



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
Campus Universitário – Trindade
Florianópolis – SC – CEP 88040-970



**Desenvolvimento de um modelo equivalente de
avalição de propriedades térmicas para a
elaboração de uma biblioteca de componentes
construtivos brasileiros para o uso
no programa *EnergyPlus***

Fernando da Silva Weber
Ana Paula Melo
Deivis Luis Marinoski
Saulo Guths
Roberto Lamberts

Agosto, 2017

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	MÉTODO DE AVALIAÇÃO - Modelo de referência e equivalente	4
2.1.	Para paredes.....	4
2.1.1.	Cálculo da espessura para o modelo equivalente.....	10
2.1.2.	Determinação dos modelos e simulação no programa <i>QuickField</i>	12
2.2	Para coberturas	25
3	RESULTADOS	34
4	LIMITAÇÕES DO PROGRAMA <i>QUICKFIELD</i>	39
5	CONCLUSÃO	40
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41
	ANEXO	42

1. INTRODUÇÃO

Este relatório descreve uma metodologia para a caracterização de componentes construtivos adequados à realidade brasileira de utilização do programa *EnergyPlus*. O objetivo principal do trabalho é facilitar a compreensão das características dos componentes construtivos inseridas no programa *EnergyPlus*, evitando as chances de erros durante a modelagem da edificação.

O *EnergyPlus* é um programa gratuito e internacionalmente conhecido (EnergyPlus, 2017). Com base nos princípios fundamentais de equilíbrio térmico, o *EnergyPlus* conduz um processo integrado e simultâneo das condições das zonas térmicas. Além disso, permite que o usuário detalhe as características da geometria da edificação, dos elementos de construção, e dos componentes dos sistemas existentes; e determine os padrões de uso respectivo ao uso de cada zona térmica e sistema. Dentre os cálculos de transferência de calor presentes no programa, foi adotado o método de transferência por condução. Este método considera tanto a transferência de calor bem como o armazenamento térmico.

O método de cálculo para determinação do desempenho térmico utilizado pelo programa *EnergyPlus* dispõe os materiais constituintes da parede em camadas em série, perdendo assim, informações importantes quanto a geometria do componente que são necessárias para a sua correta quantificação energética. Frente a isso, este estudo apresenta um método para a determinação de um modelo equivalente referente aos componentes construtivos mais comumente encontrados no Brasil.

Além disso, atualizou-se a biblioteca de materiais e componentes elaborada por Ordenes (2003), onde apresentou um método de simplificação para diversos elementos construtivos. A principal diferença está na consideração das propriedades dos materiais que compõe o elemento. Em Ordenes (2003), os valores das resistências das cavidades de ar seguiram os valores tabelados na NBR 15220 (ABNT, 2005b) de acordo com os parâmetros do componente construtivo, e a simplificação dos modelos ocorreu em função dos valores de condutividade e espessura equivalente para os demais materiais. No desenvolvimento deste estudo, buscou-se manter as propriedades de cada material, alterando apenas as espessuras de suas camadas e a resistência do ar.

Para a simulação e avaliação destes novos componentes foi utilizado o software de simulação computacional *QuickField Student version* (2016), desenvolvido pela Tera Analysis Ltd. O *Quickfield* é um software baseado no método dos elementos finitos, capaz de realizar

simulações computacionais de transferência de calor nos regimes estacionário e transiente, além de diversas outras aplicações nas áreas da engenharia.

A validação dos modelos computacionais foi realizada através da comparação entre os resultados de transmitância térmica simulados em regime estacionário com os resultados obtidos através dos procedimentos de cálculo da NBR 15220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c). Após a validação dos modelos, fez-se a análise e a comparação do fluxo de calor no regime transiente entre o modelo de referência e o modelo equivalente.

2. MÉTODO DE AVALIAÇÃO - Modelo de referência e equivalente

2.1. Para paredes

Os procedimentos realizados para a determinação do elemento construtivo equivalente devem ser realizados de tal forma que as grandezas térmicas (C_t) e (R_t) sejam próximas, ou iguais, ao modelo de referência.

Considerou-se como modelo de referência o modelo apresentado na Figura 1, composto por um módulo de tijolo de 6 furos 10x16x32 cm com argamassa de assentamento de 1 cm na face superior e posterior.

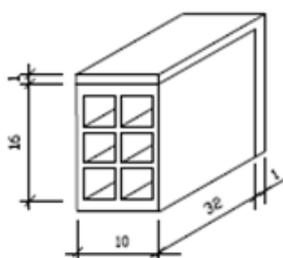


Figura 1 – Modelo de referência do elemento isolado. (Fonte: ABNT, 2005b)

Primeiramente calculou-se a resistência e a capacidade térmica total do modelo de referência de acordo com o método de cálculo proposto na NBR 15220 (ABNT, 2005b). Com base no resultado da capacidade térmica total, foi possível determinar uma nova espessura das camadas de cerâmica para o modelo equivalente e por meio da resistência térmica total do elemento foi possível definir uma condutividade equivalente para a câmara de ar do modelo equivalente. Neste modelo equivalente, as camadas que compõe o elemento são distribuídas perpendicularmente ao fluxo de calor, como mostra a Figura 2.

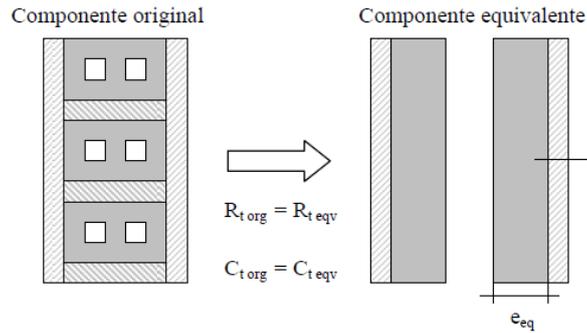


Figura 2 - Determinação do modelo equivalente. (Fonte: Ordenes, 2003)

A partir das novas espessuras calculadas para as camadas do modelo equivalente encontradas por meio do método descrito por Ordenes (2003), foram criados modelos computacionais no programa *QuickField*. Nesta etapa, foram modelados os elementos de referência e equivalente, realizando as simulações em regime estacionário. Com os resultados obtidos pelo software e através NBR 15220 (ABNT, 2005b) foi feita uma comparação entre os valores de transmitância térmica encontrada a fim de validar os modelos, e a partir disto dar início as simulações em regime transiente.

Os procedimentos para os cálculos da transmitância térmica total (U_T) - Equação (1), da resistência térmica total (R_T) - Equação (2) e da capacidade térmica total (C_T) referente à Equação (3) são os mesmos considerados pela NBR 15220 (ABNT, 2005b). Entretanto, não foram consideradas as camadas de argamassa de revestimento interna e externa, devido ao fato de que estas camadas (camadas perpendiculares ao fluxo) se encontram de acordo com o método de cálculo utilizado no programa *EnergyPlus*.

$$U_T = \frac{1}{R_T} \quad (1)$$

$$R_T = \sum_{i=1}^k \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (2)$$

$$C_T = \sum_{i=1}^k e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (3)$$

Onde,

λ = condutividade térmica (W/m. °C),

ρ = densidade (kg/m³),

c = calor específico (kJ/kgK).

Os valores das propriedades dos materiais utilizados são apresentados na Tabela 1. Todos os valores descritos foram obtidos na NBR 15220 (ABNT, 2005b).

Tabela 1 – Propriedades dos materiais. Fonte (ABNT, 2005b).

Material	Propriedades		
	Condutividade	Densidade	Calor específico
Cerâmica	0,90 (W/m.°C)	1600 (kg/m ³)	0,92 (kJ/kgK)
Argamassa	1,15 (W/m.°C)	2000 (kg/m ³)	1,00 (kJ/kgK)

As câmaras de ar do tijolo cerâmico do modelo de referência possuem 3 cm de espessura e emissividade (emitância térmica) (ϵ) das paredes igual a 0,90. De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005b), para superfícies de alta emissividade ($\epsilon > 0,8$), com espessura da câmara de ar entre 2 cm a 5 cm e fluxo de calor na direção horizontal, deve-se considerar um valor de $0,16 \text{ m}^2\text{°C/W}$ para a camada de resistência de ar (R_{ar}).

A sequência de cálculo realizada para a determinação da resistência térmica total (R_T) e da capacidade térmica total (C_T) do modelo de referência é apresentada nos itens abaixo. Optou-se por dividir os cálculos em duas partes. A primeira parte consiste na determinação das propriedades somente do tijolo, enquanto a segunda parte considera a adição da argamassa de assentamento. A Figura 3 mostra em detalhe as seções utilizadas para a determinação das grandezas térmicas do modelo de referência.

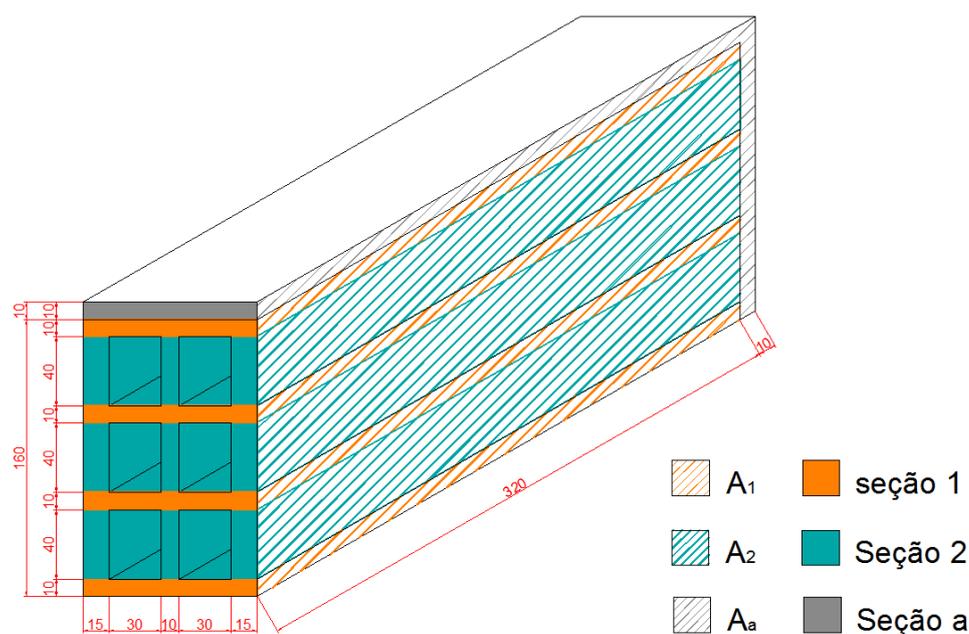


Figura 3 – Detalhe das seções do modelo de referência (cotas em mm).

A resistência térmica total do material tijolo foi obtida através da soma das resistências térmicas das seções 1 e 2, ponderadas por suas áreas (A_1) e (A_2), respectivamente. A área da seção considerada para ponderação é igual à área da superfície perpendicular ao fluxo de calor, como mostra a equação (4).

$$A_i = \ell_i \cdot h_i \quad (4)$$

Onde,

ℓ_i = comprimento da seção perpendicular ao fluxo de calor (m);

h_i = altura da seção (m).

Seção 1 (cerâmica):

$$A_1 = \ell_1 \cdot h_1$$

Para a seção 1, a área (A_1) é igual ao comprimento do tijolo (ℓ_1) de 32 cm pela altura da cerâmica (h_1) de 1,0 cm.

$$A_1 = 0,32 \cdot 0,01 = 0,0032 \text{ m}^2$$

A resistência térmica dessa seção foi calculada com o uso da Equação (2), sendo a espessura da cerâmica ($e_{cerâmica}$) igual a 10 cm e a condutividade térmica ($\lambda_{cerâmica}$) igual a 0,90 W/m.°C.

$$R_1 = \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} = \frac{0,10}{0,90} = 0,1111 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{C}}{\text{W}}$$

Seção 2 (cerâmica + ar + cerâmica + ar + cerâmica):

A seção 2 abrange as camadas de cerâmica, ar, cerâmica, ar e cerâmica novamente. Sendo a área (A_2) igual ao comprimento da seção transversal ao fluxo (ℓ_2) multiplicada pela altura da seção (h_2). Portanto:

$$A_2 = \ell_2 \cdot h_2$$

$$A_2 = 0,04 \times 0,32 = 0,0128 \text{ m}^2$$

Pela Equação (2), calculou-se a resistência térmica (R_2) da seção como o somatório da resistência das camadas de cerâmica e de ar. A resistência térmica da cerâmica é obtida pela espessura da camada, dividida pelo valor correspondente a sua condutividade térmica. Cabe

ressaltar que o valor da resistência da câmara de ar (R_{ar}) foi obtido na NBR 15220 (ABNT, 2005b), correspondendo para este caso em $0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$.

$$R_2 = 2 \cdot \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + 2 \cdot R_{ar} = 2 \cdot \frac{0,015}{0,90} + \frac{0,01}{0,90} + 0,32 = 0,3644 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$$

A resistência térmica total do tijolo (R_{tijolo}) foi determinada ponderando as resistências da seção 1 e 2 por suas respectivas áreas. A área total do tijolo (A_{tijolo}) é igual à soma das áreas das seções 1 e 2.

$$A_{tijolo} = 4 \cdot A_1 + 3 \cdot A_2 = 0,0512 \text{ m}^2$$

$$R_{tijolo} = \frac{A_{tijolo}}{4 \cdot \frac{A_1}{R_1} + 3 \cdot \frac{A_2}{R_2}} = 0,2321 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

A resistência do módulo ($R_{tijolo} + R_{argamassa}$) foi determinada pela adição da resistência da camada de argamassa referente à seção a.

Seção a (argamassa):

A área da seção a (A_a) considera as camadas de argamassa localizada na região superior e posterior do tijolo, sendo obtida pelo somatório das áreas de cada local, como é apresentado a seguir.

$$A_a = 0,01 \cdot 0,32 + 0,01 \cdot 0,17 = 0,0049 \text{ m}^2$$

A resistência da camada de argamassa ($R_{argamassa}$) é obtida pela Equação (2), onde o valor da espessura ($e_{argamassa}$) é igual a 10 cm e o valor da condutividade térmica ($\lambda_{argamassa}$) igual a $1,15 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{°C}$.

$$R_{argamassa} = \frac{e_{argamassa}}{\lambda_{argamassa}} = \frac{0,10}{1,15} = 0,08695 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

Com o valor da resistência térmica da argamassa ($R_{argamassa}$), fez-se o somatório junto à resistência térmica do tijolo (R_{tijolo}), através da ponderação das suas respectivas áreas, podendo assim determinar a resistência térmica do módulo ($R_{módulo}$).

$$R_{módulo} = \frac{A_{argamassa} + A_{tijolo}}{\frac{A_{argamassa}}{R_{argamassa}} + \frac{A_{tijolo}}{R_{tijolo}}} = 0,2026 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}$$

A resistência térmica total do modelo de referência é obtida através da soma da resistência do módulo ($R_{módulo}$) e as resistências superficiais internas (R_{si}) e externas (R_{se}). Os valores para a resistência térmica da superfície interna (R_{si}) e a resistência térmica da superfície externa (R_{se}) foram obtidos na NBR 15220 (ABNT, 2005b), e correspondem respectivamente a $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ e $0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$.

Logo,

$$R_T = R_{se} + R_{módulo} + R_{si} = 0,13 + 0,2026 + 0,04 = 0,3726 \frac{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}{\text{W}}$$

A transmitância térmica total (U_T) é determinada através da Equação (1), sendo o inverso da resistência térmica total do modelo de referência (R_T).

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3726} = 2,684 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Os procedimentos de cálculo para a determinação da capacidade térmica total (C_T) do modelo de referência são semelhantes aos realizados para o cálculo da resistência térmica, porém utilizando a Equação (3), e os valores de calor específico (c) e peso específico (ρ) presentes na Tabela 1.

Seção 1 (cerâmica):

$$A_1 = 0,01 \times 0,32 = 0,0032 \text{ m}^2$$

$$C_{T,1} = \sum_{i=1}^1 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} = 0,10 \cdot 0,92 \cdot 1600 = 147,20 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Seção 2 (cerâmica + ar + cerâmica + ar + cerâmica):

$$A_2 = 0,04 \times 0,32 = 0,0128 \text{ m}^2$$

$$C_{T,2} = \sum_{i=1}^4 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i$$

$$C_{T,2} = (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} + (e \cdot c \cdot \rho)_{ar} + (e \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica}$$

$$C_{T,2} = (0,015 \cdot 0,92 \cdot 1600) + 0 + (0,010 \cdot 0,92 \cdot 1600) + 0 + (0,015 \cdot 0,92 \cdot 1600) = 58,88 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{°C}}$$

Após o cálculo da capacidade térmica das seções 1 e 2, foi calculada a capacidade térmica total do tijolo. Como no cálculo da resistência térmica, a capacidade térmica total do tijolo ($C_{T,tijolo}$) foi determinada pela soma da capacidade térmica de cada seção, ponderada por suas áreas.

$$A_{tijolo} = 4.A_1 + 3.A_2 = 0,0512 \text{ m}^2$$

$$C_{T,tijolo} = \frac{A_{tijolo}}{4 \frac{A_1}{C_{T,1}} + 3 \frac{A_2}{C_{T,2}}} = 69,27 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2\text{K}}$$

A capacidade térmica do módulo ($C_{T,módulo}$), foi calculada pela adição da capacidade térmica da argamassa ($C_{T,a}$), ponderada por sua área (A_a).

Seção a (argamassa):

$$A_a = 0,01.0,32 + 0,01.0,17 = 0,0049 \text{ m}^2$$

$$C_{T,a} = \sum_{i=1}^1 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = (e \cdot c \cdot \rho)_{argamassa} = 0,10 + 1,00 + 2000 = 200 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Portanto, a capacidade térmica do módulo ($C_{T,módulo}$) é:

$$C_{T,módulo} = \frac{A_a + A_{tijolo}}{\frac{A_a}{C_{T,a}} + \frac{A_{tijolo}}{C_{T,tijolo}}} = 73,46 \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2.1.1. Cálculo da espessura para o modelo equivalente

Para a determinação de uma espessura equivalente (e_{eq}), considerou-se a capacidade térmica total ($C_{T,eq}$) do modelo equivalente igual a capacidade térmica total do modelo de referência ($C_{T,módulo}$). A Figura 4 apresenta o modelo equivalente que representa o modelo original, de referência. Cabe ressaltar que o modelo equivalente considera apenas dois elementos: a cerâmica e o ar. A capacidade térmica referente à argamassa no modelo de referência foi adicionada à capacidade térmica da cerâmica, provocando um aumento de sua espessura ($e_{eq,cerâmica}$).

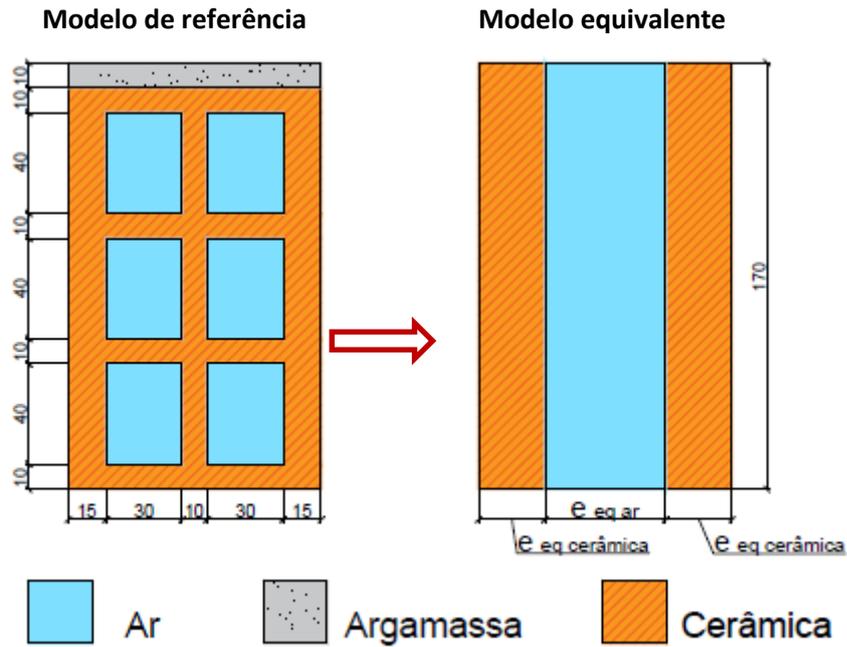


Figura 4 – Modelo de referência e modelo equivalente (cotas em mm)

Essa espessura equivalente da cerâmica ($e_{eq,cerâmica}$) foi obtida pela Equação (3), considerando apenas a capacidade térmica das camadas de cerâmica. A capacidade térmica do ar foi desprezada.

Então:

$$C_{T,eq} = \sum_{i=1}^2 e_i \cdot c_i \cdot \rho_i = 2 \cdot (e_{eq} \cdot c \cdot \rho)_{cerâmica} = C_{T,módulo}$$

Colocando em evidência a espessura equivalente da cerâmica ($e_{eq,cerâmica}$):

$$e_{eq,cerâmica} = \frac{C_{T,módulo}}{2 \cdot (c \cdot \rho)_{cerâmica}} = \frac{73,46}{2 \cdot (0,92 \cdot 1600)} = 0,02495 \text{ m}$$

$$e_{eq,cerâmica} = 2,495 \text{ cm}$$

Portanto, a espessura equivalente para cada camada de cerâmica ($e_{eq,cerâmica}$) é de aproximadamente 2,5 cm. Com este valor, foi possível obter a espessura equivalente para a câmara de ar ($e_{eq,ar}$) por meio da Equação 5, no qual a espessura da câmara de ar é igual a largura do bloco cerâmico (b) menos a espessura equivalente interna e externa da cerâmica ($e_{eq,cerâmica}$).

$$e_{eq,ar} = b - 2 \cdot e_{eq,cerâmica} \quad (5)$$

Onde:

b = largura do bloco cerâmico (m);

$e_{eq,cerâmica}$ = espessura equivalente para cada camada de cerâmica (m).

Assim temos:

$$e_{eq,ar} = 0,10 - 2 \cdot 0,025 = 0,05 \text{ m}$$

Com base nos valores obtidos, foi possível determinar o novo modelo equivalente apresentado na Figura 5.

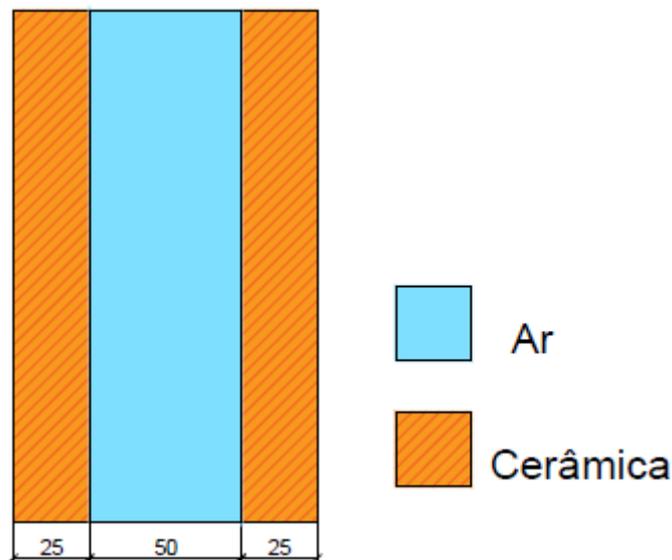


Figura 5 – Modelo equivalente (cotas em mm).

2.1.2. Determinação dos modelos e simulação no programa *QuickField*

2.1.2.1 Regime permanente

Para a validação do modelo de referência, fez-se necessário a modelagem e simulação em regime permanente, comparando o resultado da simulação ao obtido por meio do processo de cálculo da NBR 15220 (ABNT, 2005b). O método de cálculo do programa *Quickfield* segue a metodologia adotada pela ISO 10077 - *Thermal performance of Windows, doors and shutters* (ISO, 2012), que apresenta cálculos da transmitância térmica para janelas, portas e

persianas. A ISO 10077 considera a resistência térmica da câmara de ar variável para diferentes temperaturas e espessuras; enquanto que na NBR 15220 a temperatura não é considerada, levando-se em consideração apenas parâmetros como a direção do fluxo de calor e as emissividades das superfícies da câmara.

As propriedades dos materiais foram inseridas no programa *Quickfield* de acordo com os valores adotados nos cálculos de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005b), exceto para resistência térmica do ar. No programa *QuickField*, o ar é considerado como um material que apresenta uma condutividade equivalente obtida através da Equação (2), sendo a resistência do ar o inverso da soma dos coeficientes de transferência de calor por convecção e radiação. Para o cálculo desse parâmetro geralmente é necessária a análise computacional da dinâmica dos fluidos (CFD) devido sua complexidade, entretanto, a ISO 10077-2 apresenta um método prático para o cálculo da condutividade térmica equivalente da câmara de ar. O programa *Quickfield* disponibiliza uma planilha Excel desenvolvida para implementar este método de cálculo. Esta planilha funciona de forma iterativa e em conjunto com o software *Quickfield*, sendo necessário, portanto, apenas a inserção de um valor inicial para a condutividade equivalente da câmara de ar. O valor final da condutividade equivalente da câmara de ar.

O programa *QuickField* trabalha em duas dimensões (2D), portanto certas características do modelo de referência não são computadas na determinação da resistência e capacidade térmica do modelo simulado, como por exemplo, a argamassa da parte posterior do módulo. Desta maneira, com o objetivo de preservar as suas propriedades térmicas de capacidade e resistência térmica total, foi determinado uma compensação na argamassa de assentamento na região superior do modelo simulado, pelo aumento de sua altura ($h_{argamassa}$).

Para se determinar a altura equivalente para a camada de argamassa superior ($h_{eq,argamassa}$), utilizou-se área total de argamassa (A_a) obtida anteriormente, e introduzida na Equação 6:

$$A_a = h_{eq,argamassa} \cdot \ell_{tijolo} \quad (6)$$

Onde,

ℓ_{tijolo} = comprimento do tijolo (m);

$h_{eq,argamassa}$ = altura equivalente da argamassa de assentamento (m).

$$U_T = \frac{\phi_q}{\Delta T \cdot h} \quad (7)$$

Onde,

$\phi_q = \text{fluxo de calor (W)}$;

$\Delta T = \text{variação da temperatura externa e interna (°C)}$;

$h = \text{Altura do módulo (m)}$.

Para o tijolo cerâmico de 6 furos retangulares (10x16x32cm), considerando uma diferença de temperatura externa e interna de 10°C, obteve-se um fluxo de calor de 4,6563 W através da simulação no software *Quickfield*, que aplicado a Equação (7) resulta em um valor de transmitância térmica de:

$$U_T = \frac{4,6563}{(10) \cdot (0,1753125)} = 2,66 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

Como se deseja manter a mesma resistência térmica total do modelo de referência (R_T) de 0,2026 m².°C/W, sem alterar as propriedades térmicas da cerâmica, foi necessário à determinação de uma nova resistência para a câmara de ar (R_{ar}) para o modelo equivalente por meio da Equação (8):

$$R_T = 2 \cdot \frac{e_{eq,cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + R_{ar} \quad (8)$$

Onde,

$e_{eq,cerâmica} = \text{espessura equivalente da cerâmica (m)}$;

$\lambda_{cerâmica} = \text{condutividade térmica da cerâmica (W/m°C)}$;

$R_{ar} = \text{resistência térmica para a câmara de ar (m².°C/W)}$

Da Equação (2), sabe-se que a resistência (R) é igual à espessura (e) do material dividido por sua condutividade térmica (λ_{eq}). Assumindo um processo de condução pura na câmara de ar é possível obter a resistência do ar (R_{ar}) pela Equação 9:

$$R_{ar} = \frac{e_{eq,ar}}{\lambda_{eq,ar}} \quad (9)$$

Onde,

$e_{ar} = \text{espessura da camara de ar (m)}$;

$\lambda_{eq,ar}$ = condutividade equivalente da camara de ar ($W/m^{\circ}C$).

Então incluindo a Equação (9) na Equação (8), temos:

$$R_T = R_{se} + 2 \cdot \frac{e_{cerâmica}}{\lambda_{cerâmica}} + \left(\frac{e_{ar}}{\lambda_{eq,ar}} \right) + R_{si} = 0,3759 \text{ m}^2 \cdot ^{\circ}C/W$$

Substituindo os valores e isolando ($\lambda_{eq,ar}$):

$$0,3759 = 0,13 + 2 \cdot \frac{0,025}{0,90} + \frac{0,05}{\lambda_{eq,ar}} + 0,04 \quad \therefore \quad \lambda_{eq,ar} = 0,333 \frac{W}{m^{\circ}C}$$

Desta maneira foi possível que ambos os modelos de referência e equivalente apresentassem as mesmas transmitâncias e capacidade térmicas.

2.1.2.2 Regime transiente

A análise do regime transiente foi dividida em duas fases: a primeira parte consiste na comparação entre os gradientes de temperaturas da seção do modelo de referência e do modelo equivalente. Na segunda fase é comparado o fluxo de calor nas superfícies externa e interna entre os dois modelos.

A análise do gradiente de temperatura da seção tem como objetivo verificar as variações de temperatura na seção do bloco cerâmico devido às flutuações da temperatura externa (T) em um intervalo de 24 horas.

As flutuações da temperatura externa (T) são obtidas através da Equação (10):

$$T(t) = 9 \cdot \text{sen}(4,1667 \times 10^{-3} \cdot t) + 21 \tag{10}$$

Onde,

t = tempo (s).

Esta função representar as variações da temperatura externa para o período de 24 horas, com uma amplitude térmica de $18^{\circ}C$, variando de $12^{\circ}C$ às 3h00 até um máximo de $30^{\circ}C$ às 15h00. A temperatura interna do ar foi mantida constante em $21^{\circ}C$.

Como o tijolo apresenta diferentes configurações ao longo da altura de sua seção transversal, foi necessário encontrar um gradiente de temperatura representativo para todo o modelo simulado. Esse gradiente foi obtido através de integrais calculadas (linhas vermelhas) a

cada centímetro da seção transversal da Figura 7 para a determinação da temperatura média. Para o modelo equivalente, o gradiente de temperatura é o mesmo para qualquer altura da seção já que os materiais são dispostos em camadas paralelas.

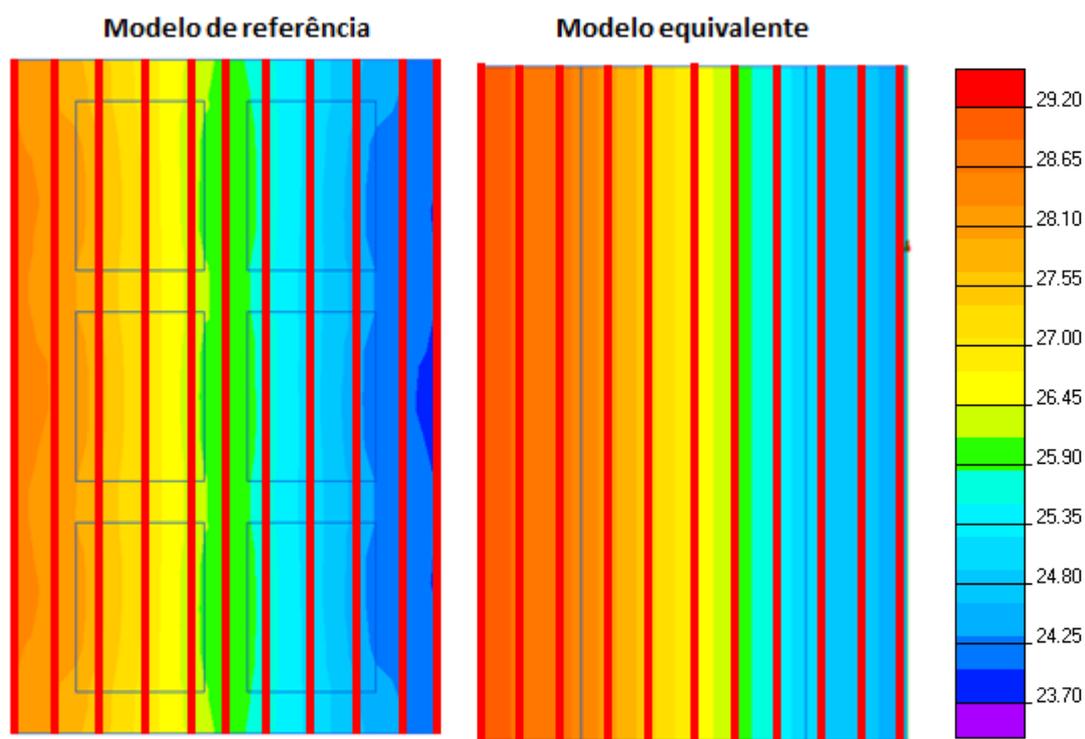


Figura 7 – Gradientes de temperatura para o modelo de referência e equivalente (temperatura em °C).

As temperaturas médias representativas para cada centímetro da seção variando no tempo em um período de 24h foram obtidas pelo programa *QuickField*. A Figura 8 e a Tabela 2 apresentam os resultados dos valores de temperatura para os dois modelos

É possível verificar que há uma boa concordância entre os valores de temperaturas encontradas entre os dois modelos analisados. As maiores diferenças encontradas ocorrem a 4 cm da face externa do tijolo, às 13h00 e 1h00, quando a temperatura externa é de 27°C e 15°C, respectivamente, com variação de 0,82°C. Às 17h00 e 5h00 a diferença entre os dois modelos é de 0°C na região próxima a 1 cm da parede externa. Este mesmo comportamento foi também observado às 19h00 e 7h00, nos pontos distanciados a 2 cm da parede externa.

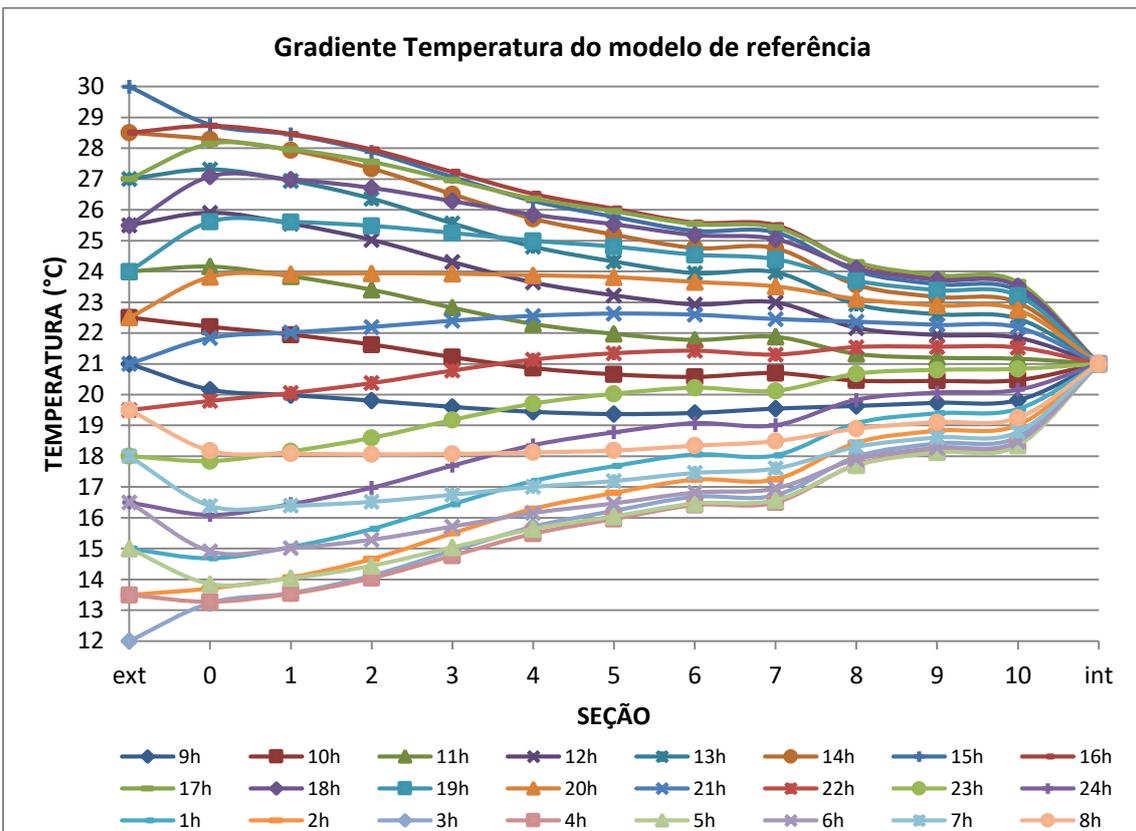
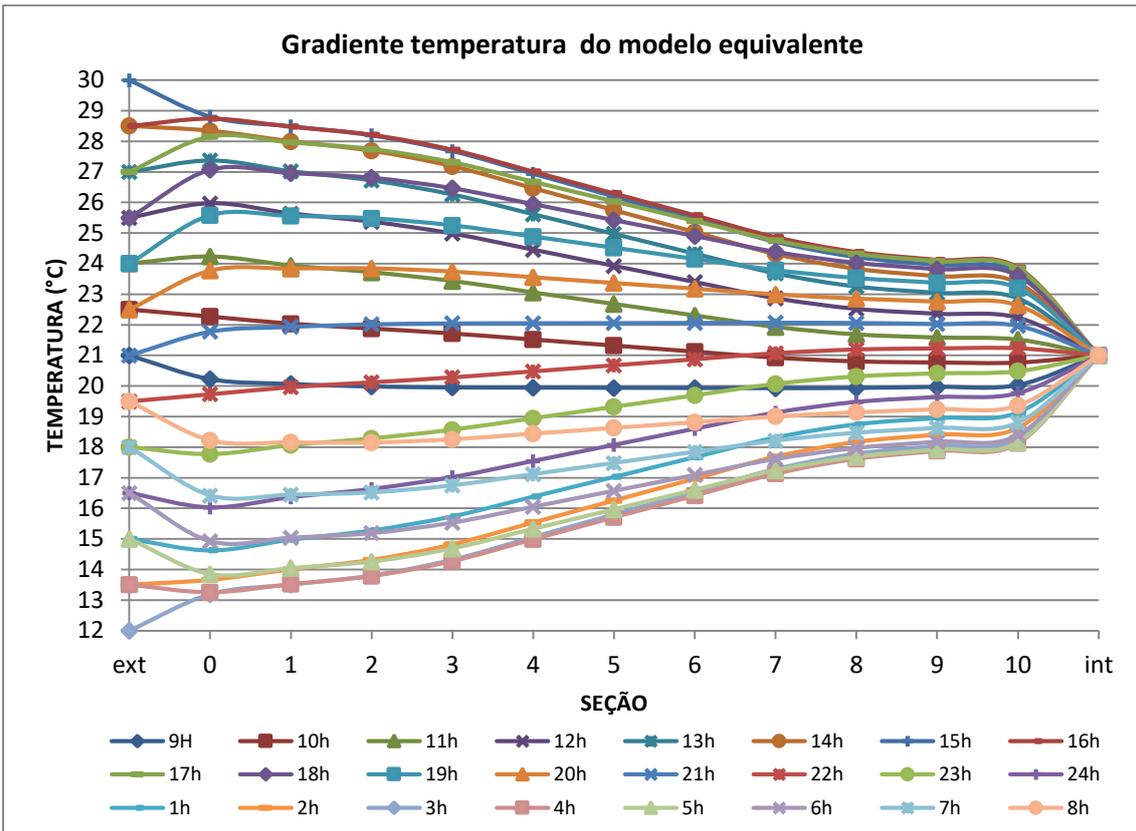


Figura 8 – Gradiente de temperatura da seção transversal de um tijolo de 6 furos.

Tabela 2 - Variação da temperatura entre os modelos ao longo da seção.

ΔT Modelo de referência versus modelo equivalente											
tempo (h)	Largura da seção longitudinal (cm)										
	0.0	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0
9	-0.06	-0.08	-0.18	-0.35	-0.50	-0.57	-0.53	-0.38	-0.31	-0.23	-0.21
10	-0.07	-0.09	-0.25	-0.50	-0.65	-0.66	-0.55	-0.23	-0.35	-0.32	-0.29
11	-0.07	-0.09	-0.31	-0.61	-0.76	-0.71	-0.53	-0.05	-0.36	-0.39	-0.35
12	-0.07	-0.09	-0.35	-0.68	-0.82	-0.70	-0.47	0.12	-0.36	-0.43	-0.39
13	-0.06	-0.08	-0.36	-0.71	-0.82	-0.65	-0.39	0.29	-0.32	-0.44	-0.40
14	-0.05	-0.07	-0.35	-0.68	-0.76	-0.56	-0.27	0.43	-0.27	-0.42	-0.38
15	-0.04	-0.05	-0.32	-0.61	-0.65	-0.42	-0.14	0.55	-0.20	-0.37	-0.34
16	-0.02	-0.02	-0.26	-0.50	-0.50	-0.26	0.00	0.63	-0.11	-0.30	-0.27
17	-0.01	0.00	-0.19	-0.35	-0.31	-0.08	0.14	0.67	-0.02	-0.21	-0.19
18	0.01	0.02	-0.10	-0.19	-0.10	0.10	0.27	0.66	0.08	-0.10	-0.09
19	0.03	0.05	-0.01	0.00	0.11	0.28	0.39	0.61	0.17	0.02	0.01
20	0.05	0.07	0.09	0.18	0.32	0.44	0.47	0.51	0.24	0.13	0.12
21	0.06	0.08	0.18	0.35	0.50	0.57	0.53	0.38	0.31	0.23	0.21
22	0.07	0.09	0.25	0.50	0.65	0.66	0.55	0.23	0.35	0.32	0.29
23	0.07	0.09	0.31	0.61	0.76	0.71	0.53	0.05	0.36	0.39	0.35
24	0.07	0.09	0.35	0.68	0.82	0.70	0.47	-0.12	0.36	0.43	0.39
1	0.06	0.08	0.36	0.71	0.82	0.65	0.39	-0.29	0.32	0.44	0.40
2	0.05	0.07	0.35	0.68	0.76	0.56	0.27	-0.44	0.27	0.42	0.38
3	0.04	0.05	0.32	0.61	0.65	0.42	0.14	-0.55	0.20	0.37	0.34
4	0.02	0.02	0.26	0.50	0.50	0.26	0.00	-0.63	0.11	0.30	0.27
5	0.01	0.00	0.19	0.36	0.31	0.08	-0.14	-0.67	0.02	0.21	0.19
6	-0.01	-0.02	0.10	0.19	0.10	-0.10	-0.27	-0.66	-0.08	0.10	0.09
7	-0.03	-0.05	0.01	0.00	-0.11	-0.28	-0.39	-0.61	-0.17	-0.02	-0.01
8	-0.05	-0.07	-0.09	-0.18	-0.32	-0.44	-0.47	-0.51	-0.24	-0.13	-0.12

Pode-se perceber que as menores variações de temperatura se encontram nas regiões próximas as superfícies internas e externas, aumentando a diferença à medida que se aproxima da metade do tijolo, onde estão as cavidades de ar. A primeira metade do tijolo cerâmico (parte mais externa) mostrou uma variação média percentual de 13,8% menor do que a segunda metade (parte mais interna). A variação da temperatura média absoluta para todos os casos analisados foi de 0,30°C.

A análise do fluxo de calor nas superfícies internas e externas para os dois modelos tem como objetivo verificar não só a concordância entre os dois modelos, mas também o comportamento da transferência de calor ao longo de sua seção. Os resultados de fluxo de calor são obtidos por meio do cálculo de integrais realizadas pelo programa *QuickField* nas superfícies interna e externa, considerando valores positivos para o fluxo no sentido da esquerda para a direita, como mostra a Figura 9.

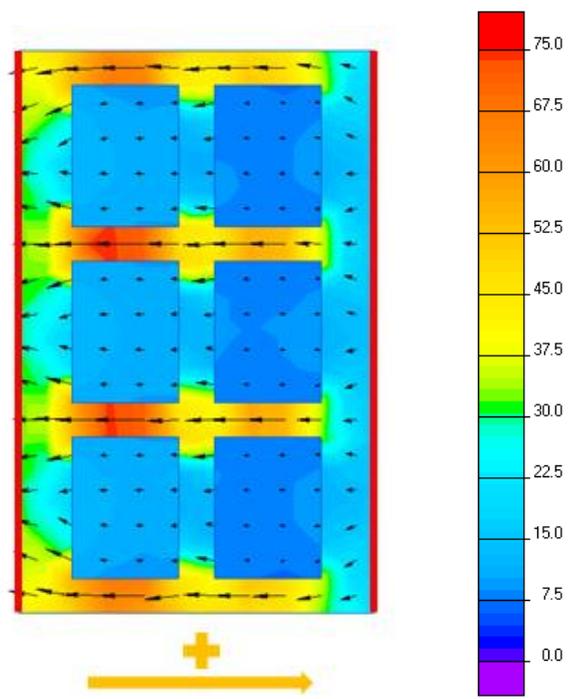


Figura 9 – transferência de calor através do modelo de referência em um instante de tempo qualquer (densidade de fluxo de calor em W/m²).

Na Tabela 3 são apresentados os valores da densidade de fluxo de calor encontrados para as superfícies internas e externas do modelo de referência e equivalente para um período de 24h00. A determinação da densidade de fluxo de calor foi obtida por meio da Equação (11), uma vez que o programa *QuickField* fornece apenas resultados referentes ao fluxo de calor, sendo necessária a divisão do fluxo de calor pela área da superfície analisada.

$$q = \frac{\phi}{A} \tag{11}$$

Onde,

q = densidade de fluxo de calor (W/m²);

ϕ = fluxo de calor (W);

A = Área da superfície do módulo (m²).

Tabela 3 - Valores da densidade de fluxo para os modelos de referência e equivalente.

Modelo de referência			Modelo equivalente			Modelo de referência <i>versus</i> equivalente		
Densidade de fluxo de calor (W/m ²)			Densidade de fluxo de calor (W/m ²)			Variação da densidade de fluxo de calor (W/m ²)		
t (h)	Superfície externa	Superfície interna	t (h)	Superfície externa	Superfície interna	t (h)	Superfície externa	Superfície interna
9	21,15	-9,38	9	19,29	-8,21	9	1.87	-1.17
10	28,79	-4,07	10	26,32	-1,89	10	2.46	-2.18
11	34,46	1,51	11	31,57	4,55	11	2.89	-3.04
12	37,78	6,99	12	34,66	10,69	12	3.12	-3.70
13	38,52	12,00	13	35,39	16,10	13	3.14	-4.10
14	36,65	16,18	14	33,70	20,41	14	2.94	-4.22
15	32,27	19,27	15	29,72	23,33	15	2.55	-4.06
16	25,70	21,04	16	23,72	24,66	16	1.98	-3.62
17	17,37	21,38	17	16,10	24,30	17	1.27	-2.93
18	7,86	20,26	18	7,38	22,30	18	0.48	-2.04
19	-2,18	17,76	19	-1,84	18,77	19	-0.34	-1.01
20	-12,08	14,05	20	-10,94	13,97	20	-1.14	0.08
21	-21,15	9,38	21	-19,29	8,21	21	-1.87	1.17
22	-28,79	4,07	22	-26,33	1,89	22	-2.46	2.18
23	-34,46	-1,51	23	-31,57	-4,55	23	-2.89	3.04
24	-37,78	-6,99	24	-34,66	-10,69	24	-3.12	3.70
1	-38,52	-12,00	1	-35,39	-16,10	1	-3.14	4.10
2	-36,65	-16,18	2	-33,70	-20,41	2	-2.94	4.22
3	-32,27	-19,27	3	-29,72	-23,33	3	-2.55	4.06
4	-25,70	-21,04	4	-23,72	-24,66	4	-1.98	3.62
5	-17,37	-21,38	5	-16,10	-24,30	5	-1.27	2.93
6	-7,86	-20,26	6	-7,38	-22,30	6	-0.48	2.04
7	2,19	-17,76	7	1,84	-18,77	7	0.34	1.01
8	12,08	-14,05	8	10,94	-13,97	8	1.14	-0.08

t – tempo (horas)

Através dos resultados, é possível verificar que o modelo de referência apresenta uma amplitude maior quanto à densidade de fluxo de calor que passa pelo elemento. Essa maior variação em relação ao modelo equivalente mostra que o modelo de referência simulado é mais sensível às variações de temperatura. A variação média absoluta foi de 2,02 W/m² e 2,68 W/m² para as superfícies externas e internas, respectivamente, do modelo de referência. A partir da Figura 10 é possível verificar que as densidades de fluxo de calor da superfície externa e da superfície interna em um mesmo instante de tempo são diferentes, contudo, o somatório da diferença entre estes valores para um período de 24h é nulo.

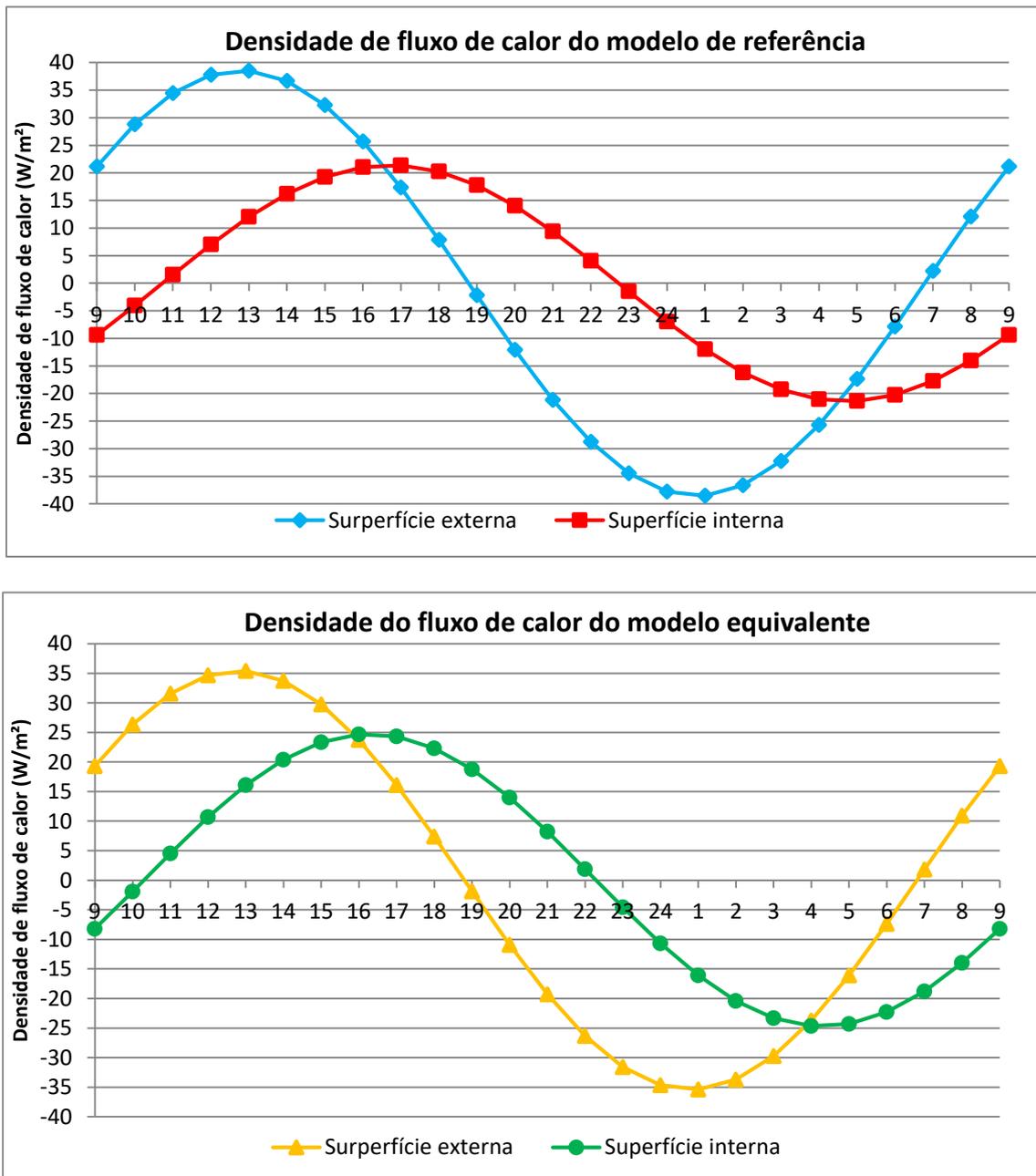


Figura 10. Variação da densidade de fluxo de calor em função do tempo para os modelos simulados.

O maior fluxo de calor que passa pela superfície externa em módulo é de $38,52 \text{ W/m}^2$, ocorrendo às 13h00 (temperatura externa de 27°C) e às 1h00 (temperatura externa de 15°C) para o modelo de referência. Para o modelo equivalente, o maior valor em módulo é um pouco menor, de $35,39 \text{ W/m}^2$.

Para a superfície interna, os valores de fluxo de calor são menores. No modelo de referência o maior valor em módulo ocorreu às 17h00 e às 5h00, com densidade de fluxo de calor de $21,38 \text{ W/m}^2$. No modelo equivalente este valor foi maior, de $24,66 \text{ W/m}^2$ e ocorreu uma hora antes dos valores máximos encontrados no modelo de referência.

Na Figura 11 podem ser observados o comportamento da densidade de fluxo de calor para as superfícies interna e externa dos dois modelos simulados. Verifica-se que na superfície externa, o modelo de referência apresentou maior amplitude quanto ao fluxo de calor em comparação ao modelo equivalente, com uma diferença em módulo de $3,14 \text{ W/m}^2$, às 13h00 e às 1h00. O comportamento oposto ocorreu para a superfície interna, onde a maior variação e o maior valor absoluto ocorreram para o modelo equivalente. A maior variação neste caso foi de $4,22 \text{ W/m}^2$ às 14h00 e às 2h00, com temperatura externa de $28,5^\circ\text{C}$ e $18,5^\circ\text{C}$, respectivamente. Contudo, o comportamento de ambos os modelos é bastante coerente, podendo o resultado ser refinado pelo balanceamento adequado das espessuras das camadas internas e externas da cerâmica.

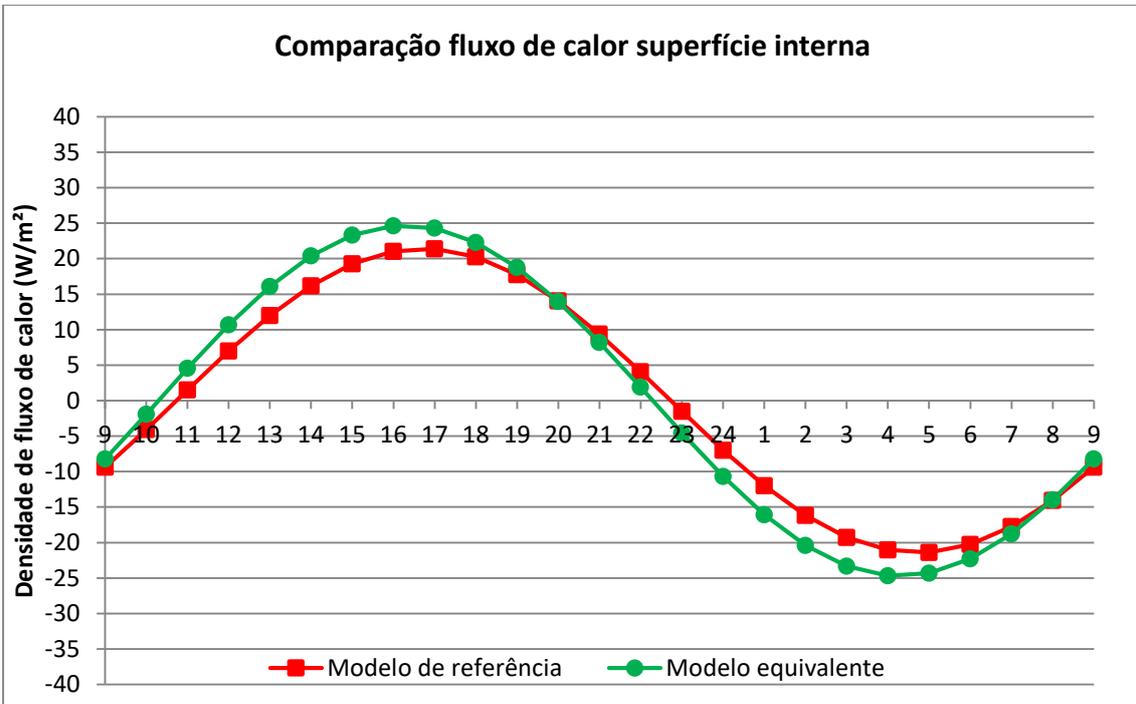
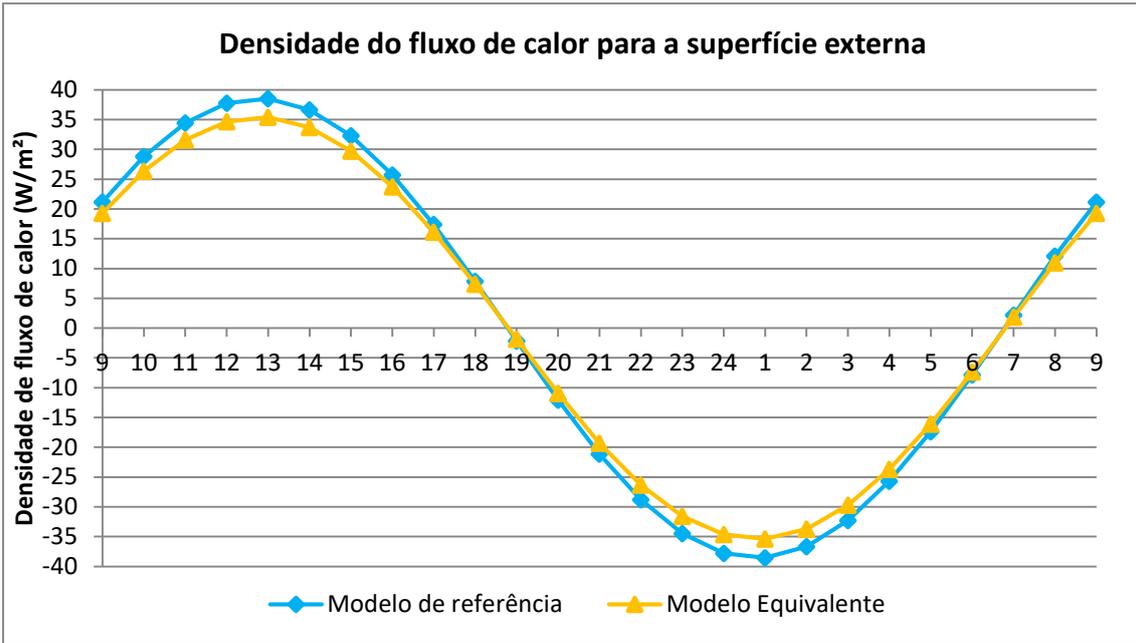


Figura 11. Comparação entre os modelos para as densidades de fluxo de calor.

2.2 Para coberturas

Para o caso dos elementos construtivos das coberturas, como telha, ático (câmara de ar entre o telhado e o forro) e forro ou laje, não foi necessário o cálculo de um material equivalente. Este tipo de cálculo só foi realizado em lajes que apresentaram câmaras de ar em seu interior, como por exemplo, da laje pré-moldada de lajotas cerâmicas e na laje protendida alveolar. Para estes casos, os cálculos para determinação do elemento equivalente da laje seguiram o mesmo método descrito para as paredes, levando em consideração que o fluxo para coberturas ocorre na direção vertical nestas situações. Para a simplificação dos cálculos de coberturas a NBR 15220 (ABNT, 2005b) altera a seção transversal dos telhados, criando um elemento equivalente, como mostra a Figura 12.

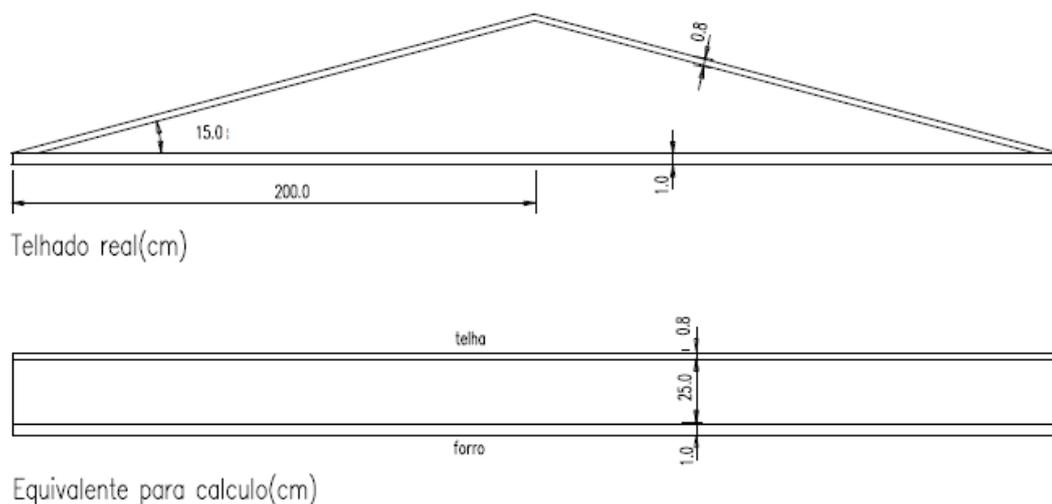


Figura 12 – Modelo equivalente para coberturas de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005b)

O elemento equivalente possui espessura da câmara de ar igual à metade da altura da cumeeira, tendo, portanto, uma resistência térmica constante em toda sua extensão ao invés da resistência térmica variável, como no caso do telhado real. Em câmaras de ar com espessura maior que 5 cm, a NBR 15220 (ABNT, 2005b) estabelece que a resistência térmica seja de $0,21 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para fluxo de calor descendente e $0,14 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para fluxo ascendente. Além disso, as resistências superficiais consideradas foram de $0,04 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para a resistência superficial externa (R_{se}) e de $0,17 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para a resistência superficial interna (R_{si}) no verão (ambiente interno recebe calor) e $0,10 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para o inverno (ambiente interno perde calor).

2.2.1 Regime permanente

O exemplo de cálculo foi realizado para uma cobertura de telha cerâmica com laje pré-moldada de 12 cm, considerando um período de verão. Como a laje pré-moldada possui câmaras de ar, inicialmente foi necessário determinar um elemento construtivo equivalente com as mesmas propriedades de capacidade e transmitância térmica. O procedimento para a determinação do modelo equivalente é o mesmo adotado para a determinação do elemento equivalente da parede. Através dos cálculos obteve-se o modelo equivalente para a laje pré-moldada apresentada na Figura 13.

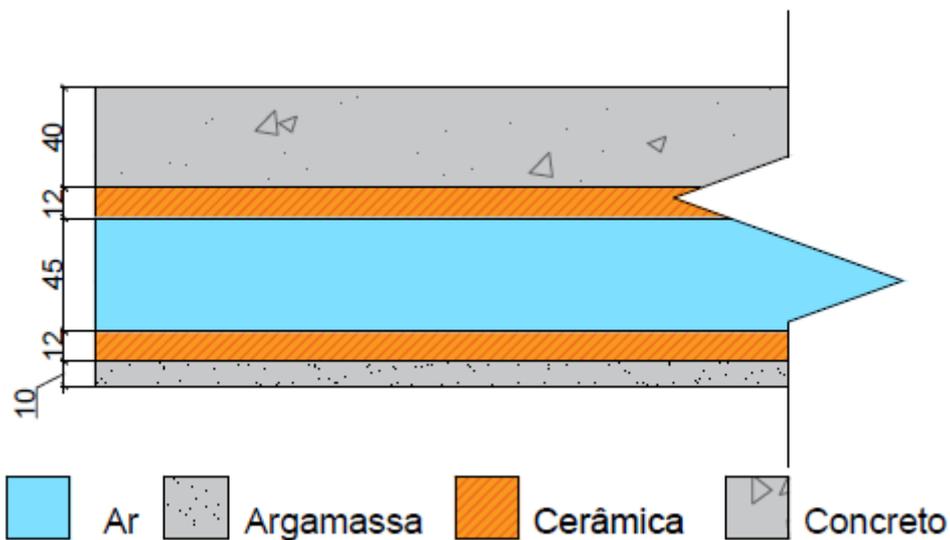


Figura 13 – Modelo equivalente para uma laje pré-moldada de cerâmica (cotas em mm).

A resistência térmica da laje calculada através do programa *Quickfield*, desconsiderando as resistências superficiais internas e externas, foi de $0,136 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$. A partir da simplificação proposta pela NBR 15220 (ABNT, 2005b), foi obtido o elemento para cobertura apresentado na Figura 14.

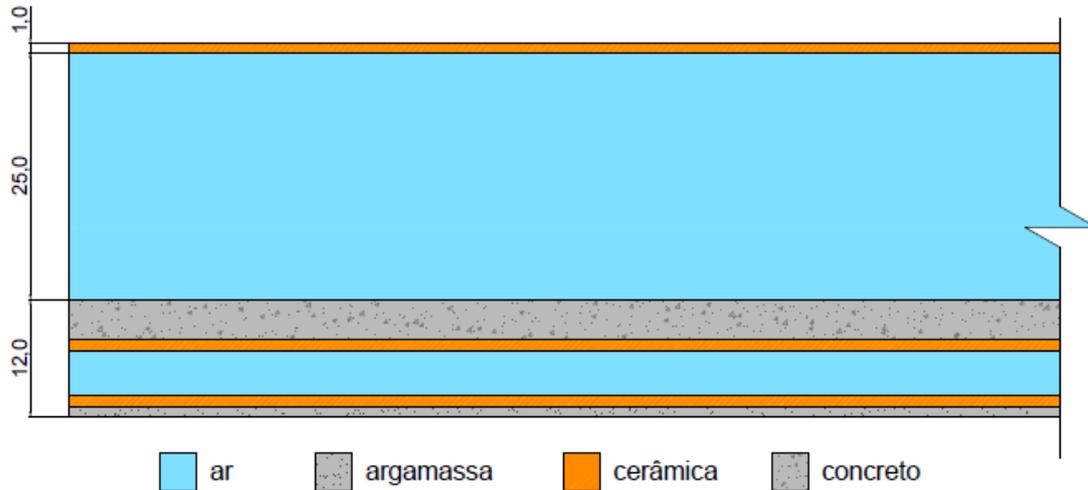


Figura 14 – Modelo equivalente de uma cobertura com telha cerâmica e laje pré-moldada (cotas em cm).

Para a câmara de ar da cobertura, considerando fluxo descendente (verão), a resistência é de $0,21 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}$ de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005b). Já para a telha, a resistência térmica (R_{telha}) pode ser obtida pela Equação (2), sendo a espessura da telha de 1 cm e a condutividade de $1,05 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{°C}$, tem-se que:

$$R_{\text{telha}} = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} = \frac{0,01}{1,05} = 0,00952 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

Como as camadas da cobertura estão em paralelo uma em relação a outra, a resistência total do elemento será obtida pelo somatório das resistências de todos os materiais que o constituem, somados ainda as resistências superficiais internas e externas para fluxo de calor descendente. Portanto:

$$R_T = \sum_{i=1}^k R_i = R_{\text{telha}} + R_{\text{ático}} + R_{\text{laje}} + R_{\text{se}} + R_{\text{si}}$$

$$R_T = 0,00952 + 0,21 + 0,136 + 0,04 + 0,17$$

$$R_T = 0,566 \text{ m}^2 \text{K}/\text{W}$$

Logo, a transmitância térmica total (U_T), obtida pela equação (3), será:

$$U_T = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,566} = 1,77 \text{ W}/\text{m}^2 \text{K}$$

Apesar da NBR 15220 (ABNT, 2005b) simplificar os cálculos da transmitância térmica determinando um elemento equivalente para a cobertura, o programa *Quickfield* permite que este cálculo seja realizado considerando a seção de um telhado real, sendo este determinado o modelo de referência (Figura 15).

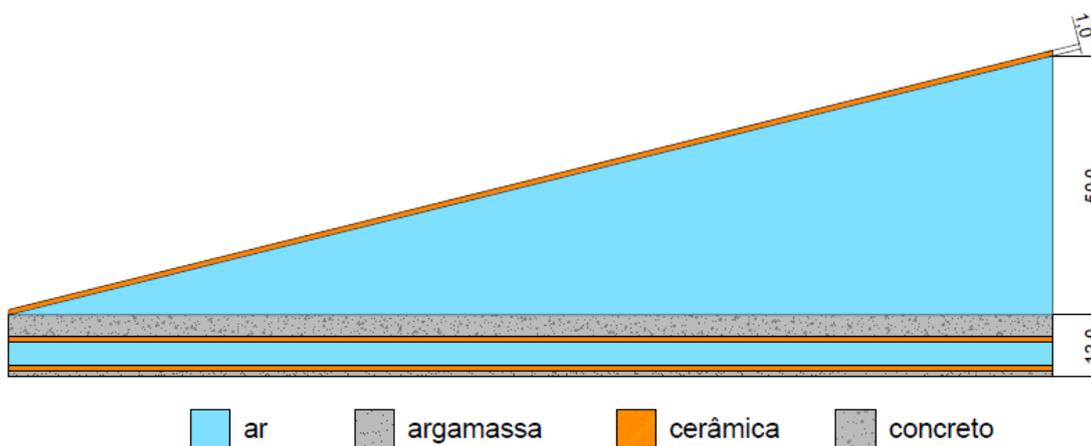


Figura 15 – Modelo de referência de uma cobertura com telhado cerâmico e laje pré-moldada (cotas em cm).

O modelo de referência determinado representa o elemento real. Entretanto, a resistência térmica do ático não foi determinada conforme o procedimento realizado para as paredes (por meio de iterações realizadas através da ferramenta *Quickfield*). A abertura do telhado é uma região de grande ventilação, definida na NBR 15220 (ABNT, 2005b) como câmara de ar muito ventilada, e a ferramenta de cálculo da resistência térmica fornece somente valores para câmaras de ar não ventiladas e pouco ventiladas. Dessa forma, optou-se por usar a resistência térmica de $0,21 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, valor adotado de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005b) para valores $> 5 \text{ cm}$. O resultado da transmitância térmica para este tipo de cobertura foi de $1,89 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, valor 6,8% superior que o modelo simplificado simulado pelo software ($1,77 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) e 5,6% maior do que o obtido pela NBR 15220 (ABNT, 2005b) ($1,79 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

2.2.2 Regime transiente

A primeira parte da análise, realizada em regime estacionário, busca validar os modelos elaborados no programa *Quickfield*. A segunda parte analisa o comportamento dos dois modelos quanto ao fluxo de calor para uma flutuação da temperatura externa de 12°C a

30°C, pela Equação (7), e temperatura interna constante em 21°C. Como no caso das paredes, o modelo foi simulado para 72 horas (3 dias) sendo analisado apenas as últimas 24 horas para que a variação do fluxo de calor em relação ao dia anterior seja estável.

Para coberturas ou elementos onde o fluxo de calor ocorre na direção vertical, a NBR 15220 (ABNT, 2005b) estabelece dois parâmetros de resistência de câmaras de ar e de resistência superficial interna. No modelo simulado neste estudo, o comportamento do fluxo de calor varia de sentido ao longo do dia, hora descendente (ganho de calor) e hora ascendente (perda de calor), sendo necessário a implementação de funções que simulassem estas variações.

Para a variação da resistência superficial interna foi utilizada a função *impulse* no programa *Quickfield* que permite determinar uma função por partes em relação ao tempo (Equação 12) que representa a função por partes em função da temperatura (Equação 13):

$$R_{si}(t) = R_T = \sum_{i=1}^k (R_{si}) * impulse(t, t_{i-1}, t_i) \quad (12)$$

$$R_{si}(T) = \begin{cases} 0,17 \text{ m}^2\text{C/W} & \text{se } T \geq 21^\circ\text{C} \\ 0,10 \text{ m}^2\text{C/W} & \text{se } T < 21^\circ\text{C} \end{cases} \quad (13)$$

Onde,

$t = \text{tempo (s)}$;

$T = \text{temperatura (}^\circ\text{C)}$.

Como a simulação foi realizada para um período de 72 horas (259200 segundos) a função escrita no programa ficou da seguinte forma:

$$R_{si}(t) = (0.17) * impulse(t, 0, 43199) + (0.10) * impulse(t, 43200, 86399) + (0.17) * impulse(t, 86400, 129599) + (0.10) * impulse(t, 129600, 172799) + (0.17) * impulse(t, 172800, 215999) + (0.10) * impulse(t, 216000, 259200)$$

Para a resistência da câmara de ar a norma NBR 15220 (ABNT, 2005b) especifica que o valor de 0,14 m².°C/W deve ser adotado para o fluxo ascendente, e o valor de 0,21 m².°C/W para fluxo descendente. A função por partes em relação à temperatura (T) que representa esta variação foi inserida no programa como demonstra a Equação 14. Os resultados obtidos para a simulação em regime transiente são apresentados na Tabela 4.

$$R_{ar}(T) = \begin{cases} 0,21 \text{ m}^2\text{C/W} & \text{se } T \geq 21^\circ\text{C} \\ 0,14 \text{ m}^2\text{C/W} & \text{se } T < 21^\circ\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

Onde,

$t = \text{tempo (s)}$;

$R_{ar}(T) = \text{Resist\^encia do ar em fun\c{c}\~ao da temperatura (m}^2\text{C/W)}$.

Os valores obtidos nos modelos de refer\^encia e equivalente mostram uma boa concord\^ancia entre si, tanto para a superf\^icie interna quanto para a superf\^icie externa. A maior varia\c{c}\~ao absoluta observada para a superf\^icie externa ocorreu \~as 12h00, com um valor de 3,67 W/m². Para a superf\^icie interna as varia\c{c}\~oes foram ainda menores, tendo como varia\c{c}\~ao m\~axima absoluta de 1,64 W/m² \~as 4h00.

Tabela 4 – Valores de densidade de fluxo para os modelos de referência equivalente e de uma cobertura.

Modelo de referência			Modelo equivalente			Modelo de Referência <i>versus</i> equivalente		
Densidade de fluxo de calor (W/m ²)			Densidade de fluxo de calor (W/m ²)			Variação densidade fluxo de calor (W/m ²)		
t (h)	Superfície externa	Superfície interna	t (h)	Superfície externa	Superfície interna	t (h)	Superfície externa	Superfície interna
9	21.07	-8.09	9	18.35	-7.82	9	2.72	-0.27
10	28.67	-6.57	10	25.13	-6.61	10	3.54	0.04
11	32.59	-4.45	11	29.45	-4.82	11	3.14	0.37
12	35.28	-2.01	12	31.61	-2.71	12	3.67	0.71
13	36.15	0.58	13	32.68	-0.45	13	3.47	1.03
14	34.64	3.14	14	31.69	1.83	14	2.95	1.30
15	30.77	5.49	15	28.57	3.99	15	2.20	1.50
16	24.78	7.48	16	23.51	5.87	16	1.27	1.61
17	17.08	8.96	17	16.84	7.34	17	0.24	1.61
18	8.22	9.83	18	9.03	8.32	18	-0.81	1.51
19	-1.22	10.03	19	0.60	8.73	19	-1.82	1.30
20	-10.57	9.55	20	-7.86	8.54	20	-2.71	1.01
21	-19.07	12.12	21	-15.70	11.17	21	-3.37	0.95
22	-27.47	8.75	22	-24.02	8.41	22	-3.45	0.34
23	-35.74	5.03	23	-32.11	5.25	23	-3.63	-0.23
24	-40.13	1.01	24	-36.94	1.72	24	-3.19	-0.71
1	-41.45	-3.05	1	-38.73	-1.94	1	-2.72	-1.10
2	-39.92	-6.88	2	-37.79	-5.49	2	-2.13	-1.40
3	-35.69	-10.25	3	-34.27	-8.67	3	-1.42	-1.57
4	-29.04	-12.91	4	-28.39	-11.27	4	-0.65	-1.64
5	-20.43	-14.69	5	-20.58	-13.11	5	0.15	-1.58
6	-10.42	-15.47	6	-11.36	-14.06	6	0.94	-1.41
7	0.29	-15.19	7	-1.36	-14.05	7	1.65	-1.14
8	10.97	-13.88	8	8.73	-13.09	8	2.24	-0.79

t – tempo (horas)

Essa concordância entre os resultados encontrados pode ser observada através da análise da variação média absoluta da densidade de fluxo de calor. Para a superfície externa a variação média absoluta foi de 2,25 W/m², enquanto que para a superfície interna foi de 1,05 W/m². A Figura 16 abaixo mostra estas variações do fluxo no decorrer de um dia. No período

entre 8h00 às 9h00 e 20h00 às 21h00 há uma variação relativamente brusca no fluxo de calor que passa pela superfície da cobertura. Essa mudança ocorre devido à variação não linear da função que representa a resistência superficial interna que varia de $0,17 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para $0,10 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ no decorrer do dia.

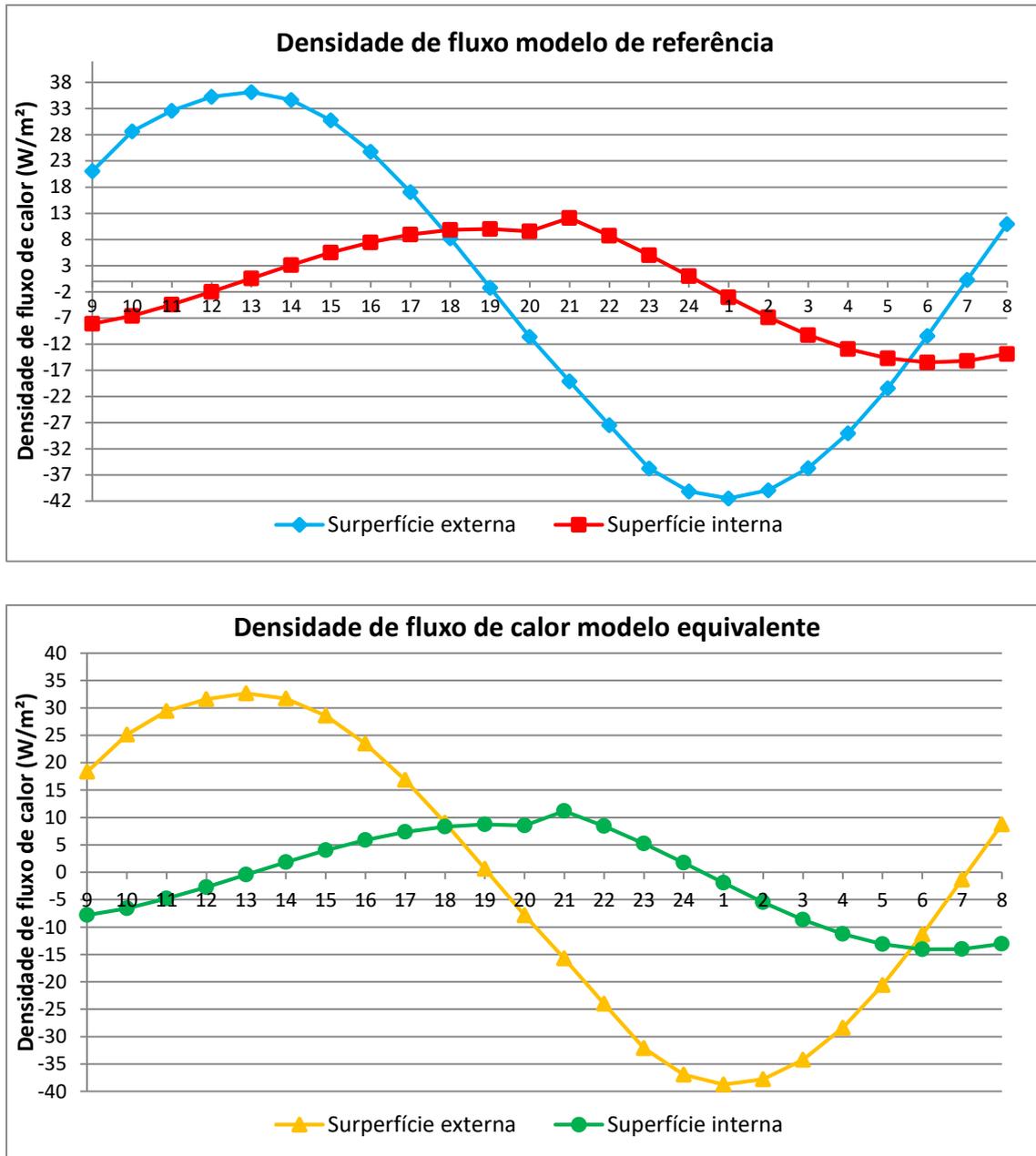


Figura 16 – Variação do fluxo de calor através das superfícies dos modelos simulados.

Na Figura 17 são realizadas as comparações dos modelos de referência e equivalente para a cobertura de telha cerâmica com laje pré-moldada.

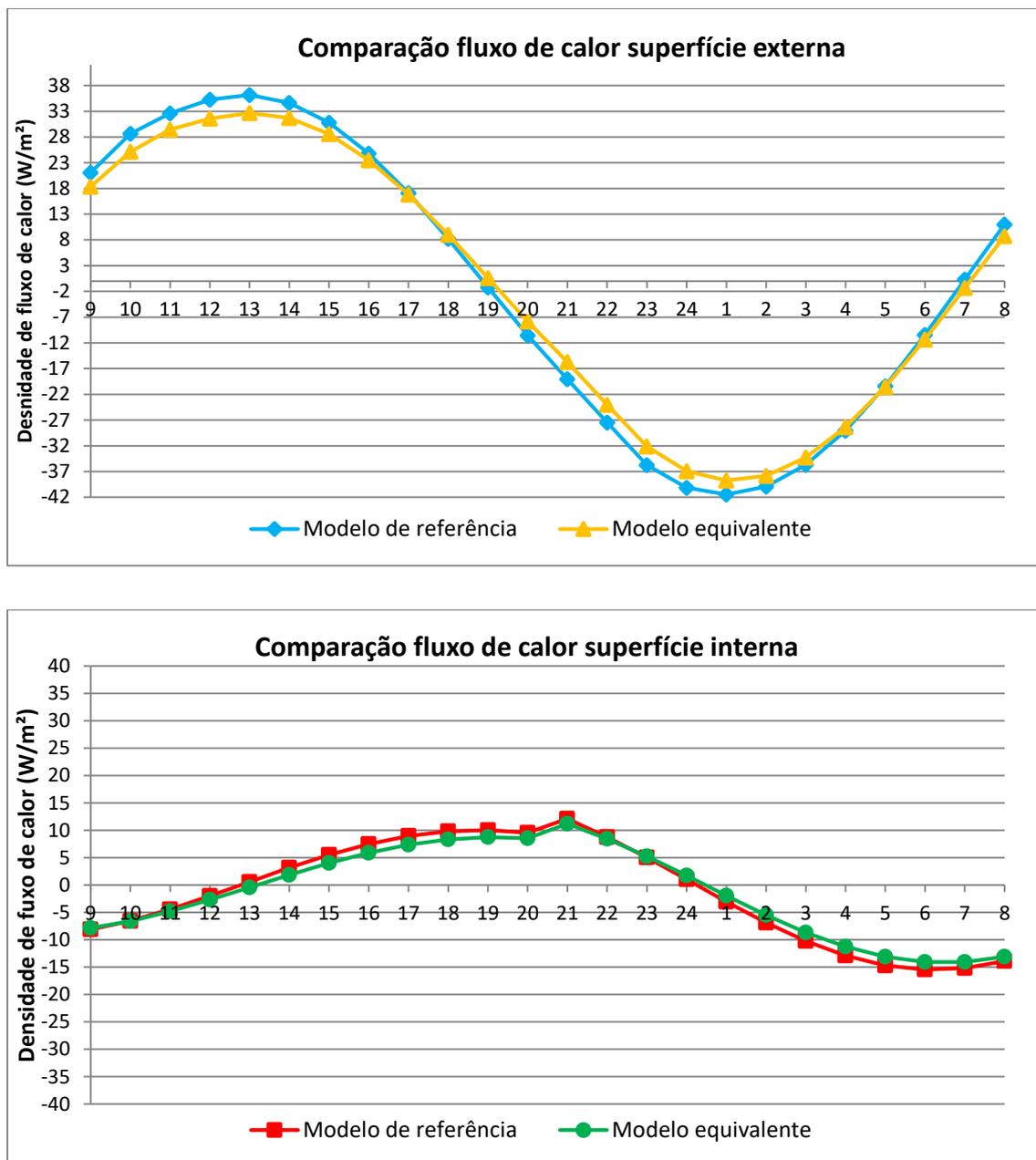


Figura 17 – Comparação da densidade de fluxo entre os modelos equivalente e de referência.

Pode-se observar que o modelo de referência é mais suscetível as mudanças de temperatura externa, já que apresenta maior intensidade de fluxo de calor através da superfície externa. O fluxo de calor que atravessa a superfície interna entre os dois modelos é praticamente o mesmo durante o dia, com uma intensidade um pouco maior observado no modelo de referência. Os maiores valores de fluxo de calor por unidade de área ocorreram às

13h00 e 1h00 da manhã para os dois modelos na superfície externa e às 21h00 e por volta das 6h30 para ambos os elementos no caso da superfície interna.

3 RESULTADOS

A Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7 apresentam os resultados das transmitâncias e capacidades térmicas encontradas para os modelos de paredes, pisos e coberturas calculados neste relatório aplicando o modelo de referência e equivalente. Para elementos construtivos que possuem valores iguais para as propriedades térmicas, optou-se por uni-los em apenas uma célula. Um maior detalhamento dos resultados, como as espessuras equivalentes dos elementos e suas respectivas propriedades térmicas está disponível no Anexo A deste documento.

Tabela 5 - Resumo geral dos resultados dos modelos de paredes calculados.

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)		
Mat ¹	LxAxP ² (cm)	Descrição	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente
Cerâmica	Bloco 4 furos 9x9x24	Sem revestimento Bloco 4 furos	2,99	2,93		42		
	Bloco 6 furos 9x14x24	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos	2,46	2,39		150		
		Gesso interno (2 cm) Bloco 6 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,37	2,21		120		
		Gesso interno (0,2 cm) Bloco 6 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,59	2,55		100		
		Sem revestimento Interno Bloco 6 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,61	2,72		98		
		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos Câmara Ar (5 cm) Placa alumínio Composto	0,65	0,75		102		
		Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos EPS (8 cm) Placa alumínio Composto	0,31	0,32		106		
		Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos Câmara Ar (5 cm) Placa melamínica	1,63	1,61		121		
		Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos EPS (8 cm) Placa melamínica	0,4	0,41		125		

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)			
Mat ¹	LxAxP ² (cm)	Descrição	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	
Cerâmica	Bloco 6 furos 9x14x24	Argamassa interna (2,5 cm) Bloco 6 furos Argamassa externa (2,5 cm) Placa granito (2,5 cm)	2,36		2,39			210	
	Bloco duplo 6 furos 9x14x24	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos Câmara Ar (4 cm) Bloco 6 furos	1,25		1,27			195	
		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 6 furos Lã de rocha (4 cm) Bloco 6 furos	0,63		0,68			199	
	Bloco 6 furos 14x9x24	Sem revestimento interno e externo Bloco 6 furos	2,37		2,35			56	
	Bloco 8 furos 9x19x19	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 8 furos	2,39		2,37			151	
	Bloco 8 furos 9x14x24	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 8 furos	2,24		2,13			155	
	Bloco 9 furos 14x19x29	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 9 furos	1,85		1,83			161	
		Gesso interna (2 cm) Bloco 9 furos Argamassa externa (2,5 cm)	1,74		1,68			125	
		Gesso interna (0,2 cm) Bloco 9 furos Argamassa externa (2,5 cm)	1,85		1,80			105	
		Sem revestimento interno Bloco 9 furos Argamassa externa (2,5 cm)	1,96		2,02			106	
	Concreto	Bloco 2 furos 9x19x39	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos	2,78		2,79			209
			Gesso interna (2 cm) Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,72		2,53			178
			Gesso interna (0,2 cm) Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,97		2,90			159
			Sem revestimento Interno Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	3,00		3,01			157
Bloco 2 furos 14x19x39		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos	2,69		2,68			272	
		Gesso interna (2 cm) Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,64		2,44			241	
		Gesso interna (0,2 cm) Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,86		2,78			222	
		Sem revestimento Interno Bloco 2 furos Argamassa externa (2,5 cm)	2,87		2,87			221	

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)		
Mat ¹	LxAxP ² (cm)	Descrição	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente
Concreto	Bloco 2 furos 14x19x39	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Câmara Ar (5cm) Placa alumínio Composto	0,69		0,79			224
	Bloco 2 furos 14x19x39	Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos EPS (8 cm) Placa alumínio Composto	0,32		0,32			228
		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Câmara Ar (5 cm) Placa melamínica	1,82		1,75			242
		Argamassa. Interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos EPS (8 cm) Placa melamínica	0,42		0,42			246
		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Placa granito (2,5cm)	2,63		2,62			329
	Bloco duplo 2 furos 14x19x39	Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Câmara Ar (4cm) Bloco 2 furos	1,43		0,63			439
		Argamassa interna e externa (2,5 cm) Bloco 2 furos Lã de rocha (4 cm) Bloco 2 furos	0,9		0,29			441

¹ Material

² L= Largura; A= altura; e C= comprimento

Tabela 6 - Resumo geral dos resultados dos modelos de pisos e lajes calculados.

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)		
Tipo	LxAxC(cm) ¹	Descrição	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente
Laje Pré-moldada	Lajota Cerâmica 24x7x20	Concreto (4,0 cm) Lajota cerâmica (7 cm) Argamassa (1 cm)	2,95		2,89			167
	EPS 30x7x125	Concreto (4,0 cm) EPS (7 cm) Argamassa (1 cm)	2,29		1,80			132
Pisos	Laje nervurada ar 50x50x22,5	Piso cerâmico (0,75 cm) Contra piso (2 cm) Laje nervurada (22,5cm) Gesso (1 cm)	2,22		2,35			278
	Laje nervurada EPS 50x50x22,5	Piso cerâmico (0,75 cm) Contra piso (2 cm) Laje nervurada (22,5cm)	1,75		1,25			279
	Laje protendida. alveolar 17x15x100	Piso cerâmico (0,75 cm) Contra piso (2 cm) Laje Protendida (15cm)	2,48		2,78			369

¹ L= Largura; A= altura; e C= comprimento

Tabela 7 - Resumo geral dos resultados dos modelos de coberturas calculados.

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)		
Telha	Forro/laje	Descrição	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente
Cerâmica	Maciça concreto	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	2,05	2.24	2.05	238		
	Pré-moldada	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Laje pré moldada Cerâmica (12 cm)	1,79	1.89	1.77	185		
		Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Laje pré moldada EPS (12 cm)	1,52	1.34	1.26	150		
	PVC	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Forro PVC (1 cm)	1,75	1.86	1.75	21		
	Madeira	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Forro Madeira (1cm)	2,02	2.18	2.02	26		
	Gesso	Telha cerâmica (1 cm) Câmara de ar Forro gesso (3 cm)	1,94	2.08	1.94	37		
Fibrocimento	Maciça concreto	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	2,06	2,24	2,06	233		
	Pré-moldada	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje pré moldada Cerâmica (12 cm)	1,79	1,89	1,77	180		
Fibrocimento	Pré-moldada	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje pré moldada EPS (12 cm)	1,52	1,34	1,26	145		
	PVC	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Forro PVC (1 cm)	1,76	1,86	1,76	16		
	Madeira	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Forro Madeira (1cm)	2,02	2,18	2,02	21		
	Gesso	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Forro gesso (3 cm)	1,95	2,09	1,95	32		
	Laje nervurada	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje nervurada Câmara de ar(22,5 cm)	1,55	1,61	1,61	237		
		Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje nervurada EPS (22,5 cm)	1,31	1,01	1,01	238		
Laje protendida alveolar	Fibrocimento (0,8 cm) Câmara de ar Laje protendida (15 cm)	1,75	1,93	1,81	268			

Elemento			Transmitância térmica (W/m ² .°C)			Capacidade térmica (kJ/m ² .°C)		
Telha	Forro/laje	Descrição	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referencia	Modelo equivalente
Metálica	Pré-moldada	Metálica (0,06 cm) Câmara de ar Laje pré moldada Cerâmica (12 cm)	1,82	1,92	1,80	169		
		Metálica (0,06 cm) Câmara de ar Laje pré moldada EPS (12 cm)	1,54	1,36	1,31	134		
Metálica sanduíche PU (40mm)	Maciça concreto	Telha metálica Sanduíche PU (4,2 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	0,55	0,84	0,55	230		
	Pré-moldada	Telha metálica Sanduíche PU (4,2 cm) Câmara de ar Laje pré moldada Cerâmica (12 cm)	0,53	0,77	0,53	176		
Metálica sanduíche EP S (40mm)	Maciça concreto	Telha metálica Sanduíche EPS (4,2 cm) Câmara de ar Laje maciça (10 cm)	0,68	0,88	0,68	229		
	Pré-moldada	Telha metálica Sanduíche EPS (4,2 cm) Câmara de ar Laje pré moldada Cerâmica (12 cm)	0,65	0,80	0,64	176		
Vegetado extensivo	Laje maciça concreto	Vegetação Terra argilosa seca (10cm) Laje maciça (10 cm)	2,18			363		
Vegetado extensivo	Laje pré-moldada cerâmica	Vegetação Terra argilosa seca (10cm) Laje pré moldada (12 cm)	1,88	1,86		310		
Vegetado intensivo	Laje maciça concreto	Vegetação Terra argilosa seca (40cm) Laje maciça (10 cm)	0,96			791		
	Laje pré-moldada cerâmica	Vegetação Terra argilosa seca (40cm) Laje pré moldada (12 cm)	0,90			738		

4 LIMITAÇÕES DO PROGRAMA QUICKFIELD

Apesar da boa concordância entre os valores encontrados para os modelos adotados como exemplo para o desenvolvimento do estudo, o tijolo 6 furos e o telhado com laje pré-moldada, ressalta-se que o programa *QuickField* em sua versão educacional (utilizada neste estudo) apresenta algumas limitações para análise de elementos mais complexos.

A principal limitação do software está na restrição do número máximo de nós da malha do modelo, determinada em 255 nós para a versão educacional. Com esta restrição, a malha gerada pelo programa em elementos de grandes dimensões (como no caso das coberturas) apresenta pouca densidade de nós, criando um modelo com polígonos (elementos) de maiores dimensões e em menor quantidade, como mostra a Figura 18. Como os cálculos se baseiam no método dos elementos finitos, a solução do problema é feita de maneira aproximada, sendo mais precisa quanto maior for o número de “elementos” do modelo.

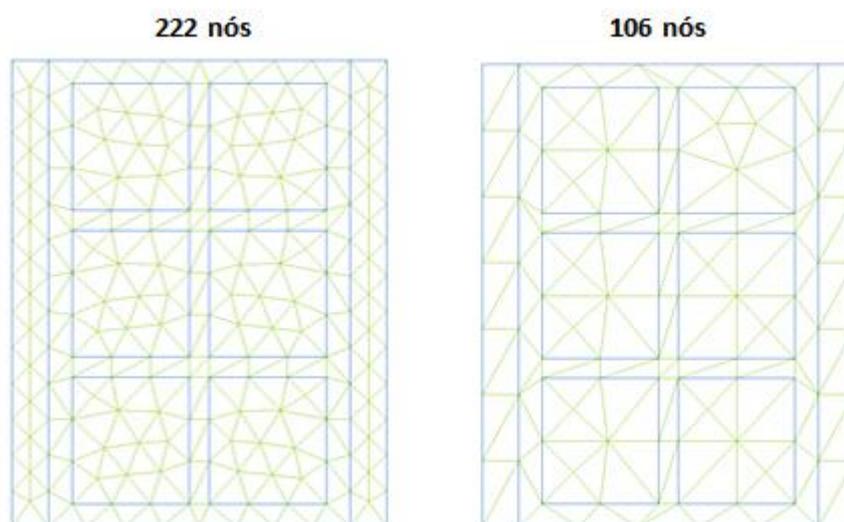


Figura 18 – Variação da quantidade de nós para um determinado modelo.

Outro fator limitante do programa *QuickField* para a versão utilizada, é a modelagem em somente em duas dimensões (2D). Para o caso da parede apresentada neste relatório, a argamassa de assentamento da região posterior do tijolo foi compensada pelo aumento da altura da camada localizada na parte superior do bloco cerâmico para que não houvesse perda de massa, e conseqüentemente alteração nos valores de transmitância e capacidade térmica.

5 CONCLUSÃO

Este estudo apresentou uma metodologia para a caracterização de componentes construtivos adequados à realidade brasileira, onde foi determinado um modelo equivalente de parede com tijolo de 6 furos e um modelo equivalente de uma cobertura com laje pré-moldada e telhas cerâmicas. As simulações foram realizadas para um período de 24 horas, considerando flutuações da temperatura externa com amplitude de 18°C.

Todos os parâmetros recomendados pela NBR 15220 se mostraram coerentes entre os resultados dos modelos de referência e equivalentes. Portanto, conclui-se que com base neste método de cálculo e com base nos resultados obtidos, foi possível representar um elemento construtivo por meio de um modelo equivalente para a construção de uma biblioteca de materiais, sem a perda de informações quanto às características, propriedades e comportamento destes elementos em simulações realizadas em regime transiente.

Além dos dois exemplos apresentados neste relatório, foram criados mais 35 componentes para paredes, 5 para pisos e 24 para coberturas. Esta grande variedade de elementos construtivos permite a criação de diversos tipos de envoltórias para cada uma das zonas bioclimáticas do Brasil, possibilitando ao usuário a escolha dos componentes construtivos que proporcionam um melhor desempenho energético na edificação, diminuindo assim, a demanda por energia para o condicionamento do ambiente interno.

No mais, este trabalho fornece embasamento para a criação de outros elementos construtivos, permitindo que pesquisadores e indústrias fornecedoras destes materiais trabalhem em conjunto para o desenvolvimento de novos componentes que possam ser caracterizados e inseridos nesta biblioteca.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 15220-1. **Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades.** Janeiro, 2005a.

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 de calor solar de elementos e componentes de edificações.** Janeiro, 2005b.

ABNT NBR 15220-3. **Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social.** Janeiro, 2005c.

ENERGYPLUS. **Programa de simulação computacional.** Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Acesso em: 04 de jan 2017.

ISO 10077. **Thermal performance of windows, doors and shutters — Calculation of thermal transmittance.** International Organization for standardization, 2012.

ORDENES M., *et al.* **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1.** Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Núcleo de Pesquisa em Construção, Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TERA ANALYSIS LTD. **Desenvolvedora de softwares de simulação computacional.** Disponível em: < <http://www.teraanalysis.com/>>. Acesso em: 04 de dez 2016.

TERA ANALYSIS LTD. **QuickField 6.2, User's guide.** Disponível em: < <http://www.quickfield.com/demo/manual.pdf>>. Acesso em: 04 de dez 2016.

ANEXO

Anexo A – Propriedades térmicas de paredes, pisos e coberturas equivalentes simulados no programa Quickfield

Abaixo seguem os significados dos itens das tabelas do Anexo A:

Mat - Material

e – espessura (cm)

λ – condutividade térmica (W/m.°C)

ρ – peso específico aparente (kg/m³)

c – calor específico (kJ/kgK)

Rt – resistência térmica total (m².°C/W)

Ut – transmitância térmica total (W/m².°C)

Ct – capacidade térmica total (kJ/m².°C)

I. Paredes

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	Rt (m ² °C/W)	Ut (W/m ² °C)	Ct (kJ/m ² °C)
CERÂMICA	4 furos 9x9x24 cm	Sem revestimento	Cerâmica	1,40	0,900	1600	0,920	0,016	2,93	42
			Câmara de Ar	6,10	0,442	-	-	0,138		
			Cerâmica	1,40	0,900	1600	0,920	0,016		
	6 furos 9x14x24 cm	Sem revestimento	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015	2,75	39
			Câmara de Ar	6,32	0,389	-	-	0,162		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
		Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	150
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,361	-	-	0,175		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Gesso interno, argamassa externa	Gesso interno	2,00	0,350	900	0,870	0,057	2,21	120
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,364	-	-	0,174		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Placa gesso interna, argamassa externa	Placa de gesso interno	0,20	0,350	900	0,870	0,006	2,55	100
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,383	-	-	0,165		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Sem revestimento, Interno, argamassa externa	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015	2,72	98
	Câmara de Ar		6,32	0,433	-	-	0,146			
	Cerâmica		1,34	0,900	1600	0,920	0,015			
	Argamassa Externa		2,50	1,15	2000	1,00	0,022			

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)
CERÂMICA	6 furos 9x14x24 cm	Argamassa interna e externa, câmara de ar, alumínio composto	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1	0,022	0,75	102
			Cerâmica	1,34	0,9	1600	0,92	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,413	-	-	0,153		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			Câmara de Ar	5,00	0,269	-	-	0,186		
			Alumínio Composto	3,10	0,0413	2700	0,0462	0,751		
		Argamassa interna e externa, EPS, alumínio composto	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,32	106
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,482	-	-	0,131		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			EPS	8,00	0,040	35	1,40	2,000		
			Alumínio Composto	3,10	0,0413	2700	0,0462	0,751		
		Argamassa interna e externa, câmara de ar, placa melamínica	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1	0,022	1,61	121
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,372	-	-	0,170		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			Câmara de Ar	5,00	0,269	-	-	0,186		
			Placa Melamínica	0,600	0,270	1500	2,30	0,022		
		Argamassa interna e externa, EPS, placa melamínica	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,41	125
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,364	-	-	0,174		
Cerâmica	1,34		0,900	1600	0,920	0,015				
Argamassa Externa	2,50		1,15	2000	1,00	0,022				
EPS	8,00		0,04	35	1,40	2,000				
Placa Melamínica	0,60		0,270	1500	2,30	0,022				
Argamassa interna e externa, placa de granito	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	210		
	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015				
	Câmara de Ar	6,32	0,378	-	-	0,167				
	Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015				
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022				
	Granito	2,50	3,00	2600	0,800	0,008				

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)
CERÂMICA	Bloco duplo 6 furos 9x14x24 cm	Argamassa interna e externa com câmara de ar	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,27	195
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,382	-	-	0,165		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	4,00	0,218	-	-	0,183		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,382	-	-	0,165		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022				
	Bloco duplo 6 furos 9x14x24 cm	Argamassa interna e externa com lâ de rocha	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,68	199
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,639	-	-	0,099		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Lã de rocha	4,00	0,045	100	0,80	0,889		
			Cerâmica	1,34	0,900	1600	0,920	0,015		
			Câmara de Ar	6,32	0,639	-	-	0,099		
			Cerâmica	1,34	0,90	1600	0,920	0,015		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022				
	8 furos 9x19x19 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,37	151
			Cerâmica	1,30	0,900	1600	0,920	0,014		
			Câmara de Ar	6,40	0,356	-	-	0,180		
			Cerâmica	1,30	0,900	1600	0,920	0,014		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	8 furos 12x19x19 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,13	155
			Cerâmica	1,30	0,900	1600	0,920	0,014		
			Câmara de Ar	9,40	0,414	-	-	0,227		
			Cerâmica	1,30	0,900	1600	0,920	0,014		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
6 furos 14x9x24 cm	Sem revestimento	Cerâmica	1,90	0,900	1600	0,920	0,021	2,35	56	
		Câmara de Ar	10,2	0,48	-	-	0,213			
		Cerâmica	1,90	0,900	1600	0,920	0,021			
9 furos 14x19x29 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,83	161	
		Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
		Câmara de Ar	10,7	0,360	-	-	0,297			
		Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
		Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022			

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)	
CERÂMICA	9 furos 14x19x29 cm	Gesso interno, argamassa externa	Gesso interno	2,00	0,35	900	0,870	0,057	1,68	125	
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
			Câmara de Ar	10,7	0,344	-	-	0,311			
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022			
		Placa gesso interna, argamassa externa	Placa gesso interna	0,200	0,350	900	0,870	0,006	1,80	105	
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
			Câmara de Ar	10,7	0,332	-	-	0,322			
			Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018			
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022			
	Sem revestimento Interno, argamassa externa	Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018	2,02	106		
		Câmara de Ar	10,7	0,400	-	-	0,268				
		Cerâmica	1,65	0,900	1600	0,920	0,018				
		Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022				
	CONCRETO	2 furos 9x19x39 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,79	209
				Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010		
				Câmara de Ar	5,54	0,443	-	-	0,125		
Concreto				1,73	1,75	2400	1,00	0,010			
Argamassa Externa				2,50	1,15	2000	1,00	0,022			
2 furos 9x19x39 cm		Gesso interno, argamassa externa	Gesso interno	2,00	0,350	900	0,870	0,057	2,53	178	
			Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010			
			Câmara de Ar	5,54	0,438	-	-	0,126			
			Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010			
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022			
2 furos 9x19x39 cm		Placa gesso interna, argamassa externa	Placa de gesso interno	0,200	0,350	900	0,870	0,006	2,90	159	
			Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010			
			Câmara de Ar	5,54	0,434	-	-	0,128			
			Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010			
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022			
2 furos 9x19x39 cm		Sem revestimento Interno, argamassa externa	Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010	3,01	157	
			Câmara de Ar	5,54	0,454	-	-	0,122			
	Concreto		1,73	1,75	2400	1,00	0,010				
	Argamassa Externa		2,50	1,15	2000	1,00	0,022				

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)
CONCRETO	2 furos 14x19x39 cm	Argamassa interna e externa	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,68	272
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,636	-	-	0,126		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Gesso interno, argamassa externa	Gesso interno	2,00	0,350	900	0,870	0,057	2,44	241
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,632	-	-	0,127		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Placa gesso interna, argamassa externa	Placa de gesso interno	0,200	0,35	900	0,870	0,006	2,78	222
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,625	-	-	0,128		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Argamassa interna e externa	Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017	2,87	221
			Câmara de Ar	8,00	0,654	-	-	0,122		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
		Argamassa interna e externa, câmara de ar, alumínio composto	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,79	224
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,860	-	-	0,093		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			Câmara de Ar	5,00	0,287	-	-	0,174		
		Argamassa interna e externa, EPS, alumínio composto	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,32	228
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
Câmara de Ar	8,00		0,632	-	-	0,127				
Concreto	3,00		1,75	2400	1,00	0,017				
Argamassa Externa	2,50		1,15	2000	1,00	0,022				
Eps	8,00		0,04	35,0	1,40	2,000				
Alumínio Composto	3,10	0,0413	2700	0,0462	0,751					

Mat	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)
CONCRETO	2 furos 14x19x39 cm	Argamassa interna e externa, câmara de ar, placa melamínica	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,75	242
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,627	-	-	0,128		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			Câmara de Ar	5,00	0,2870	-	-	0,174		
			Plcaca Melamínica	0,600	0,270	1500	2,30	0,022		
		Argamassa interna e externa, EPS, placa melamínica	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,42	246
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,719	-	-	0,111		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			EPS	8,00	0,04	3,0	1,40	2,000		
		Placa Melamínica	0,600	0,270	1500	2,30	0,022			
		Argamassa interna e externa, placa de granito	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,62	329
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Câmara de Ar	8,00	0,635	-	-	0,126		
			Concreto	3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
			Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
			Granito	2,50	3,00	2600	0,80	0,008		
		Bloco duplo 2 furos 14x19x39 cm	Argamassa interna e externa com câmara de ar	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,63
	Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar			8,00	0,143	-	-	0,559		
	Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar			4,00	0,217	-	-	0,184		
	Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar			8,00	0,143	-	-	0,559		
	Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa			2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Bloco duplo 2 furos 14x19x39 cm	Argamassa interna e externa com Lã de rocha	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,29	441
Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017			
Câmara de Ar			8,00	0,074	-	-	1,081			
Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017			
Lã de rocha			4,00	0,045	100	0,8	0,889			
Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017			
Câmara de Ar			8,00	0,074	-	-	1,081			
Concreto			3,00	1,75	2400	1,00	0,017			
Argamassa Externa			2,50	1,15	2000	1,00	0,022			

II. Pisos e lajes

Tipo	Bloco	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut(W/m² °C)	Ct (kJ/m²°C)
LAJE PRÉ-MOLDADA	Tabela cerâmica 24x7x20 cm	Capa de concreto e argamassa	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023	2,89	167
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
	EPS 30x7x125 cm	Capa de concreto e argamassa	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023	1,80	132
			EPS + concreto	7,00	0,223	373	1,00	0,314		
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
	PISOS	Laje nervurada com câmara de ar	Piso cerâmico e gesso	Piso cerâmico	0,750	1,05	2000	0,920	0,0071	2,35
Contra piso				2,00	1,15	2000	1,00	0,0174		
Concreto				9,85	1,75	2200	1,00	0,0563		
Câmara de ar				12,65	1,19	-	-	0,1063		
Gesso				1,00	0,350	900	0,870	0,0286		
Laje nervurada com EPS		Piso cerâmico e sem acabamento inferior	Piso cerâmico	0,750	1,05	2000	0,920	0,0071	1,25	279
			Contra piso	2,00	1,15	2000	1,00	0,0174		
			Concreto	7,50	1,75	2200	1,00	0,0429		
			EPS + concreto	15,0	0,287	401	1,00	0,5226		
Laje protendida alveolar		Piso cerâmico sem acabamento inferior	Piso cerâmico	0,750	1,05	2000	0,920	0,0071	2,57	369
			Contra piso	5,00	1,15	2000	1,00	0,0435		
			Concreto	5,00	1,75	2200	1,00	0,0286		
			Câmara de ar	5,00	0,735	-	-	0,0680		
	Concreto		5,00	1,75	2200	1,00	0,0286			

III. Coberturas

Telha	Forro / laje	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)	
CERÂMICA	Maciça de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	2,05	238	
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100			
			Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571			
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	1,77	185	
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100			
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023			
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011			
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081			
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011			
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009			
	EPS e revestimento interno de argamassa		Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	1,26	150	
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100			
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023			
			EPS + concreto	7,00	0,223	373	1,00	0,314			
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009			
	Forro	Forro de PVC		Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	1,75	21
				Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
				PVC	1,00	0,071	273	0,960	0,1410		
		Forro de madeira		Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	2,02	26
				Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
				Madeira	1,00	0,150	600	1,34	0,067		
Gesso			Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,920	0,0095	1,94	37	
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100			
			Gesso	3,00	0,350	900	0,870	0,086			
FIBROCIMENTO		Maciça de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	2,06	233
				Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
				Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571		
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Fibrocimento	0,800	0,95	1900	0,840	0,0084	1,77	180	
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100			
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023			
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011			
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081			
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011			
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009			
C	m	o	EPS e	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	1,26	145

Telha	Forro / laje	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)					
A	SAN	revestimento interno de argamassa	Câmara de ar	25,00	1,190	-	-	0,2100							
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023							
			EPS + concreto	7,00	0,223	373	1,00	0,314							
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009							
		Forro	Forro de PVC	Fibrocimento	0,80	0,950	1900	0,840	0,0084	1,76	16				
				Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100						
				PVC	1,00	0,071	273	0,960	0,1410						
			Forro de madeira	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	2,02	21				
				Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100						
				Madeira	1,00	0,150	600	1,34	0,067						
		Gesso	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	1,95	32					
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100							
	Gesso		3,00	0,350	900	0,870	0,086								
	Nervurada com câmara de ar	Revestimento interno em gesso	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	1,61	237					
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100							
			Concreto	9,85	1,75	2200	1,00	0,0563							
			Câmara de ar	12,65	1,19	-	-	0,1063							
			Gesso	1,00	0,350	900	0,870	0,0286							
	Nervurada com EPS	Sem acabamento inferior	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	1,01	238					
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100							
			Concreto	7,50	1,75	2200	1,00	0,0429							
			EPS + concreto	15,0	0,287	401	1,00	0,5226							
	Protendida alveolar	Sem acabamento inferior	Fibrocimento	0,800	0,950	1900	0,840	0,0084	1,81	268					
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100							
Concreto			5,00	1,75	2200	1,00	0,0286								
Câmara de ar			5,00	0,735	-	-	0,0680								
Concreto			5,00	1,75	2200	1,00	0,0286								
METÁLICA	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Aço	0,06	55	7800	0,460	0,0000	1,80	169					
			Câmara de ar	25	1,190	-	-	0,2100							
			Concreto	4	1,75	2200	1,00	0,023							
			Cerâmica	1,2	1,05	2000	0,920	0,011							
			Câmara de ar	4,6	0,565	-	-	0,081							
			Cerâmica	1,2	1,05	2000	0,920	0,011							
			Argamassa	1	1,15	2000	1,00	0,009							
		EPS e revestimento interno de argamassa	Aço	0,06	55	7800	0,460	0,0000	1,31	134					
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100							
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023							
			EPS + concreto	7,00	0,223	373	1,00	0,314							
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009							
			SAN	e c c	Sem	Aço + PU	4,20	0,0315			136	1,67	1,3334	0,55	230

Telha	Forro / laje	Revestimento	Composição	e (cm)	λ (W/m°C)	ρ (kg/m³)	c (kJ/kgK)	Rt (m²°C/W)	Ut (W/m²°C)	Ct (kJ/m²°C)
		acabamento superior e inferior	Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100	0,53	176
			Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571		
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Aço+PU	4,20	0,0315	136	1,67	1,3334		
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081		
			Cerâmica	1,2	1,05	2000	0,92	0,011		
Argamassa	1	1,15	2000	1	0,009					
METÁLICA SANDUÍCHE PE	Maciça de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Aço + PE	4,2	0,042	154	1,42	1,0000	0,68	229
			Câmara de ar	25	1,190	-	-	0,2100		
			Concreto	10	1,75	2200	1	0,0571		
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Aço+PE	4,2	0,042	154	1,42	1,0000	0,64	179
			Câmara de ar	25,0	1,190	-	-	0,2100		
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081		
Cerâmica			1,20	1,05	2000	0,920	0,011			
Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009					
VEGETADO EXTENSIVO	Maciça de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Terra argilosa seca	10,0	0,520	1700	0,840	0,1923	2,18	363
			Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571		
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Terra argilosa seca	10,0	0,520	1700	0,840	0,1923	1,86	310
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Argamassa	10,0	1,15	2000	1,00	0,009		
VEGETADO INTENSIVO	Maciça de concreto	Sem acabamento superior e inferior	Terra argilosa seca	40,0	0,520	1700	0,840	0,7692	0,96	791
			Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,0571		
	Pré-moldada	Tabela cerâmica e revestimento interno de argamassa	Terra argilosa seca	40,0	0,520	1700	0,840	0,7692	0,90	738
			Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Câmara de ar	4,60	0,565	-	-	0,081		
			Cerâmica	1,20	1,05	2000	0,920	0,011		
			Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		