0,42[(M - W) - 58,15] \\
- 0,0173M(5,87 - p_a) - 0,0014M(34 - t_a) \\
= \frac{[35,7 - 0,028(M - W)] - t_{cl}}{0,155 \cdot I_{cl}} \\
= 3,9 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
\end{aligned} \tag{9}$$

onde p_a representa a pressão de vapor no ar (kPa), t_a , temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), t_{cl} , temperatura superficial das roupas ($^{\circ}\text{C}$), I_{cl} , isolamento térmico das roupas (Clo), f_{cl} , razão de área do corpo vestido e corpo nu (adimensional), t_r , temperatura radiante média ($^{\circ}\text{C}$), h_c , coeficiente de convecção entre ar e roupas ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

Da Equação 9, todos os termos são estimados por tabelas de variáveis pessoais ou de medições das variáveis ambientais, exceto a temperatura superficial externa das roupas, que precisa ser calculada iterativamente ao comparar o lado central ao lado direito da equação.

Fanger (1970), também definiu a Carga térmica (L) que atua sobre o corpo, como a diferença entre o calor gerado pelo corpo e o trocado com o meio ambiente:

$$\begin{aligned}
L = M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) \\
- 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] \\
- f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
\end{aligned} \tag{10}$$

Para ambientes que não são termicamente neutros (carga térmica diferente de 0), Fanger (1970), estende sua equação, a qual é conhecida como equação do PMV e considera o equilíbrio de calor entre o ambiente e o corpo:

$$PMV = [0.0303 \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028] \cdot L \tag{11}$$

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

Através do PMV é possível obter a porcentagem de pessoas insatisfeitas, o PPD (*Predicted Percentage of Dissatisfied*). Segundo Fanger (1970), a equação que determina o número de pessoas insatisfeitas termicamente no ambiente é dada por:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2) \tag{12}$$

3 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

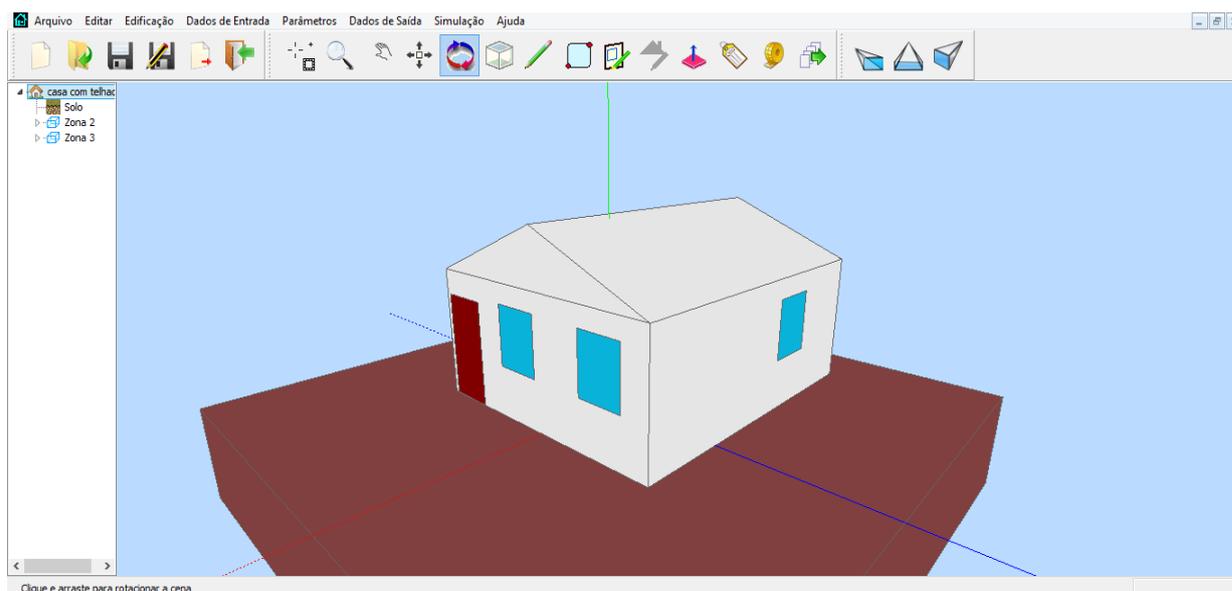
A partir do modelo proposto para a análise, diferentes configurações de materiais para a cobertura das residências de interesse social foram simuladas. Neste capítulo são descritas todas as etapas de simulação do trabalho.

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO

Para o desenvolvimento deste trabalho, criou-se no Domus um modelo representando uma habitação típica de interesse social, com sistemas construtivos comumente utilizados. As seguintes dimensões e materiais foram considerados: área total de 39.2 m² (5.6 m x 7 m), parede de blocos de concreto (14 cm) intercalado com uma camada de reboco (2 cm). Para o telhado, utilizaram-se telhas de fibrocimento ou cerâmica e para o forro, gesso, PVC e madeira foram adotados, com ático não ventilado. Para o clima utilizou-se a zona bioclimática 1, para cidade de Curitiba (devido a sua proximidade e semelhança climática com Ponta Grossa), e zona bioclimática 8 para cidade de Fortaleza.

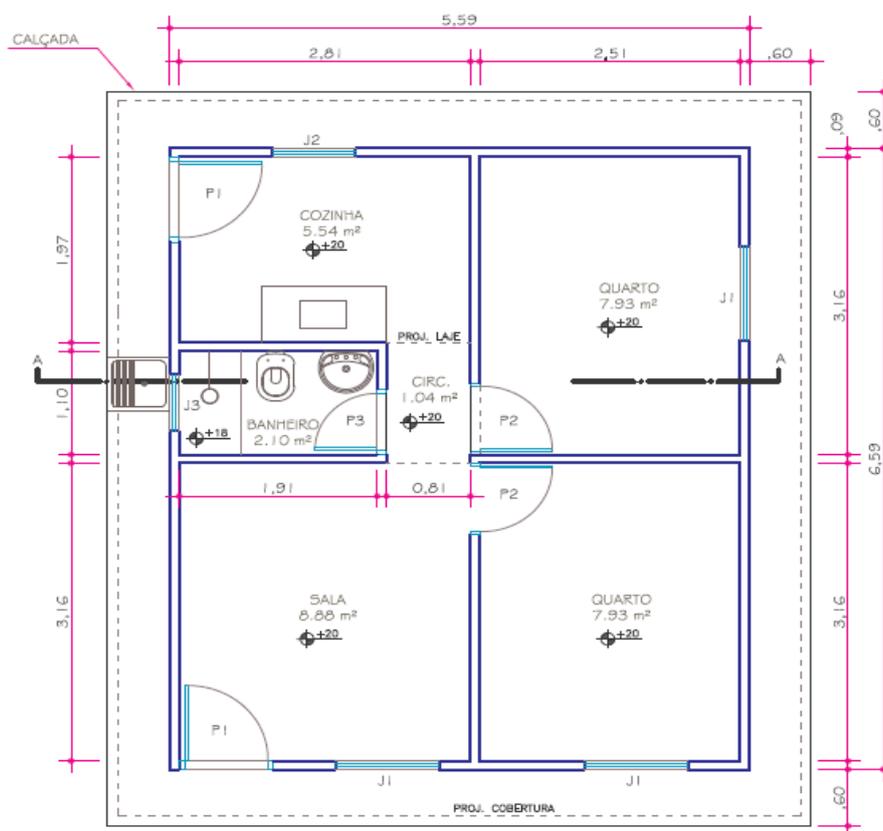
A Figura 2 mostra o modelo 3D gerado no Domus e a Figura 3, as dimensões da planta da habitação analisada.

Figura 2 - Modelo de simulação.



Fonte: Domus (2017).

Figura 3 - Planta Baixa.



Fonte: ABENC-BA (2006).

3.2 PARÂMETROS DA SIMULAÇÃO

As simulações foram feitas para as cidades de Curitiba e Fortaleza. Para cada cidade foram combinadas cinco diferentes configurações de materiais para forro e telhado. Deste modo, efetuaram-se simulações computacionais através do software DOMUS, com o objetivo de estabelecer índices de conforto térmico e temperatura interna para a habitação. As combinações utilizadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Combinações de características a serem simuladas.

| <i>Telhado</i> | <i>Forro</i> |
|----------------|--------------|
| Fibrocimento | Madeira |
| Fibrocimento | Gesso |
| Fibrocimento | Sem forro |
| Fibrocimento | PVC |
| Cerâmica | PVC |

Fonte: Autoria Própria (2017).

Nas comparações, adotou-se o telhado de fibrocimento e forro de PVC (policloreto de vinila) como padrões, devido a sua utilização em larga escala. Através dos modelos apresentados na Tabela 2, comparou-se o efeito das cores do telhado nos índices de conforto.

Segundo Siqueira et.al. (2012), a cor branca apresenta grande redução na temperatura superficial dos telhados, quando comparado aos telhados em sua cor natural ou sujos devido à ação do tempo. Neste trabalho, os autores obtiveram uma absorvância solar para o telhado sujo de 84.4%, para a cor branca de 10.7% e para a cor original, de 59.3 % nas amostras. Desta forma, adotaram-se para as simulações neste trabalho, os seguintes valores de absorvância (solar) e emissividade (300 K) nos telhados:

Tabela 3 - Propriedades das cores para simulação.

| <i>Cor do telhado</i> | <i>Absortividade Solar</i> | <i>Emissividade (300 K)</i> |
|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|
| Cor branca | 0,14 | 0,93 |
| Cor original | 0,60 | 0,90 |
| Cor escura (sujo) | 0,85 | 0,90 |

Fonte: Silveira et. al. (2012).

Realizou-se também uma verificação do efeito do acréscimo de um isolante (manta térmica aluminizada dupla face) na configuração padrão do telhado, juntamente com a utilização da cor branca.

Na Tabela 3 são apresentadas as espessuras comerciais dos materiais e suas respectivas propriedades térmicas utilizadas para as simulações:

Tabela 4 - Propriedades térmicas dos materiais.

| | <i>Absortividade Solar</i> | <i>Emissividade (300 K)</i> | <i>Transmitância Térmica (W/m² K)</i> | <i>Capacitância Térmica (KJ/ m² K)</i> |
|---|----------------------------|-----------------------------|--|---|
| Telha de Cerâmica (1cm) | 0,73 | 0,90 | 6,69 | 18,40 |
| Telha de Fibrocimento (0,5cm) | 0,60 | 0,90 | 6,88 | 7,98 |
| Madeira (0,6 cm) | 0,50 | 0,90 | 5,47 | 8,28 |
| PVC (0,5 cm) | 0,40 | 0,90 | 5,84 | 6,92 |
| Gesso (0,95 cm) | 0,40 | 0,90 | 6,03 | 5,67 |
| Bloco de Concreto (14 cm) | 0,50 | 0,50 | 1,82 | 194,70 |
| Manta Térmica Aluminizada Dupla Face (0,125 mm) | 0,52 | 0,25 | 7,14 | 2,38 |

Fonte: Domus (2017) e ÇENGEL, Y.A (2012).

Para a avaliação do conforto térmico foi utilizado para Fortaleza um índice de isolamento da roupa de 0,4 clo (cueca, camiseta, calça fina e sapato), e para

Curitiba um índice de 0,646 *clo* (meia fina, cueca, camisa curta, calça media, sapato), e para ambos, a atividade considerada foi de 1 *met* (posição relaxado sentado).

A temperatura utilizada nos gráficos representa o valor global para determinada zona selecionada. Neste caso a zona selecionada é a área abaixo do forro.

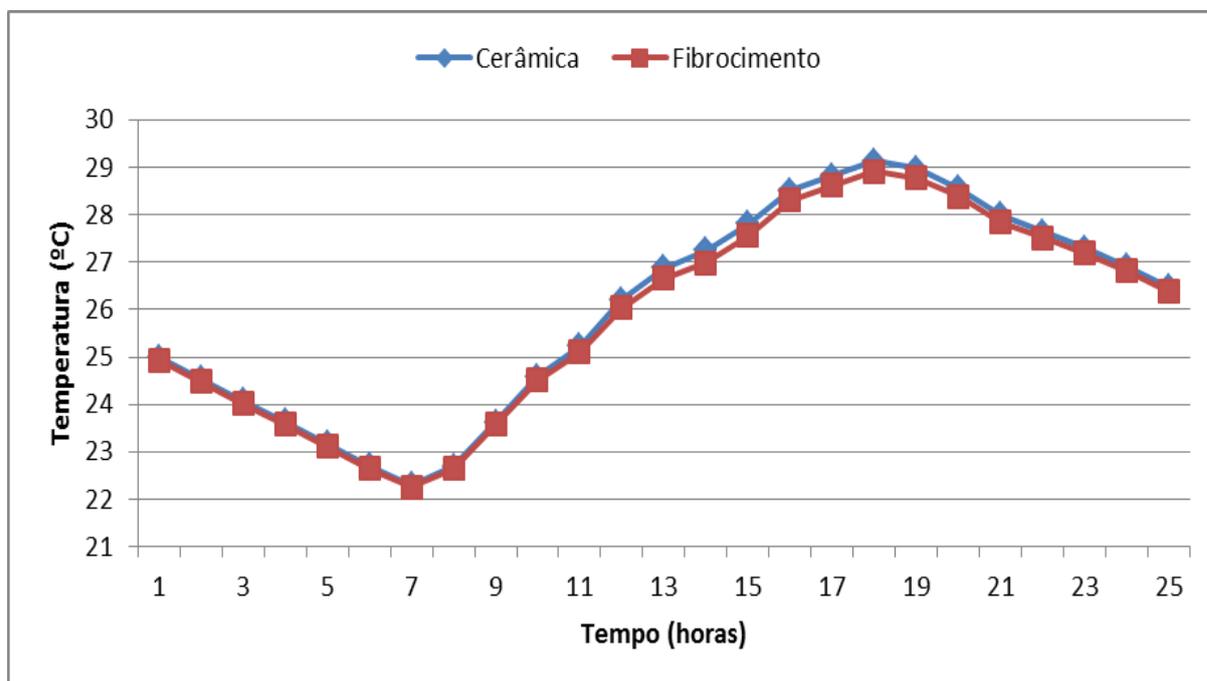
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as simulações computacionais, para análise do comportamento térmico de habitações de interesse social.

4.1 SIMULAÇÕES PARA A CIDADE DE CURITIBA

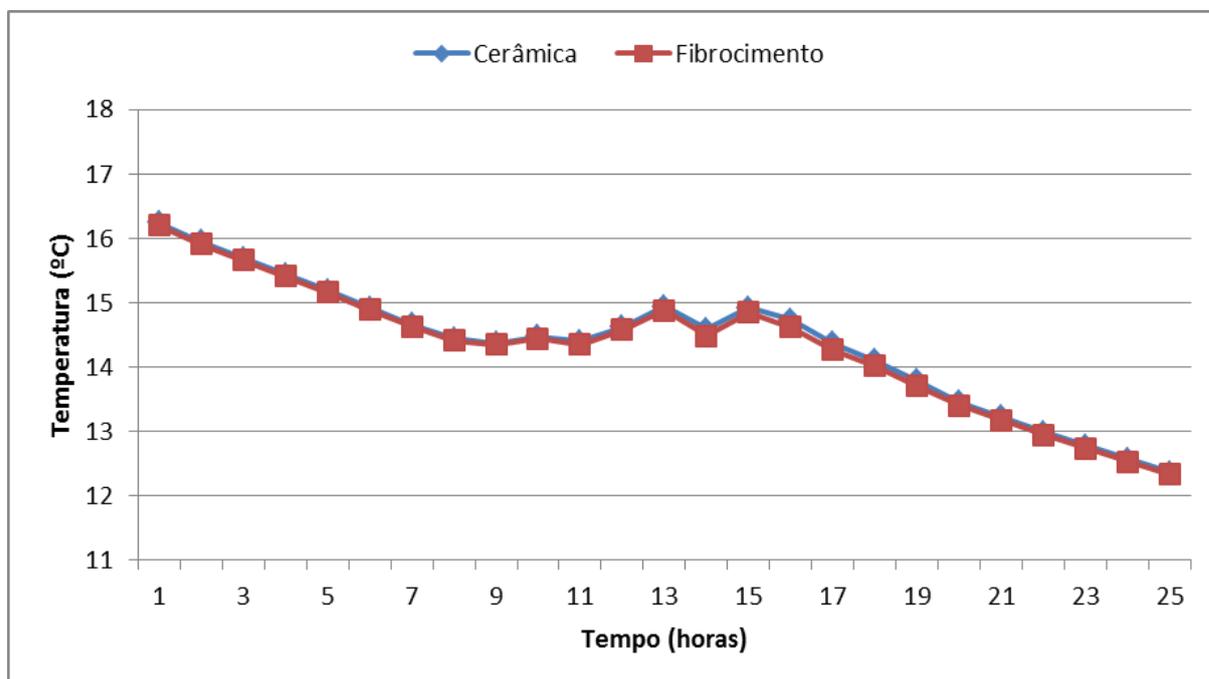
Primeiramente comparou-se a performance do telhado de cerâmica com o de fibrocimento (forro de PVC) para o dia três de janeiro, representando o verão, e para o dia três de junho, representando o inverno. As Figuras 4 e 5 apresentam as variações dos índices de conforto térmico e da temperatura para os telhados.

Figura 4 – Comparação entre as temperaturas internas, utilizando o telhado de cerâmica e de fibrocimento para o verão.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 5 - Comparação entre as temperaturas do telhado de cerâmica e de fibrocimento para o inverno.



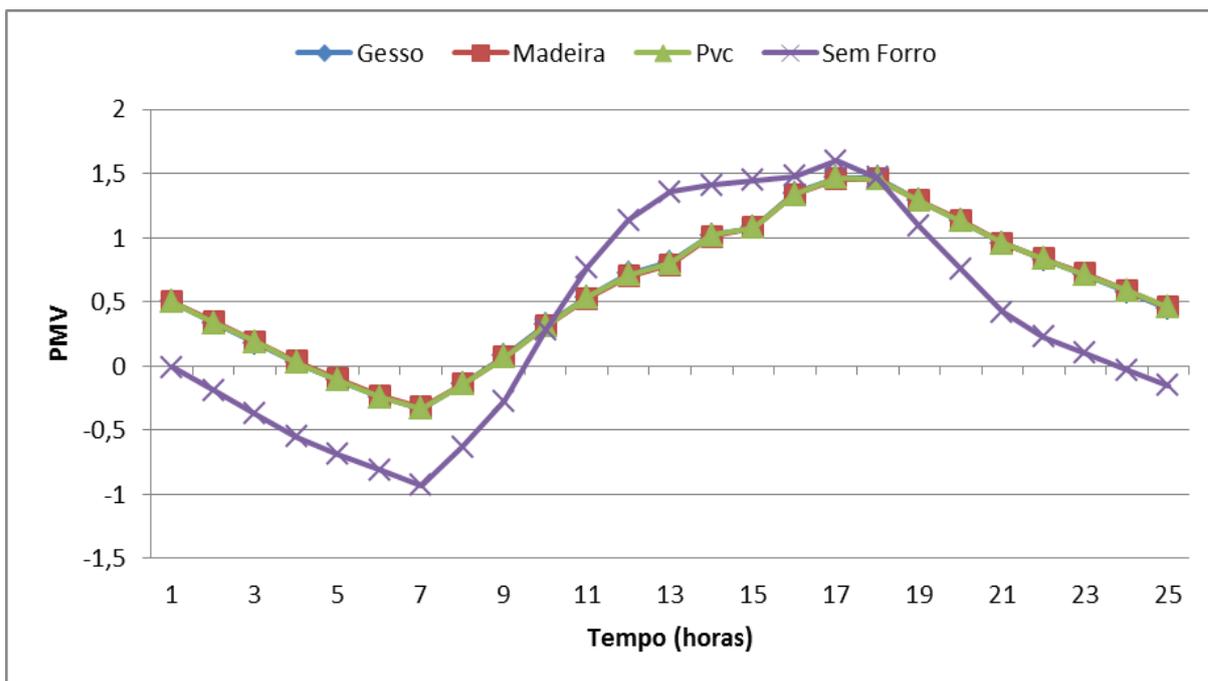
Fonte: Autoria Própria (2017).

Observou-se através da Figura 4, que a máxima diferença entre as temperaturas dos telhados foi de 2,4% no intervalo das 13 h às 16 h. Pela Figura 5 verificou-se uma diferença desprezível entre os valores para o inverno. Os mesmo resultados foram obtidos para os índices de conforto neste mesmo período. Deste modo, os resultados mostram que a simples troca do material do telhado, não alterou os índices de conforto do ambiente. Este fato pode ser atribuído à transmitância térmica semelhante entre os materiais, mesmo que o telhado de cerâmica tenha apresentando uma absorvidade solar maior do que o fibrocimento.

Os resultados apresentados a partir da Figura 6 foram simulados considerando o telhado de fibrocimento como padrão.

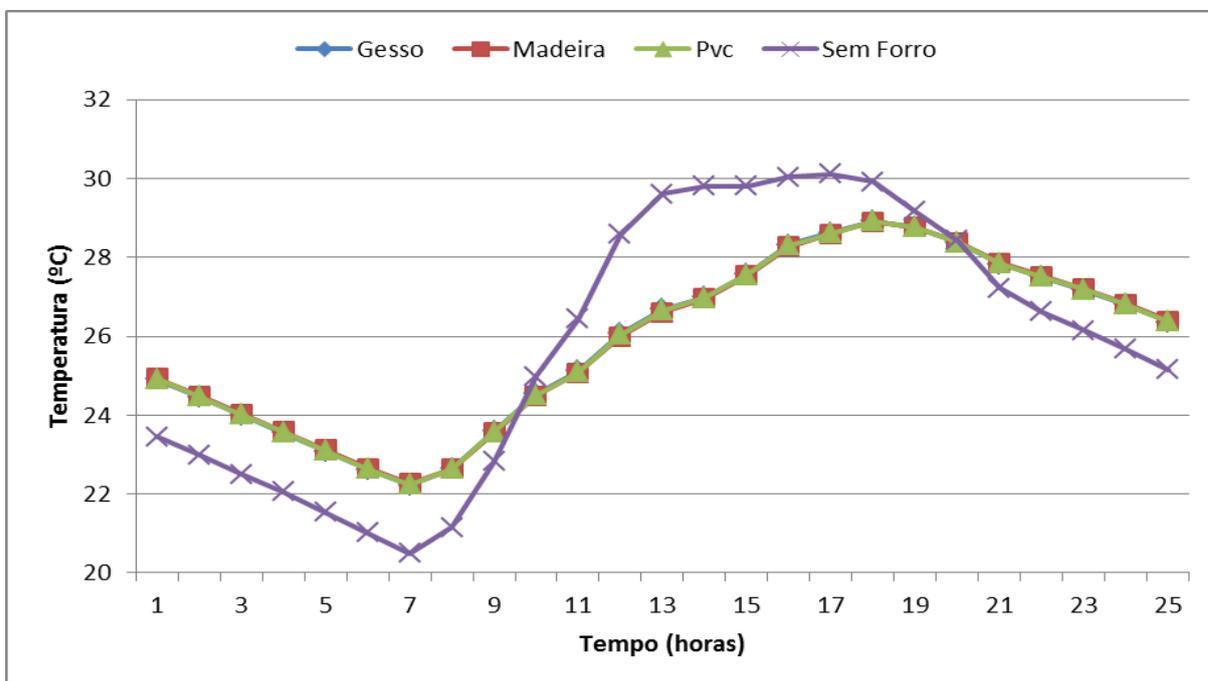
As Figuras 6, 7 e 8, apresentam as variações dos índices de conforto térmico e da temperatura para diferentes tipos de forro.

Figura 6 - Variação do índice de conforto para diferentes tipos de forros no verão.



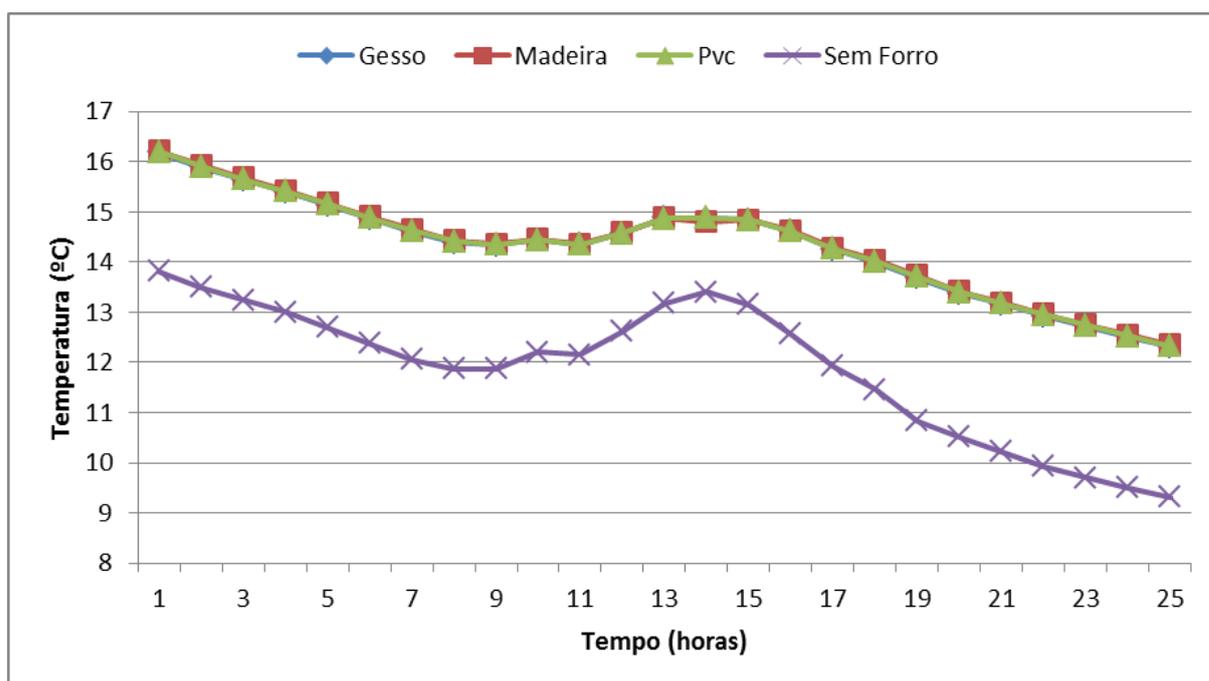
Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 7 – Variação da temperatura para diferentes tipos de forros no verão.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 8 – Variação da temperatura para diferentes tipos de forros no inverno.

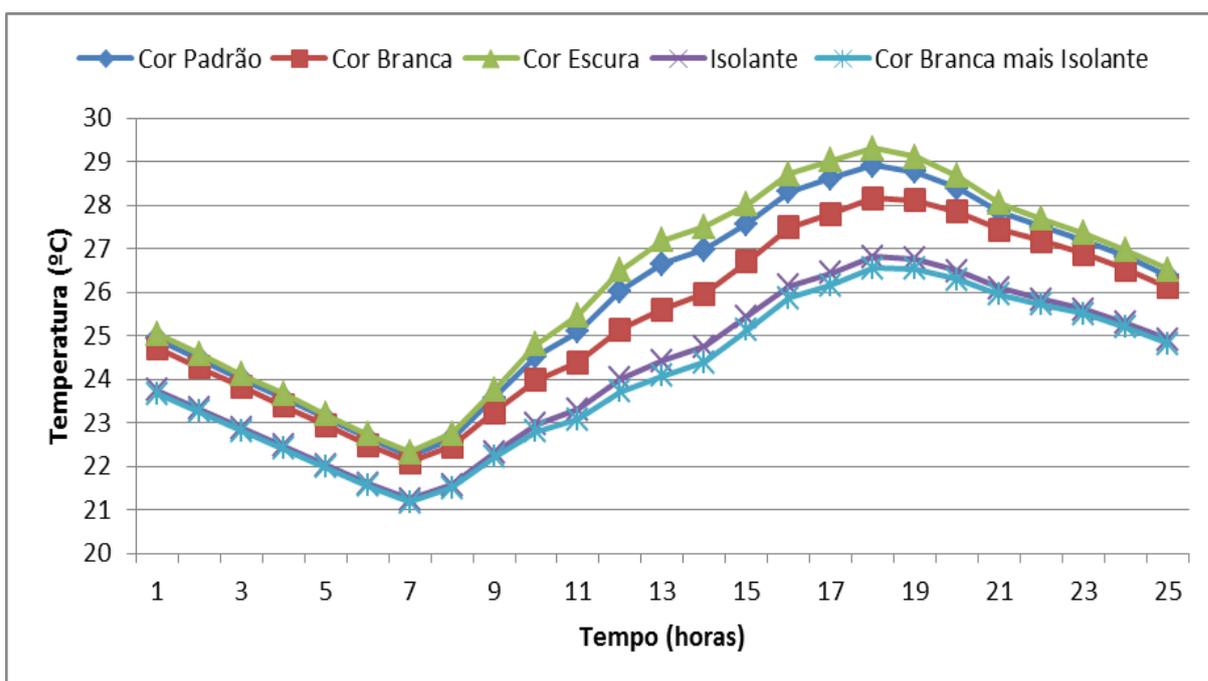


Fonte: Autoria Própria (2017).

Observaram-se para o verão (Figura 6), índices de conforto iguais entre os forros. Para este caso, as temperaturas internas (Figura 7) também apresentam os mesmos resultados. No entanto, diferenças significativas entre os valores foram observadas, quando se comparam as configurações com forro e sem forro. Variação de até 36% para os índices de conforto e de 10,4% para a temperatura no verão foram verificadas. Para o inverno (Figura 8), a variação de temperatura interna foi de aproximadamente 15,3% e de aproximadamente 35% para os índices de conforto.

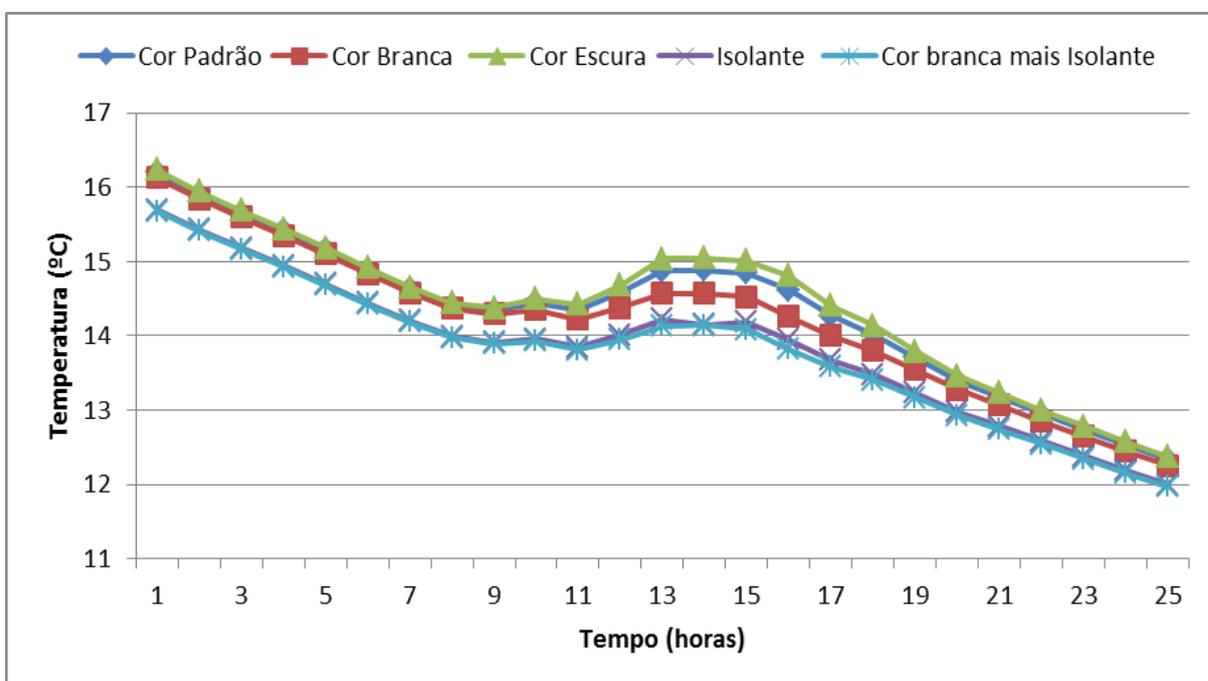
Na sequência, verificou-se a influência da cor do telhado nas temperaturas internas (Figuras 9 e 10), e nos índices de conforto térmico (Figuras 11 e 12). Nesta análise utilizaram-se telhados com cor branca, outro com a cor padrão do fibrocimento e um com cor escura, representando o envelhecimento natural e a sujeira acumulada durante o período de utilização.

Figura 9 - Influência das cores e do isolante nas temperaturas para o verão.



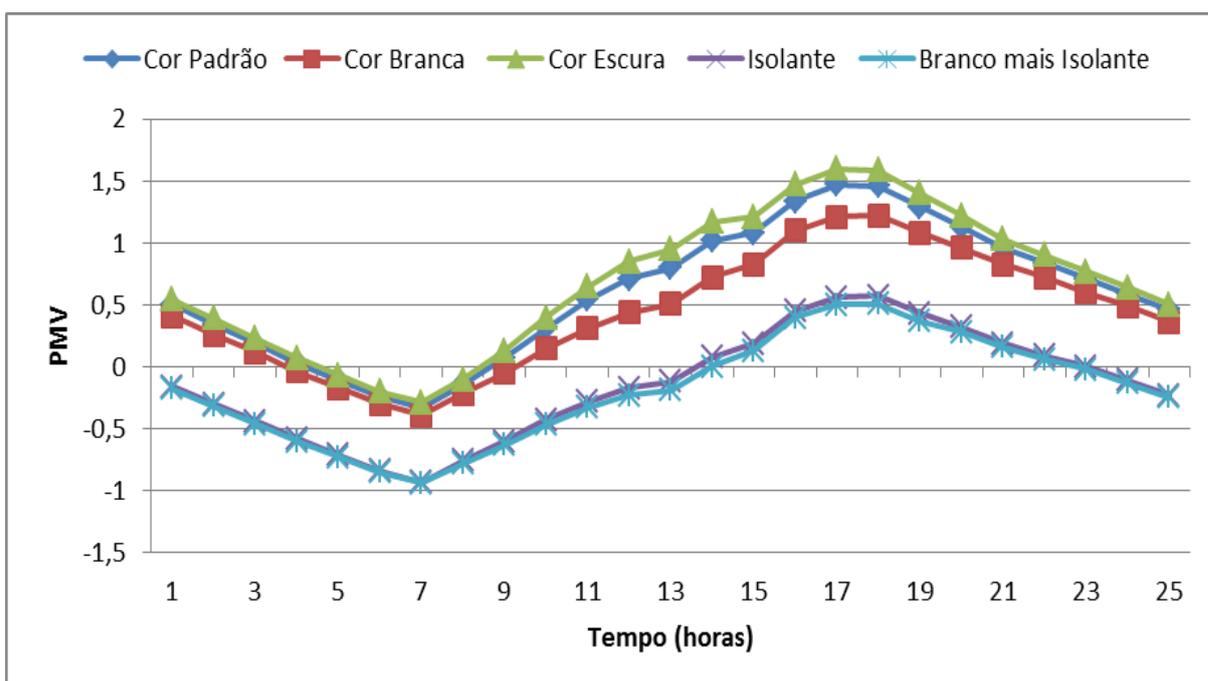
Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 10 - Influência das cores e do isolante na temperatura para o inverno.



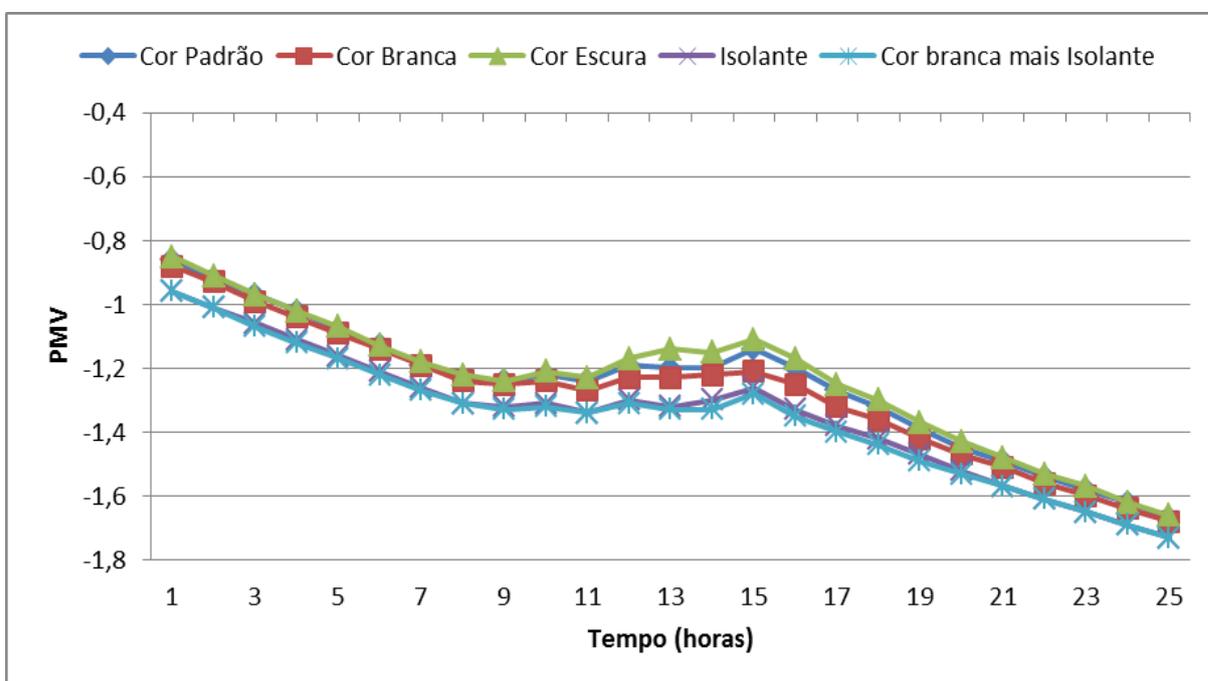
Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 11 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico para o verão.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 12 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico para o inverno.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Através das Figuras 9 e 10 observaram-se significativas variações na temperatura interna da residência. Os resultados mais expressivos foram

apresentados pelo isolante, que reduziu em até 2,8 °C a temperatura interna para o verão e a cor branca que reduziu em aproximadamente 1,2 °C a temperatura interna. Para o inverno, observou-se através da Figura 10 que o acréscimo da camada de isolante reduziu a temperatura em aproximadamente 0,7 °C e a cor branca em até 0,4 °C quando comparados à configuração padrão.

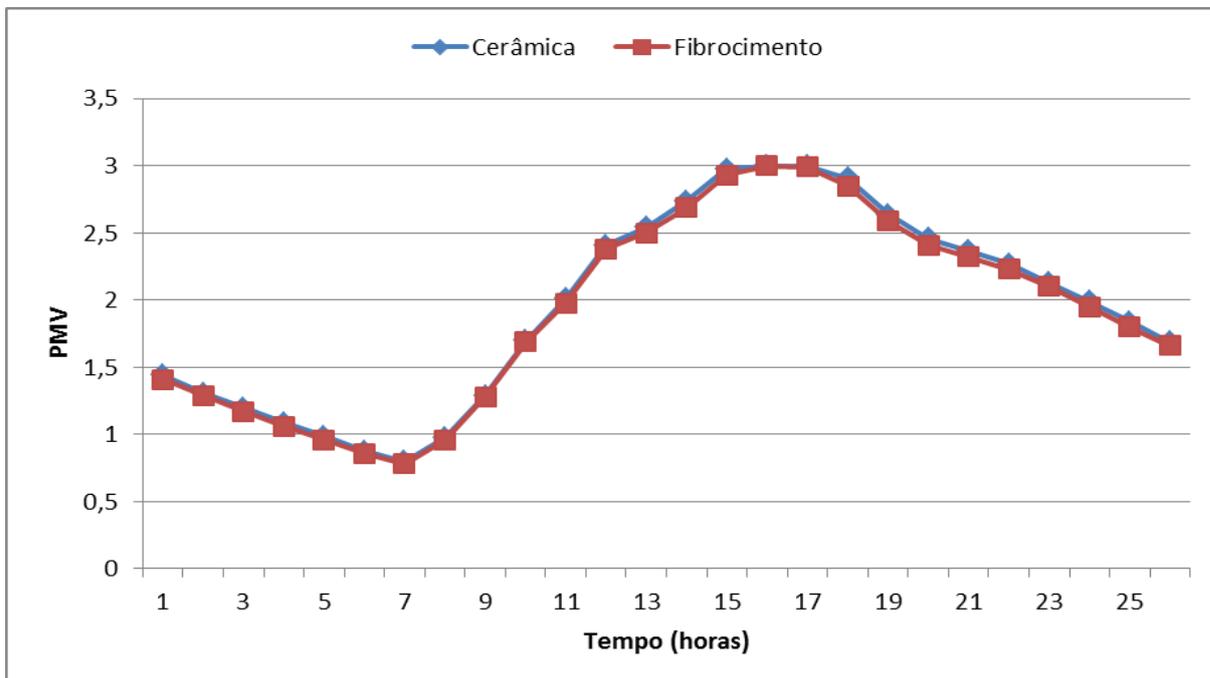
Através das Figuras 11 e 12, verificou-se que a mudança de cor influenciou nos índices de conforto, onde a cor branca melhorou em 24% o índice, quando comparada com a cor escura para o verão, e para o inverno, a cor escura elevou o índice em 3.5%. Através da Figura 11, observou-se também que para o verão, o acréscimo da camada de isolante no telhado reduziu o *PMV* em aproximadamente 34% quando comparado à configuração padrão. No caso do escurecimento natural do telhado com o tempo, este apresentou um pequeno efeito na temperatura e no índice de conforto, quando comparado com a cor padrão.

4.2 SIMULAÇÕES PARA A CIDADE DE FORTALEZA

Para Fortaleza, seguiu-se a mesma ordem das simulações e comparações. No entanto, serão apresentados resultados somente para o período de verão, pois as temperaturas são elevadas em todo o ano, não havendo índices negativos.

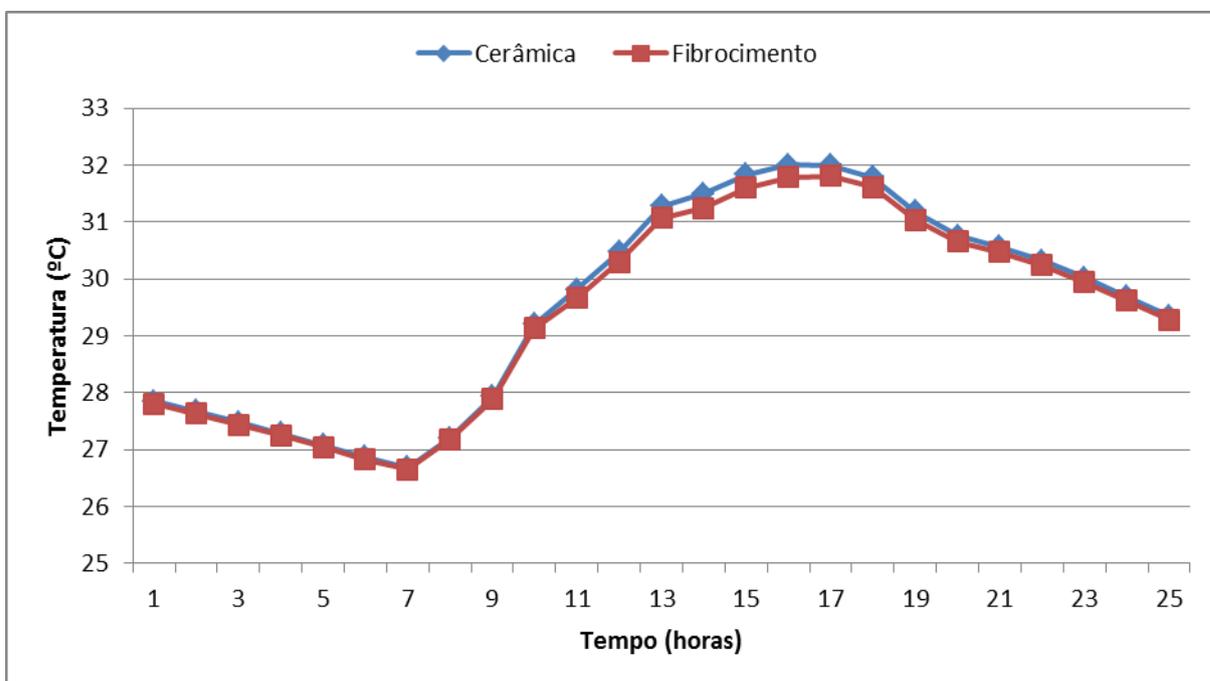
Primeiramente, comparou-se o telhado de cerâmica com o telhado de fibrocimento. A seguir são apresentadas as variações dos índices de conforto térmico e das temperaturas para os telhados.

Figura 13 - Comparação entre os índices de conforto para o telhado de cerâmica e de fibrocimento.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 14 - Comparação entre as temperaturas internas para o telhado de cerâmica e de fibrocimento.



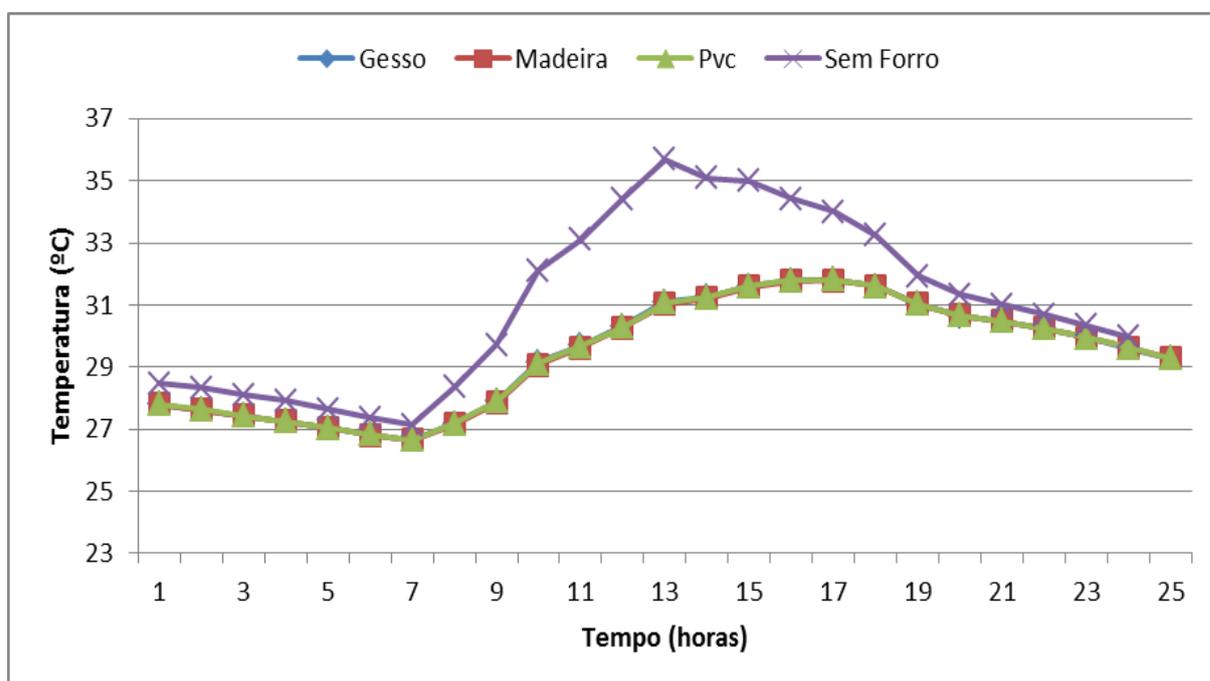
Fonte: Autoria Própria (2017).

Observou-se através da Figura 13 e 14, o mesmo comportamento em relação à temperatura interna e índice de conforto (diferenças não significativas), apresentado para a cidade de Curitiba.

Semelhantes aos resultados apresentados para a cidade de Curitiba, nas Figuras 15-18, adotou-se como padrão para as simulações, o telhado de fibrocimento.

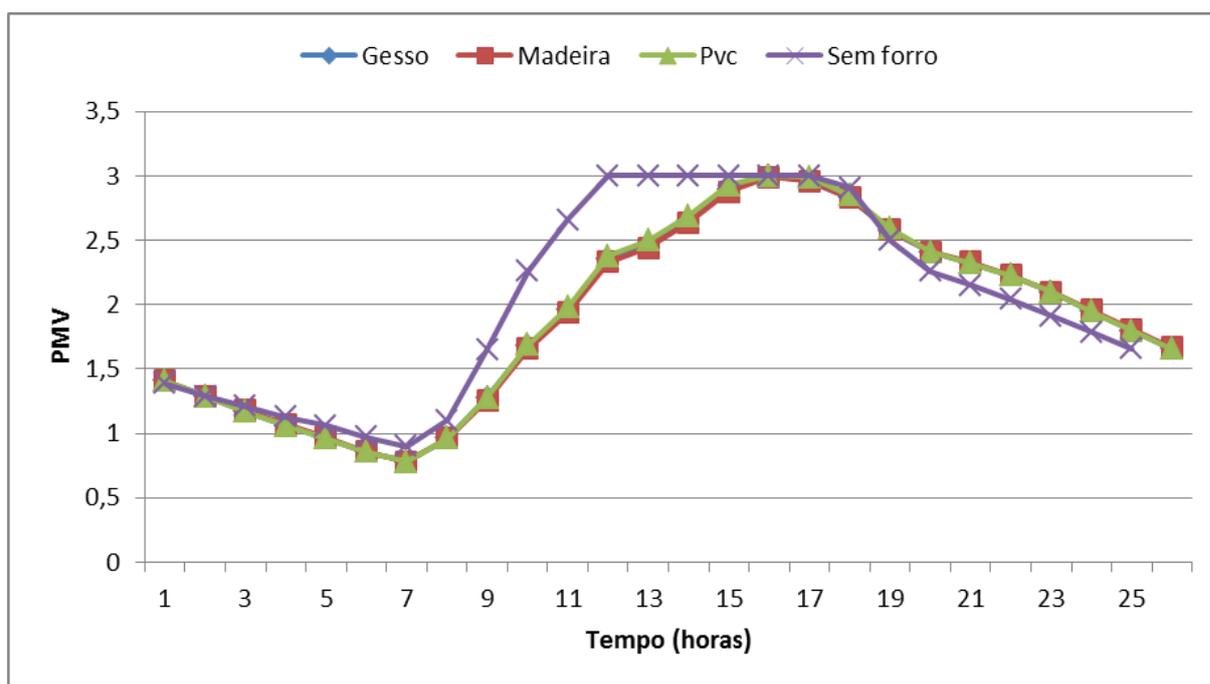
As Figuras 15 e 16 apresentam as variações da temperatura e dos índices de conforto térmico, pelo tempo em horas, para os diferentes tipos de forro. Como pode-se verificar, praticamente não ocorreram diferenças significativas entre os resultados, tanto para a temperatura quanto para o *PMV*. Entretanto, para as configurações com e sem forro, os índices de conforto e as temperaturas tiveram diferenças de até 16%, mostrando assim, a sua importância para o comportamento térmico das residências.

Figura 15 - Variação da temperatura para diferentes tipos de forro.



Fonte: Autoria Própria (2017).

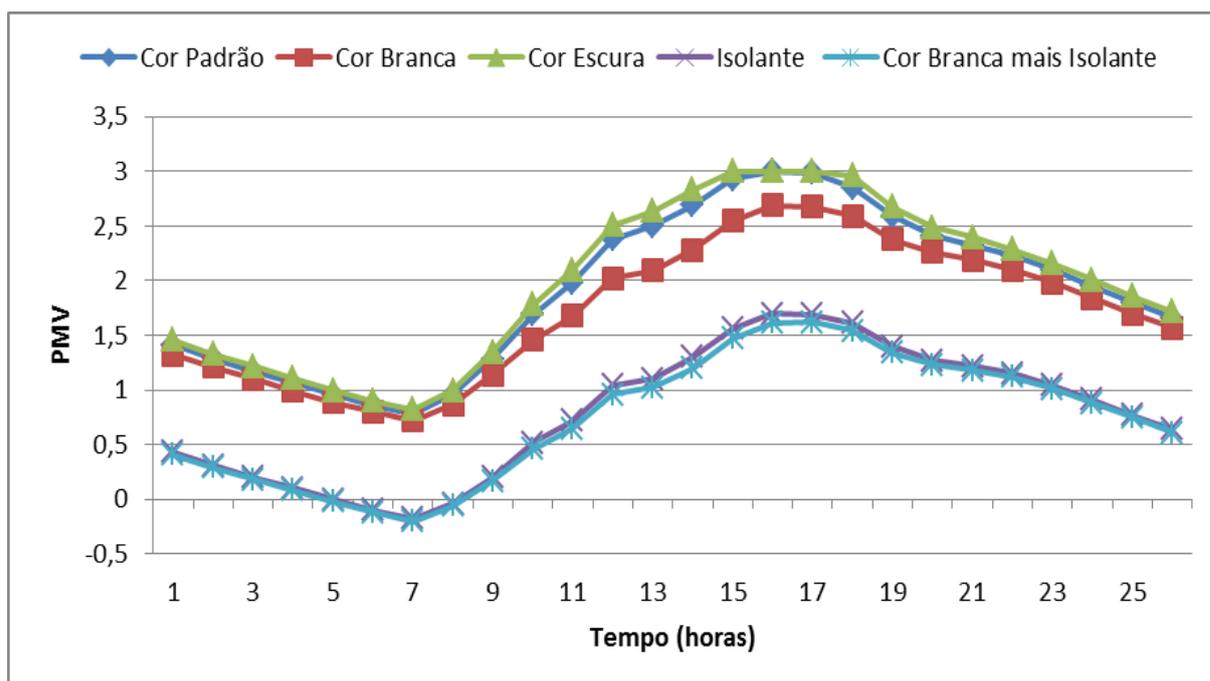
Figura 16 - Variação dos índices de conforto para diferentes tipos de forro.



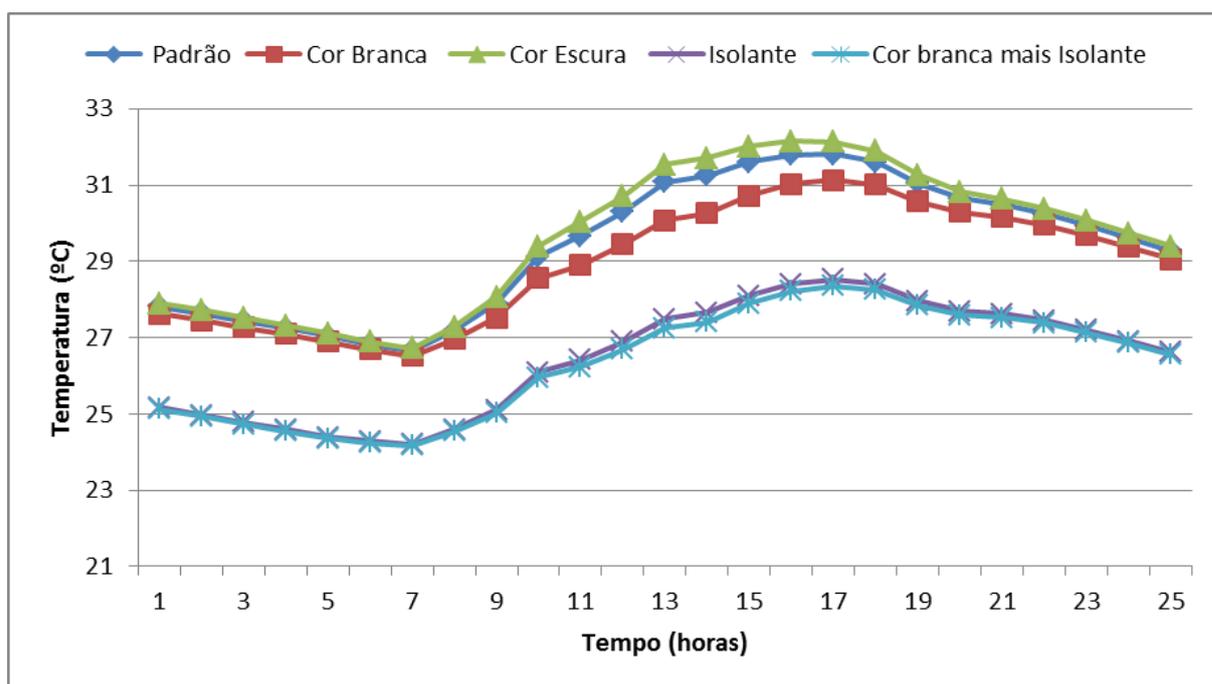
Fonte: Autoria Própria (2017).

A partir das Figuras 17 e 18, observa-se que a utilização de um isolante refletivo torna-se uma alternativa interessante para a melhora do conforto térmico dentro do ambiente, visto ter um custo acessível para os moradores deste tipo de edificação.

Figura 17 - Influência das cores e do isolante nos índices de conforto térmico.



Fonte: Autoria Própria (2017).

Figura 18 - Influência das cores e do isolante nas temperaturas.

Fonte: Autoria Própria (2017).

5 CONCLUSÕES

As simulações apresentadas mostraram a importância de medidas para redução da transferência de calor proveniente da radiação solar através do telhado, pois as maiores variações ocorreram no período diurno. De acordo com os resultados, a mudança de material no forro (PVC, madeira e gesso) apresentou ser pouco eficiente quando o objetivo é a melhora do conforto térmico tanto para Curitiba quanto para Fortaleza. No entanto, a sua presença é de fundamental importância para manter valores toleráveis de conforto. Pouco efeito também foi observado na mudança do material do telhado (cerâmica ou fibrocimento). Do mesmo modo que o forro, esta característica pode ser atribuída à semelhança nos valores de transmitância térmica, entre os materiais.

No caso da mudança para a cor branca do telhado de fibrocimento, esta se mostrou mais eficiente, reduzindo o desconforto causado pelo calor durante o dia. A presença do isolante mostrou ser o mais efetivo para a melhora dos índices do *PMV* para as duas cidades. Embora traga um efeito contrário para Curitiba no período de inverno, percebe-se que neste período os índices de conforto não apresentaram uma variação significativa entre eles, o que indica a importância do seu uso, principalmente para o verão.

Para Fortaleza as soluções apresentadas tiveram um resultado mais significativo, pois em todos os casos ocorreram uma melhora nos índices de conforto para as residências.

Deste modo, no caso de tratar-se de uma solução de baixo custo e apresentar bons resultados no aumento do conforto térmico, a mudança para a cor branca em telhados e principalmente, o acréscimo do isolante mostraram-se como alternativas interessantes para serem implementadas nos projetos de residências de interesse social.

REFERÊNCIAS

- ABENC-BA. **Modelo padrão de casa**. Disponível em: <<https://abenc-ba.org.br/wp-content/uploads/2017/04/Modelo-Padr%C3%A3o-de-Casa-1.pdf>> Acesso em: 23 de agosto de 2017
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Thermal environmental conditions for human occuoancy**. ASHRAE STANDARD 55-1992. Atlanta, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho: NBR 15575**, Rio de Janeiro, 2008, 251 p.
- ÇENGEL, Y.A. **Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática**, 4ª Edição, Editora McGrawHill, 2012.
- FANGER, O. P. **Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering**. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.
- HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. **Building Performance Simulation for Design and Operation**, 2011.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Ergonomics of the termal environment – Analytical determination and interpretation of termal comfort using calculationof the PMV and PPD índices and local termal comfort criteria**. ISSO 7730, Genebra, 2005.
- MENDES N., Oliveira R.C.L.F. e Santos G.H., **DOMUS 1.0: A Brazilian PC Program for Building Simulation, Seventh International Conference on Building Performance Simulation (IBPSA'01)**, V.1, n.1, p.83-89, Rio de Janeiro, Brazil, 2001.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Balanço Energético Nacional**. Brasília, DF, 2003. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 7 jun.2017.
- NICOL, J.F . **Thermal comfort – a handbook for field studies toward an adaptive model**. London: University of East London, 1993.

SANTOS, G. H.; MENDES, N.; PARISE, I. **Comparação entre programas de simulação para análise de comportamento térmico de edificações**. In: ENCONTRO 112 NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2004, São Paulo. Anais... São Paulo: ANTAC, 2004.

SILVEIRA, Ricardo; MARINOSKI, Deivis Luis; LAMBERTS, Roberto. **Avaliação da absorvância à radiação solar e temperatura superficial de telhas de fibrocimento utilizadas nas coberturas de edificações do campus da UFSC**. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. Anais... Juiz De Fora: ANTAC, 2012.

SIQUEIRA, T.C.P.A. et al. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações**. In: Revista Escola de Minas, vol. 58, nº 2. Ouro Preto. Abr/Jun 2005.

TANABE, S. **Thermal Comfort Requirements in Japan**. Waseda, 1988. Tese de Doutorado – Waseda University.

XAVIER, Antonio Augusto de Paula. **Predição de conforto térmico em ambientes internos com atividades sedentárias – Teoria física aliada a estudos de campo**. Florianópolis, 2000. 251 p. Tese (Doutorado em engenharia de Produção e sistemas) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina.

XAVIER, A. L. **Estudo da utilização dos softwares EnergyPlus e Desktop Radiance na cidade de Cuiabá – MT**. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal do Mato Grosso. Cuiabá, 2008