

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARCELO ADRIANO FOGIATTO**

**AVALIAÇÃO DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE BLOCOS DE  
CONCRETO E CERÂMICA UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA**

**2015**

**MARCELO ADRIANO FOGIATTO**

**AVALIAÇÃO DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE BLOCOS DE  
CONCRETO E CERÂMICA UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

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

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos  
Santos

**PONTA GROSSA**

**2015**



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



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **AVALIAÇÃO DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE BLOCOS DE CONCRETO E CERÂMICA UTILIZADOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL**

por

**MARCELO ADRIANO FOGIATTO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 16 de junho de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos  
Orientador

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne  
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Membro Titular

Prof. Dr. Luiz Eduardo Melo Lima  
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior  
Coordenador do Curso

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

Dedico este trabalho à minha família e a todos que contribuíram para a realização dele. Muito obrigado.

## RESUMO

FOGIATTO, Marcelo Adriano. **Avaliação da transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica utilizados na construção civil**. 2015. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

Conhecer a transmitância térmica de blocos utilizados na construção civil é de grande importância para o estudo da eficiência energética de edificações. Deste modo, realizaram-se simulações da transferência de calor em blocos de concreto M-10 e M-15 e em blocos de cerâmica M-10 e M-15. A ferramenta utilizada para as simulações foi o ANSYS® Fluent®. Efetuaram-se simulações levando-se em conta os efeitos da radiação térmica nos blocos vazados padrão. Entre os principais resultados obtidos, destacam-se: a troca radiativa representa até 46% da transferência de calor através dos blocos; blocos de cerâmica têm transmitância até 61% menor que blocos de concreto de mesma espessura; os blocos com cavidades possuem transmitância até 64% menor que dos blocos maciços; e, devido à diferença encontrada entre os valores de transmitância utilizados como referência e os valores calculados, sugere-se que os valores de transmitância para blocos de concreto deveriam ser revisados.

**Palavras-chave:** Transmitância Térmica. Blocos de Concreto. Blocos de Cerâmica. Eficiência Energética.

## ABSTRACT

FOGIATTO, Marcelo Adriano. **Thermal transmittance evaluation of concrete and ceramic bricks used for construction**. 2015. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Federal Technology University - Parana. Ponta Grossa, 2015.

Knowing the thermal transmittance of bricks used for construction has great importance on buildings' thermal efficiency study. Heat transfer simulations were performed for M-10 and M-15 concrete and ceramic bricks. The ANSYS® Fluent® was the software used in these simulations. The simulations were performed considering thermal radiation heat transfer through hollow standard bricks. The main results obtained were: the radiative exchange can be responsible for 46% of the heat transfer through the bricks; ceramic bricks can have transmittance 61% lower than the transmittance of concrete bricks, considering the same thickness; the standard hollow bricks can have transmittance 61% lower than that of the massive bricks, considering the same materials; and the transmittance values used as standard for concrete bricks should be revised.

**Keywords:** Thermal Transmittance. Concrete Bricks. Ceramic Bricks. Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial do Brasil .....	11
Figura 2 - Parede plana com transferência de calor unidimensional .....	16
Figura 3 – Volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas .....	17
Figura 4 – Convecção natural em cavidade vertical .....	20
Figura 5 – Intensidade de radiação .....	22
Figura 6 – Bloco de concreto M-10, dimensões em mm .....	27
Figura 7 – Bloco de concreto M-15, dimensões em mm .....	27
Figura 8 – Bloco de cerâmica M-10, dimensões em mm .....	28
Figura 9 – Bloco de cerâmica M-15, dimensões em mm .....	28
Figura 10 – Malha gerada no trabalho .....	34
Figura 11 – Condições de contorno .....	35
Figura 12 – Perfil de temperaturas do benchmark para $Ra=10^5$ .....	38
Figura 13 – Perfil de temperaturas do pré-teste .....	40
Figura 14 – Comparação entre a transmitância térmica dos blocos com e sem radiação.....	42
Figura 15 – Comparação entre a transmitância térmica dos blocos de concreto e cerâmica de mesma espessura.....	43
Figura 16 – Comparação entre a transmitância térmica de blocos maciços e vazados .....	44
Figura 17 – Comparação entre a transmitância térmica calculada e o valor de referência .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica em diferentes materiais.....	15
Tabela 2 – Valores pesquisados de transmitância térmica .....	26
Tabela 3 – Hipóteses consideradas nas simulações.....	31
Tabela 4 – Parâmetros da malha no ANSYS®.....	33
Tabela 5 – Propriedades dos materiais sólidos .....	36
Tabela 6 – Valores de propriedades do ar para interpolação .....	36
Tabela 7 – Resumo da discretização espacial .....	37
Tabela 8 – Dados para o cálculo do número de Rayleigh .....	39
Tabela 9 – Valores obtidos de transmitância térmica .....	41



## LISTA DE SÍMBOLOS

a	Difusividade térmica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
A	Área [ $\text{m}^2$ ]
c	Calor específico [ $\text{J}/(\text{kg}.\text{K})$ ]
$E_b$	Emissão de um corpo negro [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$\dot{E}_g$	Taxa de geração de energia [W]
$\dot{E}_{st}$	Taxa de acúmulo de energia [W]
g	Aceleração da gravidade [ $9,81 \text{ m}/\text{s}^2$ ]
$\dot{g}$	Taxa de geração de energia por unidade de volume [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]
h	Coeficiente de transferência de calor por convecção [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ]
$h_r$	Coeficiente de transferência de calor por radiação [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ]
I	Intensidade de radiação [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{sr})$ ]
k	Condutividade térmica [ $\text{W}/(\text{m}.\text{K})$ ]
L	Lado do cubo [m]
P	Pressão [Pa]
q	Taxa de transferência de calor [W]
$q''$	Fluxo térmico [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
R	Resistência térmica [ $\text{m}^2.\text{K}/\text{W}$ ]
Ra	Número de Rayleigh
t	Tempo [s]
T	Temperatura [K]
$T_\infty$	Temperatura da corrente livre [K]
$T^*$	Temperatura adimensional
U	Transmitância térmica [ $\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$ ]
v	Velocidade [m/s]
$\alpha$	Absortividade
$\beta$	Expansividade do ar [1/K]
$\varepsilon$	Emissividade
$\mu$	Viscosidade dinâmica [ $\text{N}.\text{s}/\text{m}^2$ ]
$\nu$	Viscosidade cinemática [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\rho$	Massa específica [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,67.10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral.....	12
1.1.2 Objetivos Específicos.....	12
1.2 JUSTIFICATIVA.....	12
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>14</b>
2.1 CONDUÇÃO TÉRMICA EM PAREDE PLANA.....	14
2.1.1 Lei de Fourier.....	15
2.1.2 Equação da Difusão.....	16
2.2 CONVECÇÃO NATURAL EM CAVIDADES.....	19
2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA.....	21
2.4 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE BLOCOS DE CONCRETO.....	24
2.4.1 Resistência Térmica em Paredes Planas.....	24
2.4.2 Transmitância Térmica.....	25
2.4.3 Transmitância de Blocos de Concreto e Blocos Cerâmicos.....	26
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>29</b>
<b>4 METODOLOGIA</b> .....	<b>31</b>
4.1 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	31
4.2 RECURSOS UTILIZADOS.....	32
4.3 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	32
4.3.1 Malha.....	32
4.3.2 Condições de Contorno.....	34
4.3.3 Propriedades.....	35
4.3.3.1 Sólidos.....	36
4.3.3.2 Ar.....	36
4.3.4 Modelos Utilizados.....	36
4.3.5 Método de Solução.....	37
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO CONVECTIVO.....	38
5.2 ANÁLISE DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DOS BLOCOS.....	41
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>46</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>48</b>

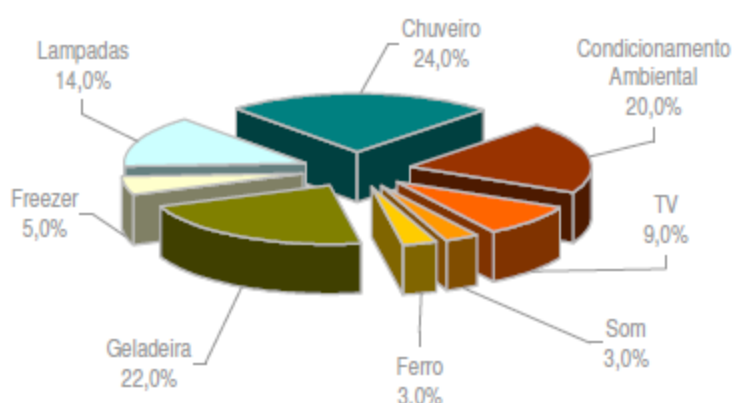
## 1 INTRODUÇÃO

Desde os tempos mais remotos, no início da humanidade, uma sensação térmica agradável sempre foi algo almejado. Formas de proteger o ser humano de intempéries foram sendo exploradas no decorrer da história. Primeiramente foram utilizados abrigos naturais, como cavernas, evoluindo gradualmente até as modernas formas de construção com os mais variados materiais, como pode ser visto atualmente. Além da utilização de abrigo, o ser humano também encontrou formas de conseguir conforto térmico em seu interior, utilizando dispositivos como lareiras, isolantes térmicos, ventilação natural ou artificial e condicionadores de ar. Esses elementos têm por objetivo gerar uma condição ambiental agradável para o indivíduo. No entanto, trocas térmicas ocorrem entre os ambientes externo e interno, causando impacto no tempo de utilização desses recursos para manter o conforto térmico no nível desejado.

A utilização de recursos, como a energia elétrica, para manter o ambiente interno de uma edificação em uma condição desejada, não deve ser feita de forma indiscriminada e com desperdícios. Quando uma edificação necessita de um menor fornecimento de energia que outra para manter certas condições ambientais, pode-se dizer que ela possui uma maior eficiência energética. No Brasil, para eletrodomésticos e automóveis, já existe um sistema de certificação energética, no qual é avaliado o consumo energético desses equipamentos e são emitidas etiquetas de eficiência, que vão de “A” para os de menor consumo até “E” para os de maior consumo. Essa certificação já é obrigatória para edifícios públicos federais de mais de 500 m<sup>2</sup> de área construída, e logo deve ser adotada pela iniciativa privada, visando a redução dos custos com energia. Como mostrado na Figura 1, o uso de dispositivos elétricos para o condicionamento ambiental de edificações é responsável por 20% do gasto de energia elétrica nas residências do Brasil.

Uma parcela significativa da energia gasta com a climatização de um ambiente se deve às trocas térmicas entre os meios externo e interno. Das principais formas de transferência de calor estudadas – condução, convecção e radiação – destaca-se, no que se refere à proteção térmica de ambientes, a condução, principalmente através das paredes. A condução de calor por uma parede ocorre em determinada direção quando há um gradiente de temperatura, com a energia sendo transmitida da superfície de maior temperatura para a de menor temperatura. Além

da diferença de temperatura, uma variável que influencia fortemente na condução é a condutividade térmica do envoltório. Essa propriedade varia conforme o material utilizado (valores altos para metais e valores baixos para polímeros). Em blocos com cavidade interna, a taxa de transferência de calor pode ser modificada pela radiação térmica e pela convecção natural do ar no interior da cavidade. Neste contexto, a transmitância térmica pode ser definida como o inverso da resistência térmica total, que depende de todas as formas de transferência de calor através do bloco.



**Figura 1 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial do Brasil**  
**Fonte: ELETROBRÁS (2007, p. 16)**

Dentre os materiais utilizados na construção de paredes, os blocos de concreto – também conhecidos como blocos de alvenaria estrutural – vêm ganhando cada vez mais destaque, substituindo os tijolos cerâmicos tradicionais. Isso se deve ao fato de possuírem resistência mecânica suficiente para sustentar boa parte da carga da edificação, diminuindo consideravelmente os recursos gastos com a construção de pilares e vigas, diferente da construção com blocos cerâmicos, que necessita desse tipo de artefato. Outras vantagens dos blocos de concreto são as grandes cavidades, que permitem a passagem de tubulações, maior velocidade de execução das obras e menor necessidade de quebras, gerando menos resíduos.

A interação entre as diferentes formas de transferência de calor nos blocos gera incertezas nos valores pesquisados da transmitância térmica. Os valores encontrados na literatura para a transmitância térmica em determinados blocos são escassos. Neste contexto, o objetivo deste trabalho visa contribuir com a verificação dos valores para a transmitância térmica de blocos utilizados em construções,

fornecidos pelos manuais de etiquetagem (Procel-Edifica), contribuindo com informações importantes para o processo de certificação energética de edificações.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Verificar os valores de transmitância térmica de blocos vazados de concreto e cerâmica fornecidos por Morishita et al. (2010), por meio da simulação da transferência de calor através do *software* ANSYS® Fluent®, levando em conta os efeitos de condução, convecção e radiação térmica.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar os valores normalizados de transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica vazados;
- Obter através de simulação com o auxílio do ANSYS® Fluent®, *software* CFD, os valores de transmitância térmica para os blocos;
- Analisar a influência dos modos de transferência de calor na transmitância térmica;
- Comparar os valores obtidos através da simulação para os blocos de concreto com os obtidos para os blocos de cerâmica de mesma espessura;
- Comparar os valores de transmitância obtidos através de simulação para blocos vazados com os obtidos para blocos maciços de mesma espessura;
- Comparar os valores obtidos na simulação aos valores normalizados.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que os valores encontrados na literatura para a transmitância térmica em determinados blocos são escassos e incertos, faz-se necessária a realização de um trabalho que possa fornecer dados mais apurados que possam ser úteis à certificação energética de edificações.

Blocos de concreto vêm sendo cada vez mais utilizados na construção civil, devido a vantagens como: menor gasto com vigas e pilares, passagem de tubulações pelas cavidades, maior velocidade de execução das obras e menor necessidade de quebras. Deste modo, torna-se interessante um estudo da sua contribuição no desempenho térmico de edificações, quando comparado ao dos blocos cerâmicos, já utilizados há mais tempo.

O uso adequado de uma ferramenta computacional (Fluent®) para a simulação da transmitância térmica torna-se interessante, devido à maior velocidade e menor custo comparando à construção de um protótipo e aquisição de equipamentos exclusivos para esse tipo de teste.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Calor pode ser definido como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como um resultado de uma diferença de temperatura entre esses sistemas. A transferência de calor, por sua vez, pode ser tida como a ciência responsável por quantificar as taxas de fluxo dessa energia. As principais formas de transferência de calor conhecidas são: condução térmica, convecção e radiação térmica.

Para a análise do desempenho térmico de edificações, é necessário o conhecimento prévio de alguns conceitos de transferência de calor, como as principais formas em que ela pode ocorrer: condução, convecção natural e radiação em cavidades. Outro tópico importante para o trabalho é uma revisão dos principais materiais utilizados em construções e suas características térmicas, devido à sua influência no fenômeno da transferência de calor, principalmente por condução.

### 2.1 CONDUÇÃO TÉRMICA EM PAREDE PLANA

A condução pode ocorrer em corpos nos estados sólido ou líquido estacionário. Do ponto de vista microscópico, a transferência de energia por condução ocorre quando uma partícula com estado de maior excitação entra em contato com uma partícula em situação de excitação mais baixa. Quanto maior seu estado de excitação, mais intenso é seu movimento vibratório.

Em metais, de acordo com Saavedra-Otero (2013), o mecanismo dominante é a transferência de energia por meio da movimentação dos elétrons livres, típicos de compostos formados por ligação metálica.

Em compostos não-metálicos, de ligações iônicas ou covalentes, a transferência de calor ocorre exclusivamente pelo contato de partículas de vibração mais intensa com as de vibração menos intensa. Segundo Bergman et al. (2011) essa troca de energia é causada por movimentos atômicos e o mecanismo é chamado de *lattice waves*, ou ondas de rede. Essas ondas também estão presentes nos metais, embora tenham efeito consideravelmente menor que a transferência de energia pelos elétrons (ROHSENOW et al., 1998).

A facilidade com que o calor consegue transpor uma barreira sólida pode ser quantificada em uma propriedade denominada condutividade térmica. Essa propriedade pode ser definida formalmente como a taxa de transferência de calor através de uma unidade de espessura do material por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura.

O valor da condutividade térmica depende da estrutura física da matéria, nos níveis atômico e molecular. Ou seja, o estado da matéria interfere nessa propriedade, assim como a temperatura. O valor da propriedade pode variar muito dependendo do tipo de material. Na Tabela 1 são mostradas faixas de valores aproximados de condutividade para diferentes tipos de material.

**Tabela 1 - Condutividade térmica em diferentes materiais.**

<b>Tipo de material</b>	<b>Condutividade térmica (W/(m.K))</b>
Gases	0,03 – 0,3
Isolantes	0,05 – 0,9
Líquidos	0,2 – 8
Sólidos não-metálicos	0,3 – 60
Ligas metálicas	9 – 200
Metais puros	9 – 500
Cristais não-metálicos	10 – mais de 1000

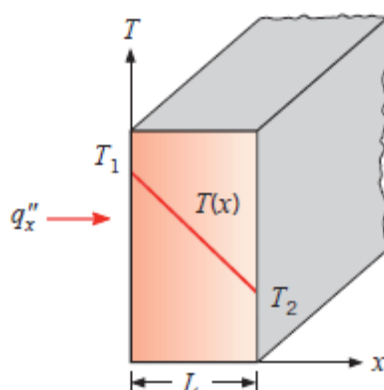
**Fonte: Adaptado de Çengel (2006, p. 21)**

Para o cálculo da condução térmica em paredes planas, são utilizadas a lei de Fourier e a equação da difusão, ambas em coordenadas cartesianas, que são detalhadas a seguir.

### 2.1.1 Lei de Fourier

Em 1822, Jean Baptiste Joseph Fourier realizou observações em relação à transferência de calor por condução em situações práticas. Uma dessas situações é mostrada de forma simplificada na Figura 2, que ilustra a transferência de calor unidimensional em uma parede plana, onde  $T(x)$  corresponde ao perfil de temperaturas na direção  $x$ ,  $q''_x$ , a taxa de transferência calor por unidade de área e  $L$ , a espessura da parede.





**Figura 2 - Parede plana com transferência de calor unidimensional**  
**Fonte: Bergman et al. (2011, p. 4)**

A observação do comportamento de  $q''_x$  no caso da Figura 2, com variações nos valores de  $L$  e  $T$ , levou à conclusão que  $q''_x$  é diretamente proporcional à diferença de temperaturas e inversamente proporcional à espessura da parede. A Lei de Fourier pode ser expressa pela Equação (1), onde  $k$  é a condutividade térmica do material da parede.

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Bergman et al. (2011) destacam que a taxa de transferência de calor por unidade de área – ou simplesmente fluxo de calor – é uma grandeza vetorial e, dessa forma, a Lei de Fourier pode ser expressa de forma mais generalizada, levando em conta as três direções do sistema cartesiano, como na Equação (2).

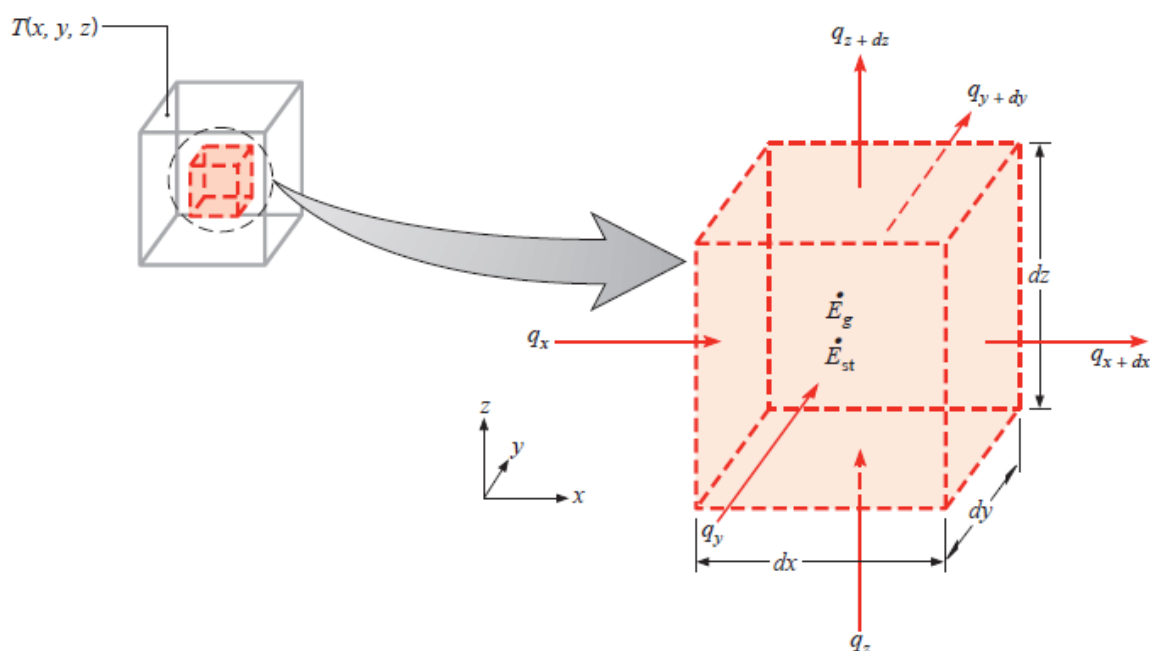
$$\vec{q} = -k \left( \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \right) \quad (2)$$

### 2.1.2 Equação da Difusão

Levando em conta um volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas, é possível analisar o balanço de energia por meio da Equação (3), de acordo com Çengel (2006), onde os termos “ $q$ ” referem-se às taxas de transferência de calor na entrada e saída do volume de controle,  $\dot{E}_g$  a taxa de energia gerada no volume de controle e  $\dot{E}_{st}$  a variação de energia interna no volume de controle.

$$q_x + q_y + q_z - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} + \dot{E}_g = \dot{E}_{st} \quad (3)$$

Na Figura 3 está representado o volume de controle diferencial e os termos da Equação (3).



**Figura 3 – Volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas**  
**Fonte: Bergman et al. (2011, p. 83)**

O quarto, quinto e sexto termos da Equação (3) podem ser expandidos em séries de Taylor, como mostrado nas Equações (4).

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (4a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (4b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (4c)$$

Os termos de geração de energia e variação de energia interna podem ser reescritos nas Equações (5) e (6), respectivamente, como mostrado por Holman (2010). Nessas equações,  $\dot{g}$  é a taxa de geração de energia por unidade de volume,

$\rho$  é a massa específica do material,  $c$  é o calor específico do material e  $t$  representa o tempo.

$$\dot{E}_g = \dot{q} \, dx \, dy \, dz \quad (5)$$

$$\dot{E}_{st} = \rho \, c \, dx \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial t} \quad (6)$$

Substituindo as Equações (4a), (4b) e (4c) na Equação (3), chega-se à Equação (7).

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} \, dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} \, dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} \, dz + \dot{E}_g = \dot{E}_{st} \quad (7)$$

Sabendo que a taxa de transferência de calor  $q$  é o produto do fluxo térmico  $q''$  pela área normal à direção do fluxo e utilizando a Lei de Fourier da Equação (1), são obtidas as Equações (8a), (8b) e (8c), respeitando a hipótese de material isotrópico em relação à condutividade térmica, como lembram Bergman et al. (2011).

$$q_x = -k \, dy \, dz \, \frac{\partial T}{\partial x} \quad (8a)$$

$$q_y = -k \, dx \, dz \, \frac{\partial T}{\partial y} \quad (8b)$$

$$q_z = -k \, dx \, dy \, \frac{\partial T}{\partial z} \quad (8c)$$

Substituindo as Equações (8a), (8b) e (8c) na Equação (7), tem-se como resultado a Equação (9). Considerando os valores de  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$  como constantes, eles podem ser retirados das derivadas.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial}{\partial x} \left( -k \frac{\partial T}{\partial x} \right) \, dx \, dy \, dz - \frac{\partial}{\partial y} \left( -k \frac{\partial T}{\partial y} \right) \, dx \, dy \, dz - \\ - \frac{\partial}{\partial z} \left( -k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \, dx \, dy \, dz + \dot{E}_g = \dot{E}_{st} \end{aligned} \quad (9)$$

Deste modo, se o meio for considerado isotrópico ( $k$  não depende da direção), a Equação (9) pode ser escrita na forma da Equação (10), que é a equação da difusão.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (10)$$

## 2.2 CONVECÇÃO NATURAL EM CAVIDADES

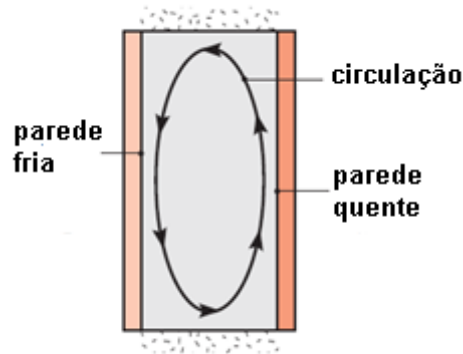
O fenômeno de convecção térmica ocorre entre uma superfície sólida e um fluido adjacente em movimento. Bergman et al. (2011) destacam que a convecção é composta de dois mecanismos: a difusão, que é provocada pelo movimento aleatório das moléculas, e a advecção, que é causada pelo movimento macroscópico do fluido.

A transferência de calor por convecção pode ser quantificada pela Lei de Resfriamento de Newton, mostrada na Equação (11), onde  $q$  é a taxa de transferência de calor;  $A$ , a área em contato com o fluido;  $h$ , o coeficiente de transferência de calor por convecção;  $T$ , a temperatura da superfície; e  $T_\infty$ , a temperatura do fluido adjacente.

$$q = h A (T - T_\infty) \quad (11)$$

Segundo Kreith et al. (2011), a convecção natural ocorre quando um corpo entra em contato com um fluido com temperatura diferente da sua. A transferência de calor entre o corpo e o fluido promove variações na massa específica do fluido adjacente. Deste modo, a porção de fluido com temperatura maior tende a subir e a de temperatura menor tende a descer.

Diversas configurações entre corpo e fluido já foram estudadas. Uma dessas configurações consiste em um corpo com uma cavidade retangular preenchida por fluido, com as paredes verticais em temperaturas diferentes. O fluido em contato com a parede mais quente tende a subir e o fluido em contato com a parede fria tende a descer, provocando uma circulação no interior da cavidade, conforme representado na Figura 4.



**Figura 4 – Convecção natural em cavidade vertical**  
**Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2011, p. 623)**

De forma geral, o movimento do ar em uma cavidade de perfil retangular pode ser modelado de acordo com as Equações da continuidade (12), de Navier-Stokes para fluidos newtonianos – (13a) a (13c) – e da energia (14), adaptadas de White (1991). Onde  $\vec{v}$  é o vetor da velocidade do fluido;  $v_x$ ,  $v_y$  e  $v_z$  são as componentes da velocidade;  $\rho$  é a massa específica,  $P$  é a pressão,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido,  $t$  é o tempo,  $u$  é a energia interna;  $g_x$ ,  $g_y$  e  $g_z$  representam a aceleração da gravidade em cada direção.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v_x \frac{\partial \rho}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho}{\partial z} + \rho \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \right) = & \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3}\mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] \end{aligned} \quad (13a)$$

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \right) = & \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} - \frac{2}{3}\mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] \\ & + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] \end{aligned} \quad (13b)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{2}{3} \mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] \quad (13c)$$

$$\begin{aligned} \rho \left[ \frac{\partial}{\partial t} \left( u + \frac{P}{\rho} \right) + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} \right] = & \\ = \frac{\partial P}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} + \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) + 2\mu \left[ \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] + & \\ + \mu \left[ \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 & \end{aligned} \quad (14)$$

Estudos numéricos sobre convecção natural em cavidades já foram conduzidos por Rubel e Landis (1969), Ishihara et al. (2000), Sigey et al. (2004) e Alam et al. (2012). Por outro lado, Aminossadati et al. (2014) e El-Maghlani et al. (2014) desenvolveram estudos de convecção natural em uma cavidade retangular utilizando um *software* de CFD, como realizado neste trabalho.

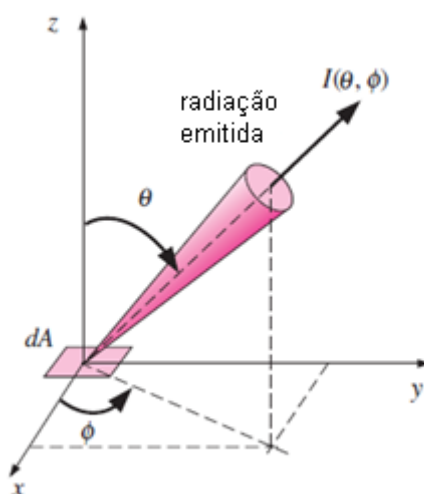
### 2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA

A radiação térmica pode ser definida como a energia emitida por qualquer corpo a uma temperatura não-nula. Essa energia é transportada por ondas eletromagnéticas ou fótons e não necessita de um meio material para o transporte (BERGMAN et al., 2011).

De acordo com Çengel (2006), todo corpo a uma temperatura maior que o zero absoluto emite radiação em todas as direções a diferentes comprimentos de onda. A fim de se descobrir qual a radiação máxima que pode ser emitida por um corpo a uma dada temperatura, foi desenvolvido o conceito de corpo negro. O corpo negro é tratado como um emissor e absorvedor perfeito de radiação. A radiação emitida  $E_b$  a partir de um corpo negro a uma temperatura  $T$  é dada pela Equação (15), onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$ ).

$$E_b = \sigma T^4 \quad (15)$$

Segundo Çengel (2006), a radiação é emitida por todas as partes de uma superfície plana em todas as direções no hemisfério acima da superfície, e a distribuição direcional dessa radiação normalmente não é uniforme. Dessa forma, a intensidade de radiação ( $I$ ) pode ser definida como a quantidade de radiação emitida em determinada direção no espaço. Resumidamente, pode-se afirmar que ela é usada para descrever como a radiação emitida por uma superfície varia com os ângulos  $\theta$  e  $\phi$ , representados na Figura 5.



**Figura 5 – Intensidade de radiação**  
**Fonte: Adaptado de Çengel (2006, p. 572)**

Outros conceitos importantes a serem citados quando se trata de radiação térmica são os conceitos de emissividade ( $\varepsilon$ ) e absorvidade ( $\alpha$ ).

A emissividade pode ser definida como a razão entre a radiação emitida por uma superfície a uma dada temperatura e a radiação emitida por um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade de uma superfície real é função da temperatura, comprimento de onda e direção na qual a radiação é emitida. Uma aproximação que simplifica essa grandeza é o conceito de corpo cinza, na qual se considera que a emissividade não varia com o comprimento de onda.

Quando certa quantidade de radiação incide sobre um corpo opaco, parte dessa radiação é absorvida e parte é refletida. A absorvidade pode ser definida como a razão entre a radiação absorvida e a radiação incidente. A lei de Kirchhoff, mostrada na Equação (16), simplifica a análise de absorvidade e emissividade de uma superfície, e de acordo com Çengel (2006), é válida quando as superfícies que emitem e absorvem radiação tem uma diferença de temperatura inferior a 100 K.

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (16)$$

Quando o meio participante da transferência de calor entre as superfícies é o ar, absorvidade do meio normalmente é considerada nula, como foi adotado para este trabalho. A presença de umidade e poeira no ar da cavidade pode fazer com que a absorvidade pouco superior a zero. Em pré-testes, utilizou-se absorvidade de 0,001 e não observou-se variação considerável nos resultados.

Para a solução de problemas de transferência de calor que envolvem radiação, foram desenvolvidos e incorporados a programas CFD diferentes modelos de radiação, como P-1, Rosseland, *Discrete Transfer (DTRM)*, *Discrete Ordinates (DO)* e *Surface to Surface (S2S)*. Uma comparação entre esses modelos foi realizada por Lu e Wang (2013).

Para este trabalho, optou-se pela solução de problemas utilizando o modelo DTRM, por ele ser relativamente simples, porém preciso, conforme afirmado por Lu e Wang (2013). Howell et al. (2011) descreve o DTRM como um modelo que consiste em determinar a intensidade com que cada vetor de radiação emitido a partir de uma superfície da cavidade atinge um elemento de área em outra superfície da mesma cavidade. Esse vetor de radiação tem sua intensidade modificada pelo meio a partir da origem, dependendo da absorvidade desse meio.

De acordo com Lu e Wang (2013), a mudança da intensidade de radiação  $dl$ , ao longo de um caminho  $ds$ , pode ser representada pela Equação (17), onde  $\alpha$  é a absorvidade do meio,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e  $T$  é a temperatura do meio.

$$\frac{dl}{ds} + \alpha \cdot l = \frac{\alpha \cdot \sigma \cdot T^4}{\pi} \quad (17)$$

Ainda de acordo com Lu e Wang (2013), no DTRM ocorre a integração da Equação (17), ao longo dos raios emitidos pelas superfícies internas da cavidade, o que resulta na Equação (18), onde  $I_0$  é a intensidade de radiação inicial, determinada pelas condições de contorno.

$$I(s) = \frac{\sigma \cdot T^4}{\pi} \cdot (1 - e^{-\alpha \cdot s}) + I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot s} \quad (18)$$



## 2.4 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE BLOCOS DE CONCRETO

Com base no enfoque deste trabalho, é importante o conhecimento de propriedades térmicas de alguns materiais utilizados em construções, principalmente a transmitância térmica.

### 2.4.1 Resistência Térmica em Paredes Planas

A resistência térmica pode ser tida como a resistência que um meio oferece à passagem de um fluxo térmico, da mesma forma que a resistência elétrica é a dificuldade que é imposta por um elemento à passagem de corrente elétrica.

Considerando a condução unidimensional em uma parede plana, a resistência térmica pode ser calculada pela Equação (19), de acordo com Çengel (2006), onde  $L$  é a espessura da parede,  $k$  é a condutividade térmica e  $A$  é a área transversal ao fluxo de calor.

$$R_A = \frac{L}{k A} \quad (19)$$

Segundo Bergman et al. (2011) os valores das resistências de convecção e radiação podem ser obtidas pelas Equações (20) e (21), respectivamente, onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção e  $h_r$  é coeficiente de transferência de calor por radiação.

$$R_B = \frac{1}{h A} \quad (20)$$

$$R_C = \frac{1}{h_r A} \quad (21)$$

De acordo com Kothandaraman (2006), quando há camadas diferentes de materiais condutores em contato térmico, uma resistência térmica passa a existir na região de contato, e é chamada de resistência de contato. Resistências de contato não foram consideradas neste estudo.

Em situações reais, raramente uma resistência aparece isoladamente. Por isso, é necessário entender as associações de resistências, que podem ser em série ou em paralelo. De acordo com Çengel (2006), no caso de resistências em série, a resistência equivalente pode ser calculada pela Equação (22), e para resistências em paralelo, o cálculo é pela Equação (23), sendo  $R_e$  a resistência equivalente para paredes com  $n$  camadas em série ou paralelo.

$$R_e = R_1 + \dots + R_n \quad (22)$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (23)$$

#### 2.4.2 Transmitância Térmica

Tendo obtido o valor total da resistência térmica, é possível obter o valor do coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ), também conhecido como transmitância térmica, dado pela Equação (24), citada por Holman (2010).

$$U = \frac{1}{R} \quad (24)$$

O valor da transmitância térmica ( $U$ ) também pode ser obtido a partir de uma adaptação da lei do resfriamento de Newton, como mostrado na Equação (25) – em função da taxa de transferência de calor ( $q$ ) – e na Equação (26) – em função do fluxo térmico ( $q''$ ) – onde  $A$  é a área transversal ao fluxo térmico e  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas das faces paralelas.

$$U = \frac{q}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (25)$$

$$U = \frac{q''}{(T_1 - T_2)} \quad (26)$$

### 2.4.3 Transmitância de Blocos de Concreto e Blocos Cerâmicos

Abordou-se neste trabalho a transmitância térmica de quatro blocos diferentes, sendo dois de concreto e dois de cerâmica. Os valores de transmitância térmica foram extraídos de Morishita et al. (2010) com o auxílio das Equações (19) e (22) a (24), sem considerar resistências de contato. As propriedades térmicas da cerâmica e do concreto também foram obtidas da Morishita et al. (2010). Os valores de transmitância térmica são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Valores pesquisados de transmitância térmica**

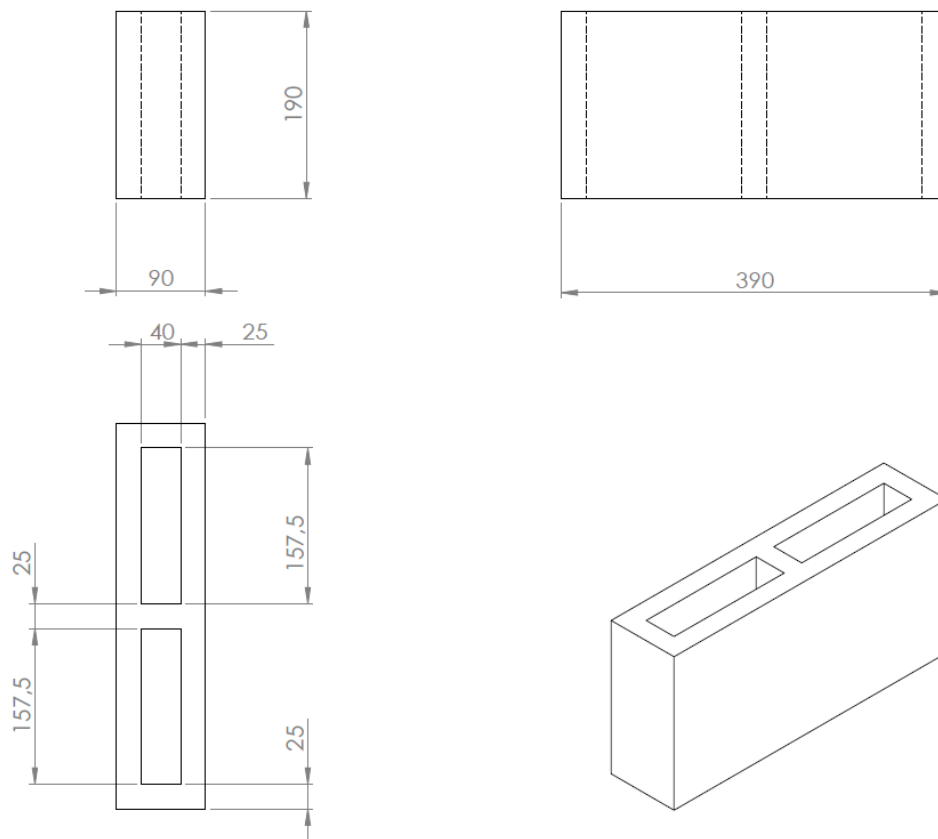
<b>Bloco</b>	<b>U (W/(m<sup>2</sup>K))</b>
Concreto M-10	3,313
Concreto M-15	3,136
Cerâmica M-10	2,919
Cerâmica M-15	2.167

**Fonte: Adaptado de Morishita et al. (2010, p. 4-7)**

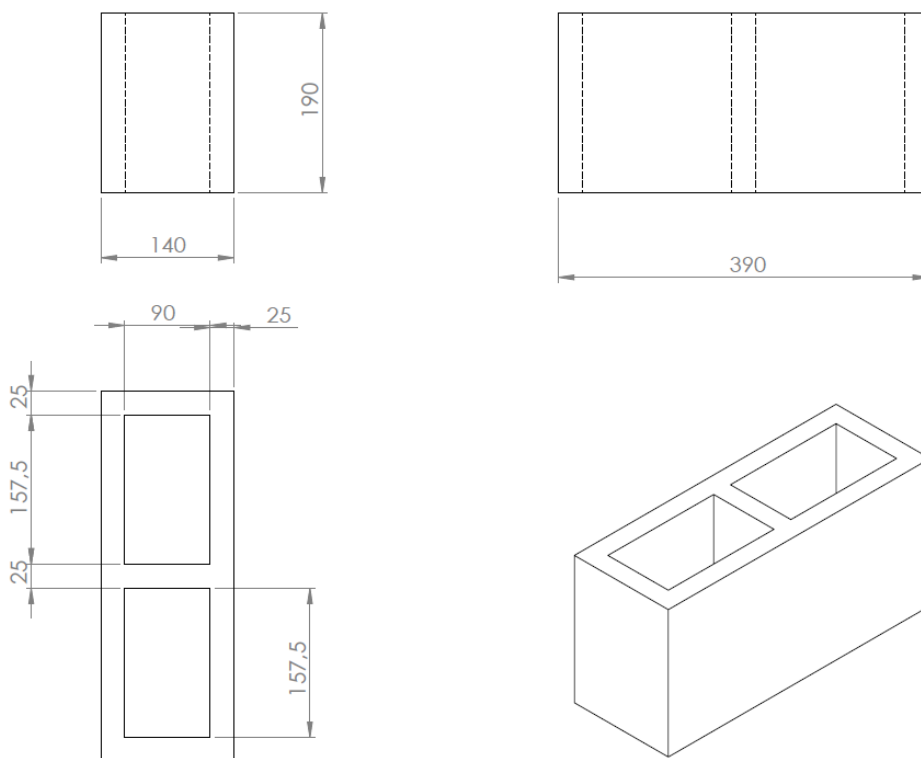
Os valores de transmitância térmica podem sofrer variações conforme a proporção dos elementos que formam os materiais. Para este estudo, foram adotados valores médios para as propriedades.

O bloco de concreto M-10 possui as dimensões aproximadas apresentadas na Figura 6, e o bloco de concreto M-15 tem as dimensões próximas às apresentadas na Figura 7, ambos em conformidade com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (1994).

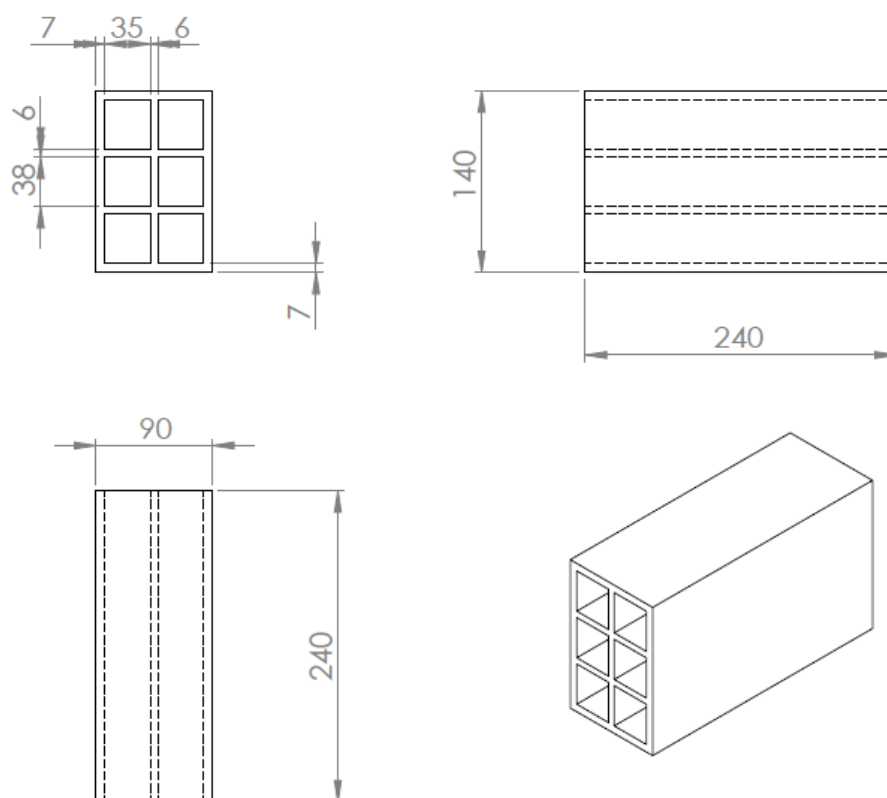
Os blocos de cerâmica M-10 e M-15 possuem dimensões aproximadas às apresentadas nas Figuras 8 e 9, respectivamente, estando adequados à norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005).



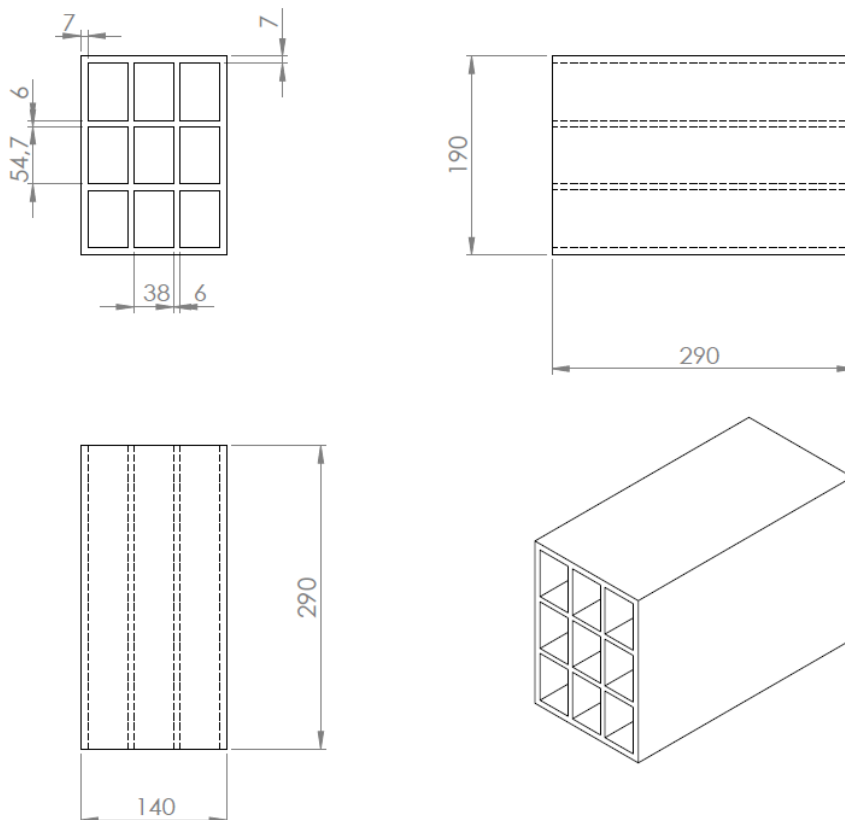
**Figura 6 – Bloco de concreto M-10, dimensões em mm**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 7 – Bloco de concreto M-15, dimensões em mm**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 8 – Bloco de cerâmica M-10, dimensões em mm**  
**Fonte: Autoria própria**



**Figura 9 – Bloco de cerâmica M-15, dimensões em mm**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresentam-se alguns trabalhos já realizados relacionados ao estudo da transmitância térmica de blocos utilizados na indústria da construção civil.

Coz Díaz et al. (2006) analisaram a transmitância térmica de paredes formadas por blocos de concreto vazados e camadas de isolante. Realizou-se uma análise numérica pelo método de elementos finitos e uma análise experimental para validação do resultado. O resultado da análise numérica foi satisfatório, diferindo em apenas 2,6% do resultado encontrado experimentalmente.

Li et al. (2008) descreveram uma análise numérica (método de volumes finitos) visando a otimização da transmitância térmica de blocos de cerâmica vazados, por meio da variação da quantidade e dimensões das cavidades. Concluiu-se que a troca radiativa no interior da cavidade não pode ser desprezada. Também observaram que a transmitância térmica pode aumentar ou diminuir, dependendo do número de cavidades. Por fim, encontrou-se uma configuração ótima de cavidades no bloco, na qual a transmitância térmica do bloco vazado representa 53,1% da transmitância de um bloco maciço de cerâmica.

Bouchair (2008) descreveu um estudo teórico sobre fatores que influenciam a transferência de calor em blocos vazados de cerâmica e sua relação com a diminuição da transmitância térmica das paredes. Verificou-se que a transmitância térmica das paredes pode ser diminuída de três formas: com o aumento da altura da cavidade em relação à sua espessura, com o preenchimento da cavidade com material isolante e com a diminuição da emissividade da superfície interna da cavidade.

Antar e Baig (2009) examinaram, por meio de simulação, a transferência de calor por condução e convecção natural através de blocos de cerâmica com cavidades. Os autores concluíram que, quanto maior o número de cavidades, considerando uma mesma espessura de bloco, menor a transmitância térmica do bloco.

Fioretti e Principi (2014) desenvolveram um estudo a respeito do desempenho térmico de blocos de cerâmica vazados, com revestimento de baixa emissividade no interior das cavidades. Quando consideram um revestimento com

emissividade de 0,1, a transmitância térmica dos blocos sofreu reduções entre 26 e 45%, dependendo da geometria do bloco.

Nos trabalhos citados, observa-se a necessidade de uma análise detalhada dos processos de transferência de calor nas cavidades dos blocos. Deste modo, no próximo capítulo, descreve-se a metodologia utilizada para a verificação da transmitância térmica dos blocos.

## 4 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados a organização estrutural do trabalho, os recursos utilizados e os parâmetros de simulação.

### 4.1 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho tem por objetivo obter a transmitância térmica de quatro tipos de blocos utilizados em construções. As condições de contorno e a malha utilizada serão as mesmas para todos os casos.

Cada tipo de bloco será submetido a três simulações diferentes. A primeira considerando condução através do bloco maciço, outra para convecção e condução na cavidade preenchida com ar (sem troca radiativa), e a terceira considerando simultaneamente os fenômenos de condução, convecção e radiação térmica, também com ar na cavidade.

Apresentam-se no Tabela 3, as doze simulações realizadas. Nos casos onde a radiação foi considerada, adotou-se o modelo DTRM para as simulações.

**Tabela 3 – Hipóteses consideradas nas simulações**

Nome	Bloco	Densidade do ar	Modos de transferência de calor		
			Condução	Convecção	Radiação
A1	concreto M-10	-	X	-	-
A2	concreto M-10	Peng-Robinson	X	X	-
A3	concreto M-10	Peng-Robinson	X	X	X
B1	concreto M-15	-	X	-	-
B2	concreto M-15	Peng-Robinson	X	X	-
B3	concreto M-15	Peng-Robinson	X	X	X
C1	cerâmica M-10	-	X	-	-
C2	cerâmica M-10	Peng-Robinson	X	X	-
C3	cerâmica M-10	Peng-Robinson	X	X	X
D1	cerâmica M-15	-	X	-	-
D2	cerâmica M-15	Peng-Robinson	X	X	-
D3	cerâmica M-15	Peng-Robinson	X	X	X

**Fonte: Autoria própria**



Através das simulações será obtido o fluxo térmico para cada configuração, necessário para obter a transmitância térmica através da Equação (26). O fluxo térmico obtido na seção “CFD-Post” do ANSYS® será o valor médio perpendicular às faces externas.

## 4.2 RECURSOS UTILIZADOS

Realizaram-se as simulações no Laboratório de Pesquisa Computacional do Câmpus Ponta Grossa da UTFPR. Utilizou-se um computador com sistema operacional Windows 7 Professional de 64 bits, processador Intel® Core™ i7 e 16 GB de memória RAM.

O pacote de programas utilizado para as simulações foi o ANSYS® Workbench™, versão 16.0. O programa CFD específico para uso na resolução dos problemas foi o ANSYS® Fluent®, revisão 16.0.0 da versão 16.0.

## 4.3 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Aborda-se nesta seção, os parâmetros utilizados para as simulações, como a malha utilizada, as condições de contorno, as propriedades do ar e dos materiais sólidos, os modelos selecionados e o método de solução dos problemas no programa.

### 4.3.1 Malha

Para o caso dos blocos com cavidade, cada bloco foi modelado como um corpo sólido acoplado a massas de ar delimitadas pelas geometrias das cavidades, havendo troca de calor entre o sólido e o ar. Os blocos maciços foram modelados como corpos sólidos.

A malha para a simulação foi feita pela técnica “*Assembly Meshing*” do ANSYS®, com o método “*CutCell*”. Essa técnica foi escolhida por ser a única que torna possível a utilização do modelo de radiação DTRM, selecionado para este trabalho. A variação do tamanho da malha (“*Inflation*”), que consiste na diminuição gradual da espessura dos elementos próximos à camada-limite, selecionada como

sendo automática, ou “*Program Controlled*”, com os parâmetros mantidos da forma padrão.

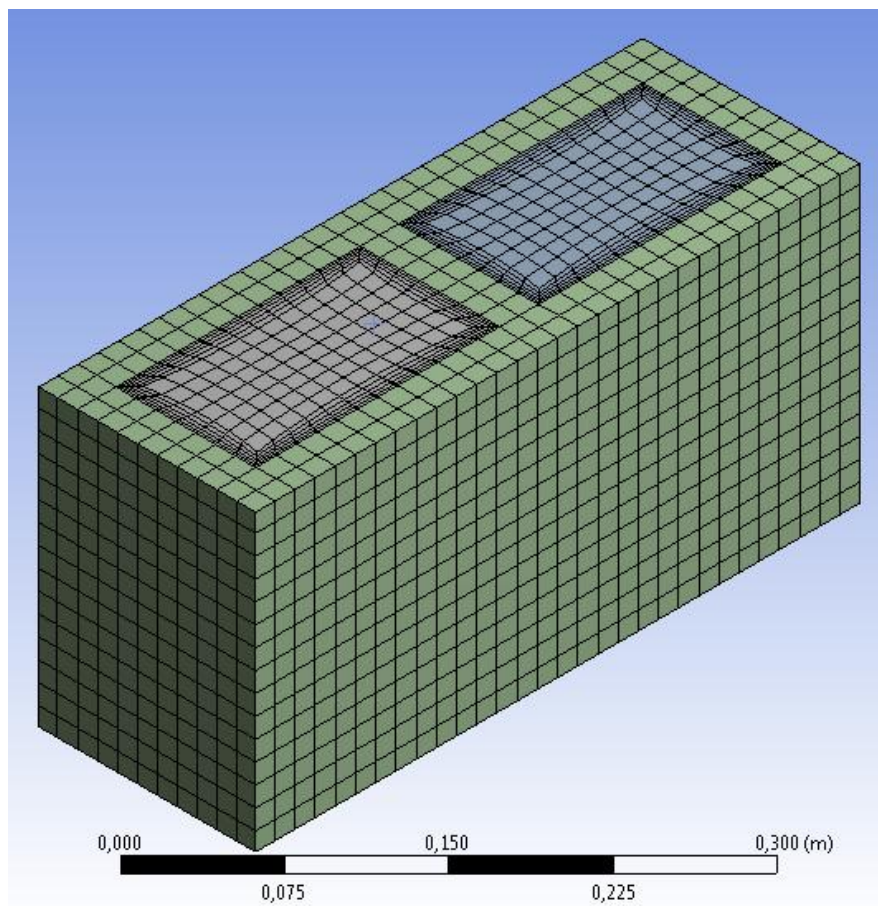
O dimensionamento dos elementos (“*Sizing*”) teve o parâmetro “Relevance center” mudado para “Fine”, para obtenção de uma malha mais refinada. Os demais parâmetros foram mantidos da forma padrão.

Apresenta-se na Tabela 4 um resumo dos parâmetros utilizados para a geração da malha.

<b>Tabela 4 – Parâmetros da malha no ANSYS®</b>	
<b>Sizing</b>	
Use Advanced Size Function	On: Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	Medium
Curvature Normal Angle	Default
Min Size	Default
Max Size	Default
Growth Rate	Default
<b>Inflation</b>	
Use Automatic Inflation	Program Controlled
Inflation Option	Smooth Transition
Transition Ratio	0,272
Maximum Layers	5
Growth Rate	1,2
<b>Assembly Meshing</b>	
Method	CutCell
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled
Morphing Frequency	Default

**Fonte: Autoria própria**

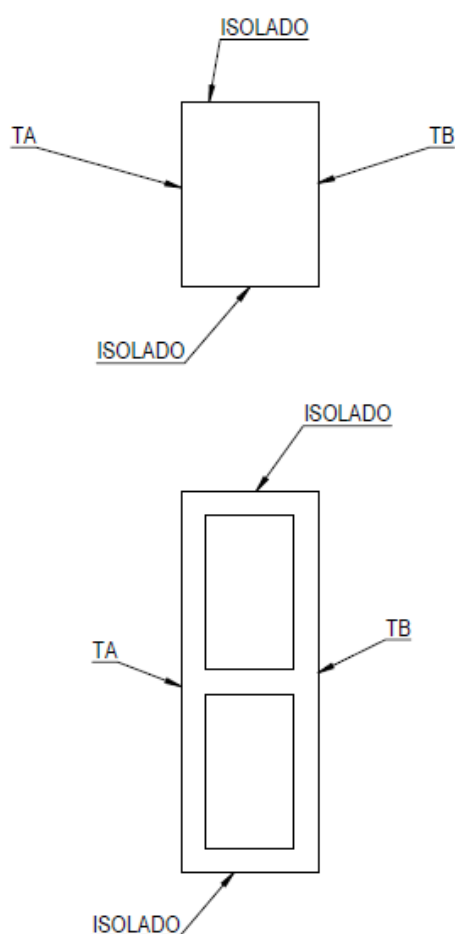
A utilização desses parâmetros gerou uma malha como a apresentada na Figura 10.



**Figura 10 – Malha gerada no trabalho**  
**Fonte: Autoria própria**

#### 4.3.2 Condições de Contorno

Adotaram-se para os blocos tridimensionais quatro faces isoladas, uma face a temperatura constante  $T_A$  e outra, paralela a esta, a temperatura constante  $T_B$ . Apresenta-se na Figura 11 a descrição do bloco. As paredes internas do bloco não foram consideradas como isoladas, permitindo a transferência de calor. A emissividade das paredes internas foi considerada como sendo 0,88 para o concreto e 0,93 para a cerâmica, sendo esses valores obtidos de Bergman et al. (2011).



**Figura 11 – Condições de contorno**  
**Fonte: Autoria própria**

Considerou-se a hipótese de regime laminar do fluido no interior da cavidade. Deste modo, optou-se por uma diferença relativamente baixa de temperaturas entre as duas faces, pois um grande gradiente de temperaturas acarretaria velocidades maiores do fluido, podendo levar a um regime turbulento. Os valores foram estabelecidos mantendo uma diferença de temperatura entre 3 e 4 K.

#### 4.3.3 Propriedades

Para as simulações, foram inseridas no programa CFD as propriedades dos sólidos (concreto e cerâmica) e do ar.

#### 4.3.3.1 Sólidos

Os materiais sólidos tiveram suas propriedades consideradas como sendo constantes. Os valores utilizados nos cálculos são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5 – Propriedades dos materiais sólidos**

Material	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade (W/(m.K))	Calor específico (J/(kg.K))
Cerâmica	1600	0,90	920
Concreto	2400	1,75	1000

Fonte: Adaptado de Morishita et al. (2010, p. 2)

#### 4.3.3.2 Ar

Nos casos de cavidades preenchidas com ar, foi selecionado o modelo de densidade baseado na equação de estado proposta por Peng e Robinson (1976). Para viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), condutividade térmica ( $k$ ) e calor específico ( $c$ ) foi utilizada interpolação linear dos valores em função da temperatura. Os valores utilizados podem ser visualizados na Tabela 6.

**Tabela 6 – Valores de propriedades do ar para interpolação**

Temperatura (K)	$\mu$ (N.s/m <sup>2</sup> )	$k$ (W/(m.K))	$c$ (J/(kg.K))
250	$159,6 \cdot 10^{-7}$	$22,3 \cdot 10^{-3}$	1006
300	$184,6 \cdot 10^{-7}$	$26,3 \cdot 10^{-3}$	1007
350	$208,2 \cdot 10^{-7}$	$30,0 \cdot 10^{-3}$	1009

Fonte: Bergman et al. (2011, p. 995)

#### 4.3.4 Modelos Utilizados

No ANSYS® Fluent®, o *Solver* foi configurado considerando formulação de velocidade absoluta e regime permanente. A aceleração da gravidade foi estabelecida no valor de  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  unidirecional. O escoamento do ar no interior da cavidade foi considerado como sendo laminar.

O modelo de radiação selecionado foi o *Discrete Transfer Radiation Model* (DTRM). Definiu-se uma iteração de energia por iteração de radiação, e um número máximo de cinco iterações de radiação. Como demais parâmetros do DTRM, foi considerado cada elemento de volume como um *cluster* de volume e cada face de

volume finito como *cluster* de superfície. Na discretização angular para geração dos raios, foram consideradas duas divisões de  $\theta$  e quatro divisões de  $\phi$ .

#### 4.3.5 Método de Solução

Para o acoplamento pressão-velocidade, foi selecionado o esquema SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*), mais tradicional, explicado por Patankar (1980). A discretização espacial de gradiente e pressão foram mantidos na forma padrão do programa. Já para a densidade, a quantidade de movimento e a energia, foi selecionado o esquema QUICK (*Quadratic Upstream Interpolation for Convective Kinetics*), que é um esquema que apresenta bons resultados independentemente do tamanho da malha, conforme explicado por Versteeg e Malalasekera (2007).

As definições para a discretização espacial podem ser vistas de forma resumida na Tabela 7.

**Tabela 7 – Resumo da discretização espacial**

<b>Gradient</b>	Least Squares Cell Based
<b>Pressure</b>	Standard
<b>Density</b>	QUICK
<b>Momentum</b>	QUICK
<b>Energy</b>	QUICK

**Fonte: Autoria própria**

Na execução dos cálculos, determinou-se um número máximo de trezentas iterações, sendo considerado divergência do resultado se não houver convergência até esse número de iterações.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, primeiramente apresenta-se a verificação de validade do modelo convectivo simulado. Após a verificação, analisa-se a influência da radiação na transmitância térmica em cada bloco. Depois, compara-se a transmitância entre os blocos de concreto e de cerâmica, de mesma espessura, e analisa-se a diferença entre a transmitância de blocos vazados e blocos maciços. Por fim, comparam-se e discutem-se os resultados obtidos para a transmitância térmica dos blocos com os valores normalizados.

### 5.1 VERIFICAÇÃO DO MODELO CONVECTIVO

A verificação do modelo convectivo foi efetuada pela comparação do perfil de temperaturas do pré-teste com o perfil de temperaturas fornecido no *benchmark* apresentado por Wakashima e Saitoh (2004), válido para o ar em situações com  $Ra=10^5$ . Esse perfil pode ser visualizado na Figura 12.

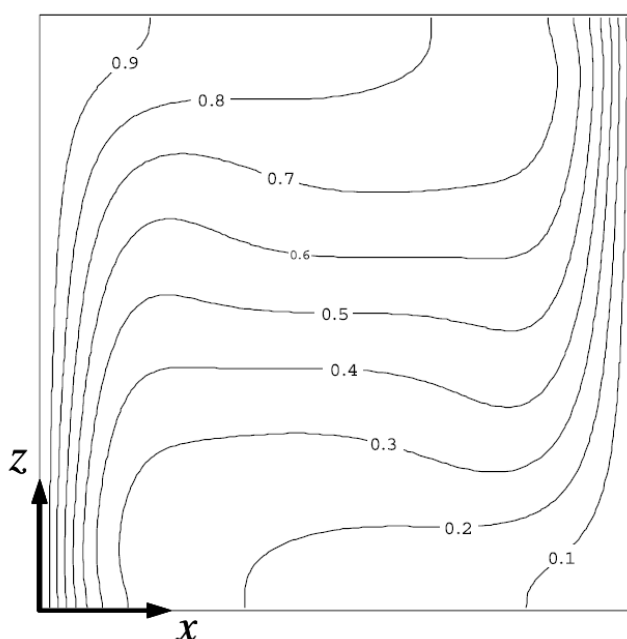


Figura 12 – Perfil de temperaturas do benchmark para  $Ra=10^5$   
Fonte: Wakashima e Saitoh (2004, p. 860)

Realizou-se a verificação da validade do modelo convectivo por meio de um pré-teste com o mesmo tipo de malha, mesmas propriedades do ar e mesmo método de solução utilizados na simulação da transferência de calor dos blocos.

Para o pré-teste, foi considerado um volume de controle cúbico, de volume fixo, paredes impermeáveis, e com quatro faces adiabáticas. As duas faces restantes são paralelas e possuem temperaturas fixas e diferentes, possibilitando a transferência de calor através do volume de controle. Essas condições de contorno do pré-teste são semelhantes às situações consideradas na execução das simulações dos blocos.

Para efeito de comparação com outros estudos, é importante definir o número de Rayleigh (Ra) do pré-teste, dado pela Equação (27) para esta configuração em particular. Nessa equação,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\beta$  é a expansividade do ar,  $T_A$  é a temperatura a face quente,  $T_B$  é a temperatura da face fria,  $L$  é o comprimento do lado do cubo,  $\nu$  é a viscosidade cinemática e “ $a$ ” é a difusividade térmica do ar.

$$Ra = \frac{g \beta (T_A - T_B) L^3}{\nu a} \quad (27)$$

O valor da expansividade do ar pode ser aproximado para o inverso da temperatura média absoluta. A viscosidade cinemática e a difusividade térmica foram retiradas de Bergman et al. (2011), sendo avaliadas na temperatura média. Os dados utilizados e o resultado da Equação (27) podem ser vistos na Tabela 8.

**Tabela 8 – Dados para o cálculo do número de Rayleigh**

$g$ (m/s <sup>2</sup> )	$\beta$ (K <sup>-1</sup> )	$T_A$ (K)	$T_B$ (K)	$L$ (m)	$\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	$a$ (m <sup>2</sup> /s)	Ra
9,81	0,0033	305	295	0,0479	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$\cong 10^5$
9,81	0,0033	302	298	0,1575	$1,59 \cdot 10^{-5}$	$2,25 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^6$

**Fonte: Autoria própria**

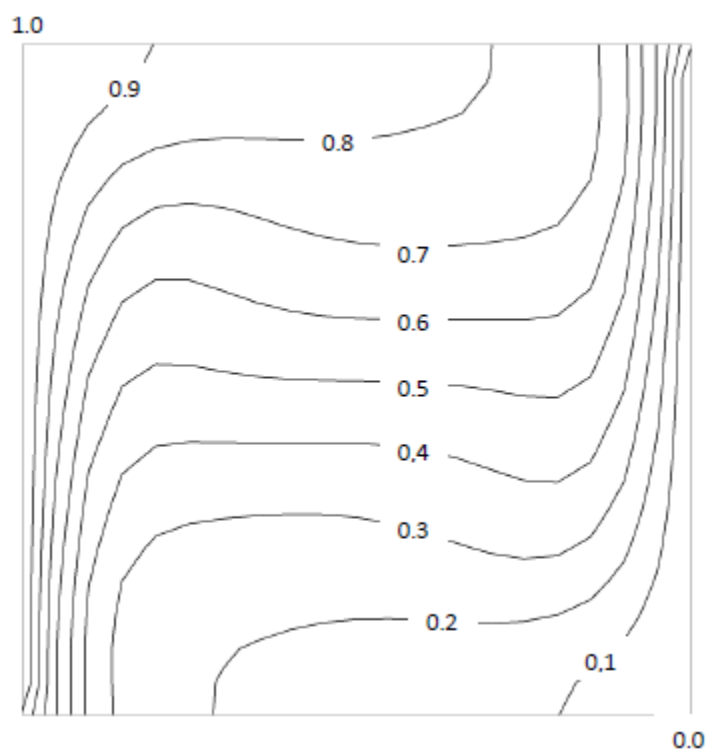
Por meio da Equação (27), pode-se também calcular o maior número de Rayleigh possível para as simulações realizadas. Os dados utilizados encontram-se na terceira linha da Tabela 8, e o valor obtido foi  $Ra=1,5 \cdot 10^6$ . De acordo com Bergman et al. (2011), o escoamento deixa de ser laminar quando  $Ra=10^9$ . Portanto, a hipótese de escoamento laminar se confirma para este trabalho.



A temperatura adimensional, também importante na comparação do pré-teste com outros estudos, pode ser obtida para este caso por meio da Equação (28), onde  $T$  é a temperatura da linha isotérmica, em Kelvin.

$$T^* = \frac{T - T_B}{T_A - T_B} \quad (28)$$

O perfil de temperaturas adimensionalizadas do pré-teste pode ser visto na Figura 13. Esse perfil se refere ao plano médio entre duas faces verticais e adiabáticas do volume de controle.



**Figura 13 – Perfil de temperaturas do pré-teste**  
Fonte: Autoria própria

Comparando as Figuras 12 e 13, percebe-se a semelhança entre os perfis de temperatura, validando, deste modo, o tamanho e o tipo da malha utilizados nas simulações, bem como as propriedades termofísicas para o ar.

## 5.2 ANÁLISE DA TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DOS BLOCOS

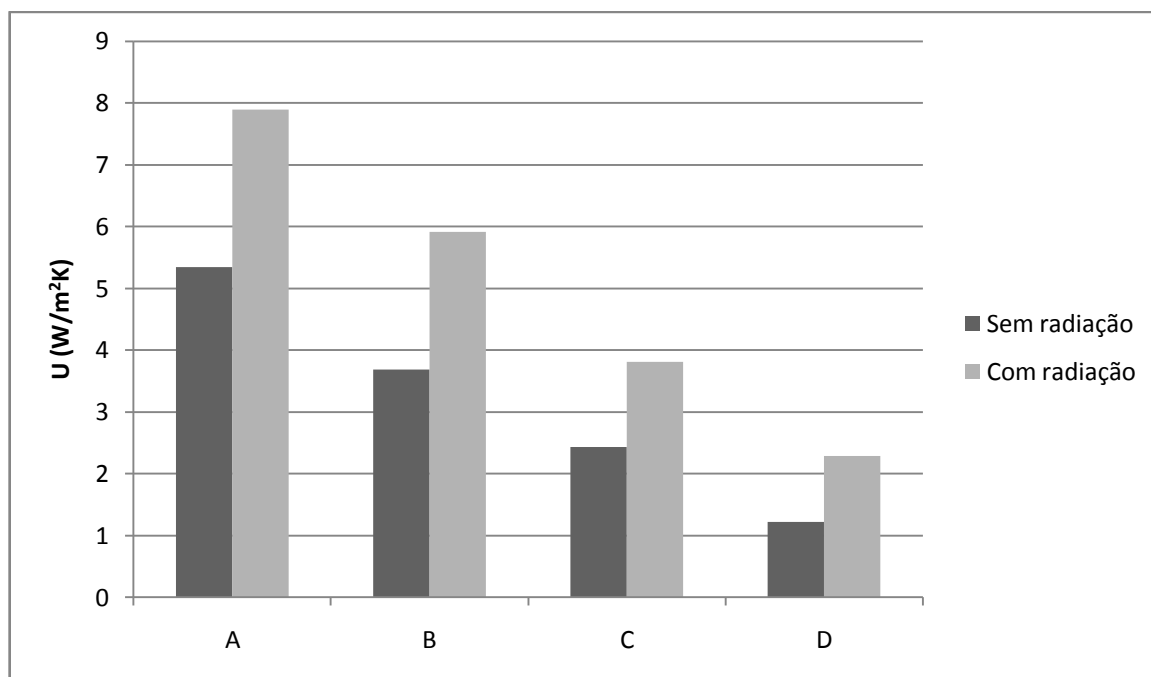
Nesta seção, será feita a análise dos valores de transmitância térmica dos blocos de concreto M-10 e M-15, e dos blocos de cerâmica M-10 e M-15. Mostram-se os valores obtidos nas simulações e os valores de referência de Morishita et al. (2010) na Tabela 9.

**Tabela 9 – Valores obtidos de transmitância térmica**

Material	Espessura	Interior	Modos de transferência de calor			Nome	U (W/m <sup>2</sup> K)	
			Condução	Convecção	Radiação		Ref.	Calc.
Concreto	90 mm	Maciço	x	-	-	A1		19,379
		Cavidade	x	x	-	A2	3,313	5,346
			x	x	x	A3		7,897
	140 mm	Maciço	x	-	-	B1		12,162
		Cavidade	x	x	-	B2	3,136	3,691
			x	x	x	B3		5,910
Cerâmica	90 mm	Maciço	x	-	-	C1		9,941
		Cavidade	x	x	-	C2	2,919	2,435
			x	x	x	C3		3,812
	140 mm	Maciço	x	-	-	D1		6,405
		Cavidade	x	x	-	D2	2,167	1,227
			x	x	x	D3		2,288

**Fonte: Autoria própria**

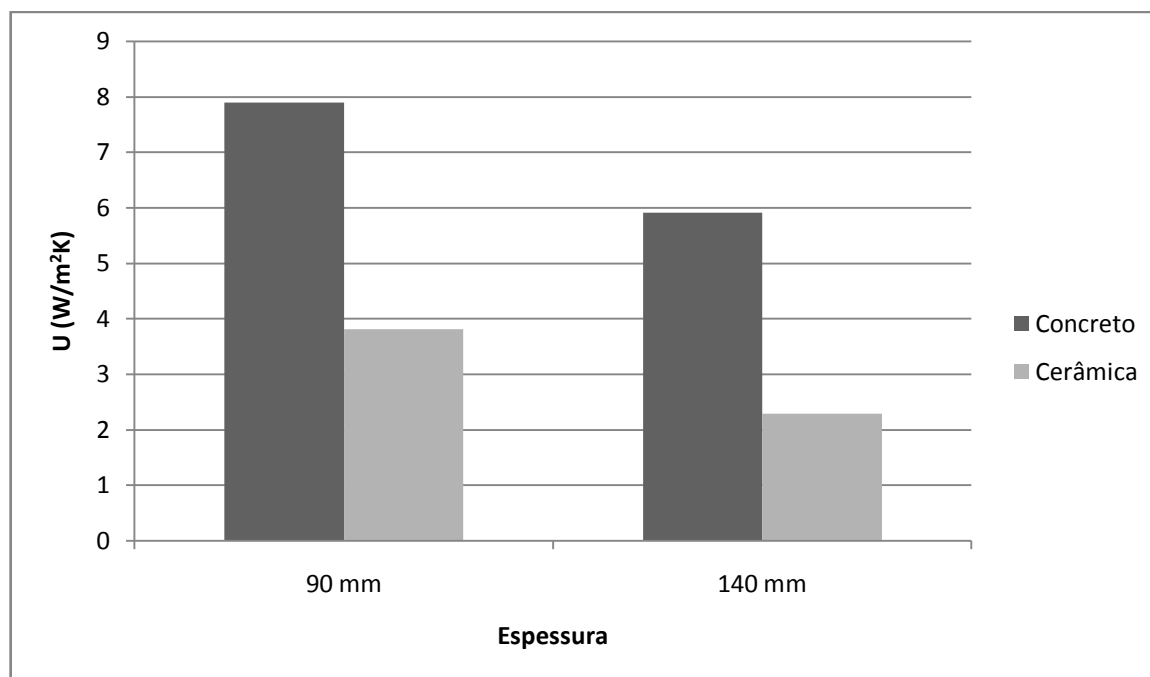
No gráfico da Figura 14, apresentam-se os valores de transmitância térmica dos blocos A, B, C e D, considerando a transferência de calor por radiação, em comparação ao resultado obtido sem considerar os efeitos desse fenômeno.



**Figura 14 – Comparação entre a transmitância térmica dos blocos com e sem radiação**  
Fonte: Autoria própria

Li et al. (2008) concluíram que a radiação tem uma participação importante na transmitância térmica dos blocos e não pode ser desprezada. Também neste trabalho, a radiação teve um efeito considerável no valor final da transmitância térmica dos blocos, sendo responsável por uma parcela 32 a 46% do valor calculado de transmitância dos blocos, dependendo do bloco analisado. Esse resultado também foi verificado por Bouchair (2008), que demonstrou que a resistência térmica dos blocos estudados aumentou em até 50% quando a emissividade da parede interna foi reduzida de 0,9 para 0,3. Em estudo semelhante, Fioretti e Principi (2014) obtiveram um aumento de até 80% na resistência térmica quando reduziram a emissividade de paredes internas de 0,9 para 0,1.

Na Figura 15 mostra-se o gráfico comparativo dos valores de transmitância térmica obtidos para os blocos de concreto e cerâmica de 90 e 140 mm de espessura.

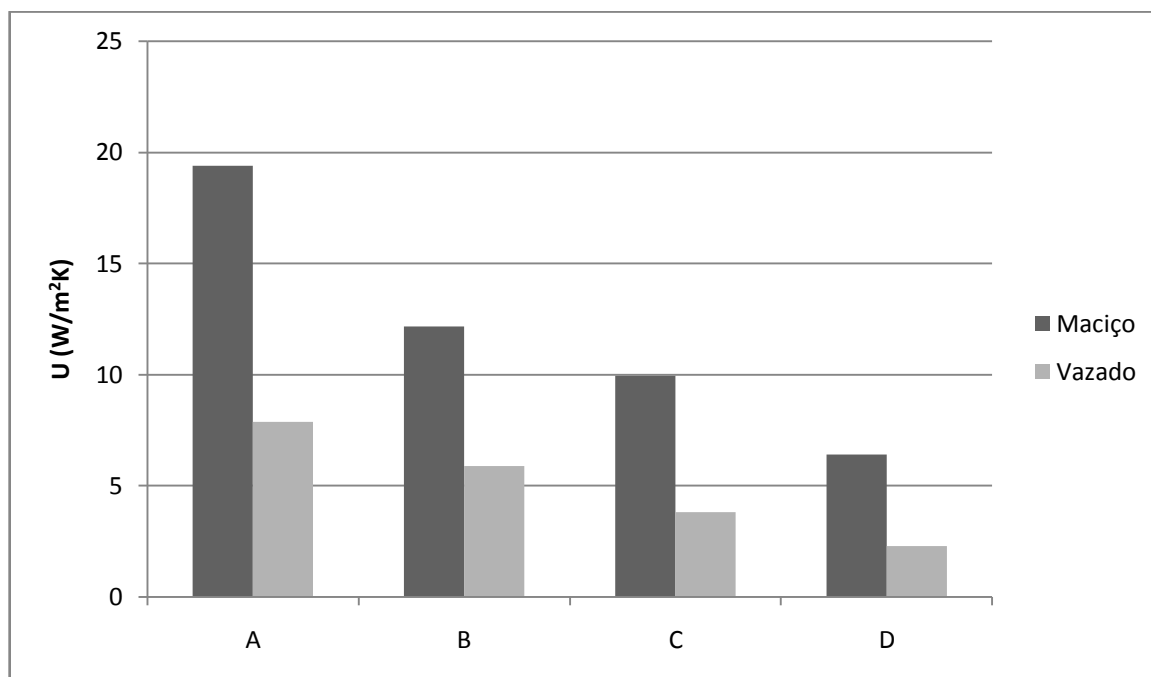


**Figura 15 – Comparação entre a transmitância térmica dos blocos de concreto e cerâmica de mesma espessura**  
**Fonte: Autoria própria**

Os blocos de concreto apresentam diversas vantagens do ponto de vista estrutural e econômico, como citado anteriormente. Porém, do ponto de vista de eficiência energética, os blocos de cerâmica são mais vantajosos. A transmitância térmica do bloco de cerâmica de 90 mm de espessura é 52% menor que a do bloco de concreto, e a do bloco de cerâmica de 140 mm é 61% menor que a do bloco de concreto. Isso se deve ao fato de a condutividade térmica da cerâmica ser 49% menor que a condutividade térmica do concreto e também devido à geometria das cavidades. Os blocos de concreto tem cavidades maiores que as dos blocos de cerâmica e, desse modo, o ar alcança maiores velocidades de circulação na convecção natural, propiciando maior transferência de calor. Vale a pena lembrar que esses valores referem-se apenas aos blocos, sem isolante. Os blocos de concreto podem alcançar valores menores de transmitância com o uso de camadas de isolante térmico, porém, isso acarreta maior custo financeiro.

Uma análise importante a ser apresentada é a da influência que a presença de cavidades no interior dos blocos causa na transmitância térmica dos mesmos. Comparou-se a transmitância térmica obtida para os blocos com cavidades com a obtida para blocos maciços, do mesmo material e dimensões externas iguais aos

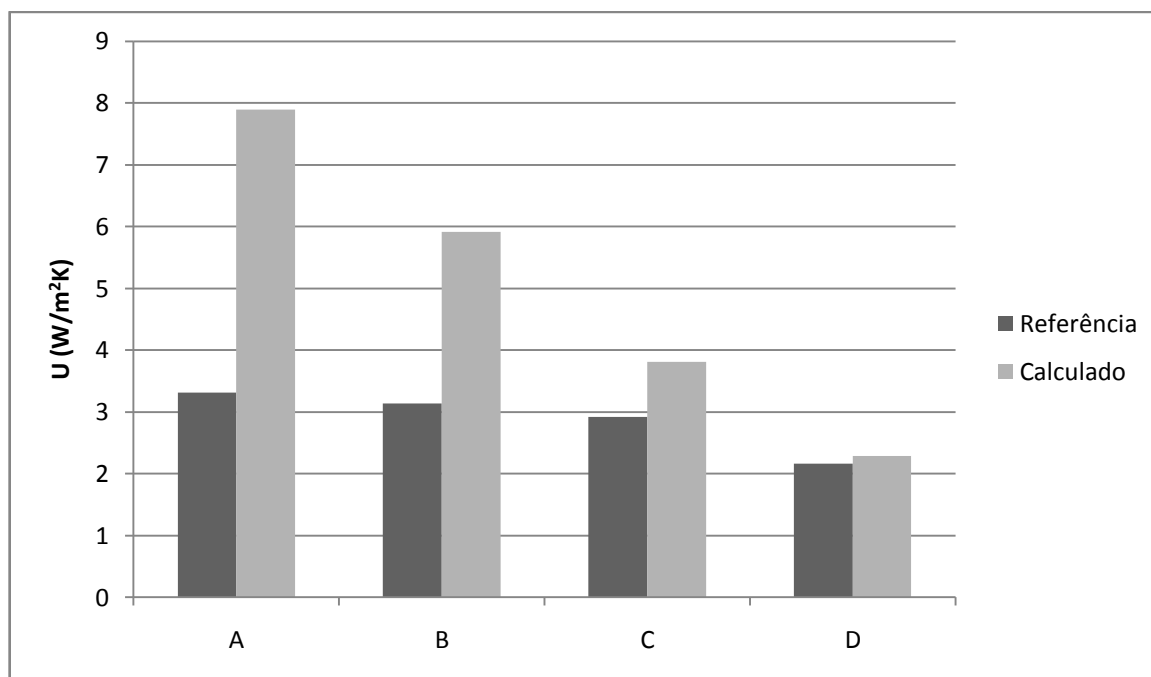
blocos A, B, C e D. Uma comparação dos valores obtidos pode ser visto no gráfico da Figura 16.



**Figura 16 – Comparação entre a transmitância térmica de blocos maciços e vazados**  
Fonte: Autoria própria

Para a diferença de temperaturas empregada, entre 3 e 4 K, a cavidade preenchida com ar desempenha um papel isolante. A transmitância térmica calculada para os blocos com cavidade foi entre 51 e 64% menor que para os blocos maciços. Em análise semelhante, Li et al. (2008) encontraram um valor de transmitância 47% menor para um bloco vazado comparando ao bloco maciço.

No gráfico da Figura 17, compara-se os resultados calculados da transmitância térmica dos blocos A, B, C e D, com os valores de referência fornecidos por Morishita et al. (2010).



**Figura 17 – Comparação entre a transmitância térmica calculada e o valor de referência**  
Fonte: Autoria própria

Nos blocos de cerâmica (C e D) os valores calculados ficaram próximos aos valores de referência. Percebeu-se uma diferença de 23% entre a transmitância térmica calculada para o bloco C e o valor de referência. Para o bloco D, essa diferença foi de 5%. Já para os blocos de concreto (A e B), a diferença entre os valores de referência e os valores obtidos neste estudo foi mais acentuada. Para o bloco A, a diferença foi de 58% e, para o bloco B, foi de 47%. Atribui-se essa diferença acentuada a uma possível abordagem diferente de Morishita et al. (2010) em relação à contribuição da radiação térmica na transferência de calor através dos blocos de concreto.

## 6 CONCLUSÕES

Descreveu-se neste trabalho a obtenção da transmitância térmica de blocos de concreto e cerâmica. O conhecimento desses valores em conjunto com a identificação dos modos de transferência de calor nas cavidades é de grande importância para o estudo e certificação da eficiência energética de edificações.

Deste modo, entre as principais conclusões do trabalho, observou-se que a troca radiativa representa uma parcela significativa da transferência de calor através de blocos vazados; que blocos de cerâmica são termicamente mais eficientes que blocos de concreto de mesma espessura; que a presença de cavidades confere menor transmitância térmica aos blocos, comparando à de blocos maciços; que os valores de transmitância térmica dos blocos de concreto obtidos neste estudo foi maior que os valores de referência, sugerindo-se a revisão dos valores utilizados como referência; e que a transmitância térmica dos blocos de cerâmica apresentou resultados próximos dos valores utilizados como referência.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Baseado nos procedimentos e resultados obtidos neste trabalho, sugerem-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros:

- a) Comparação entre os resultados teóricos e experimentais para a transmitância térmica dos blocos. Este estudo experimental está sendo desenvolvido no LST (Laboratório de Sistemas Térmicos) da Pontifícia Universidade Católica do Paraná;
- b) Verificação de outros modelos de radiação para a troca radiativa das superfícies internas da cavidade;
- c) Obtenção de números e geometria ótimos de cavidades para os blocos, visando uma menor transmitância térmica.



## REFERÊNCIAS

ALAM, Pravez; KUMAR, Ashok; KAPOOR, S.; ANSARI, S. R. Numerical investigation of natural convection in a rectangular enclosure due to partial heating and cooling at vertical walls. **Communications in nonlinear science & numerical simulation**, v. 17, n. 6, p. 2403-2414, jun. 2012.

AMINOSSADATI, S. M.; GHASEMI, B.; KARGAR, A. Computational analysis of magnetohydrodynamic natural convection in a square cavity with a thin fin. **European journal of mechanics. B, Fluids**, v. 46, p. 154-163, jul-ago. 2014.

ANTAR, Mohamed A.; BAIG, Hasan. Conjugate conduction-natural convection in a hollow building block. **Applied thermal engineering**, v. 29, n. 17-18, p. 3716-3720, dez. 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos: Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **NBR 6136**: Bloco vazado de concreto simples para alvenaria estrutural. Rio de Janeiro, 1994.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.; INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 7. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

BOUCHAIR, Ammar. Steady state theoretical model of fired clay hollow bricks for enhanced external wall thermal insulation. **Building and environment**, v. 43, n. 10, p. 1603-1618, out. 2008.

ÇENGEL, Yunus A. **Heat and mass transfer: a practical approach**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2006.

COZ DÍAZ, J. J. del; GARCÍA NIETO, P. J.; MARTÍN RODRÍGUEZ, A.; MARTÍNEZ-LUENGAS, A. Lozano; BETEGÓN BIEMPICA, C. Non-linear thermal analysis of light concrete hollow brick walls by the finite element method and experimental validation. **Applied thermal engineering**, v. 26, n. 8-9, p. 777-786, jun. 2006.

EL-MAGHLANY, Wael M.; SAQR, Khalid M.; TEAMAH, Mohamed A. Numerical simulations of the effect of an isotropic heat field on the entropy generation due to

natural convection in a square cavity. **Energy conversion and management**, v. 85, p. 333-342, set. 2014.

ELETROBRÁS. **Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005 - classe residencial: Relatório Sul**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2007.

FIORETTI, Roberto; PRINCIPI, Paolo. Thermal performance of hollow clay brick with low emissivity treatment in surface enclosures. **Coatings**, v. 4, p. 715-731, out. 2014.

HOLMAN, J. P. **Heat transfer**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2010.

HOWELL, John R.; SIEGEL, Robert; MENGÜÇ, M. Pinar. **Thermal radiation heat transfer**. 5. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

ISHIHARA, I.; MATSUMOTO, R.; SENOO, A. Natural convection in a vertical rectangular enclosure with localized heating and cooling zones. **Heat and mass transfer**, v. 36, n. 6, p. 467-472, nov. 2000.

KOTHANDARAMAN, C. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 3. ed. New Delhi: New Age International Publishers, 2006.

KREITH, Frank; MANGLIK, Raj M.; BOHN, Mark S. **Principles of heat transfer**. 7. ed. Stamford: Cengage Learning, 2011.

LI, L. P.; WU, Z. G.; LI, Z. Y.; HE, Y. L.; TAO, W. Q. Numerical thermal optimization of the configuration of multi-holed clay bricks used for constructing building walls by the finite volume method. **International journal of heat and mass transfer**, v. 51, n. 13-14, p. 3669-3682, jul. 2008.

LU, Xijia; WANG, Ting. Investigation of radiation models in entrained-flow coal gasification simulation. **International journal of heat and mass transfer**, v. 67, p. 377-392, dez. 2013.

MORISHITA, Claudia; SORGATO, Marcio J.; VERSAGE, Rogério; TRIANA, Maria A.; MARINOSKI, Deivis L.; LAMBERTS, Roberto. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v. 4)**. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PATANKAR, Suhas V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: McGraw-Hill, 1980.

PENG, Ding-Yu; ROBINSON, Donald B. A new two-constant equation of state. **Industrial & engineering chemistry fundamentals**, v. 15, n. 1, p. 59-64, fev. 1976.

ROHSENOW, Warren M.; HARTNETT, James P.; CHO, Young I. (Edit.). **Handbook of heat transfer**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

RUBEL, Arthur; LANDIS, Fred. Numerical study of natural convection in a vertical rectangular enclosure. **The physics of fluids**, v. 12, p. 11-208, 1969.

SAAVEDRA-OTERO, E. On conduction heat transfer in metals. **Physica B: condensed matter**, v. 415, p. 23-27, 2013.

SIGEY, J. K.; GATHERI, F. K.; KINYANJUI, M. Numerical study of free convection turbulent heat transfer in an enclosure. **Energy conversion and management**, v. 45, n. 15-16, p. 2571-2582, set. 2004.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2007.

WAKASHIMA, Shinichiro; SAITOH, Takeo S. Benchmark solutions for natural convection in a cubic cavity using the high-order time-space method. **International journal of heat and mass transfer**, v. 47, n. 4, p. 853-864, fev. 2004.

WHITE, Frank M. **Viscous fluid flow**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1991.