## PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ ESCOLA POLITÉCNCIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUÍS CÉSAR DE CARLI TURCO

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CAVIDADES ENCLAUSURADAS

CURITIBA

2019

## LUÍS CÉSAR DE CARLI TURCO

## ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CAVIDADES ENCLAUSURADAS

Tese apresentada ao programa de pósgraduação em Engenharia Mecânica, pela Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, como parte dos requisitos de Doutorado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luís Mauro Moura

CURITIBA 2019

## LUÍS CÉSAR DE CARLI TURCO

### ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CAVIDADES ENCLAUSURADAS

Trabalho apresentado à banca examinadora do programa de Doutorado em Engenharia Mecânica, da Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, Paraná, Brasil.

Prof. Dr. Luís Mauro Moura (orientador)

PUCPR

Prof. Dr. Nathan Mendes

PUCPR

Prof. Dr. Paulo César Philippi

PUCPR

Prof. Dr. Roberto Lamberts

UFSC

Prof. Dr. Roberto Moro

UTFPR

Curitiba, 30 de setembro de 2019.

À minha amada Helem Patrícia, pelo apoio e incentivo incondicional. Aos meus queridos filhos Gabriela e Luís Gustavo, pela inspiração.

### AGRADECIMENTOS

Ao professor e amigo Luís Mauro Moura pelos conselhos, incentivo e orientação dada ao logo de todo o trabalho.

A Thiago Semann e Michell de Almeida Ramos, pelo apoio e esforços dispensados durante a realização dos experimentos práticos que fazem parte deste trabalho.

Aos professores do curso de graduação em Engenharia Mecânica da PUCPR pela compreensão e apoito ao longo de todo este período de estudo.

À minha mãe, Igneze e ao meu irmão Paulo Alex, pelo apoio, orações e incentivo.

Deixo assim registrado o meu agradecimento a todos, pois o auxílio de cada um foi de fundamental importância para a conclusão desta tese.

#### **RESUMO**

Em um contexto de preocupação com o crescente aumento de demanda por eletricidade, e da importância do desempenho energético de edificações como forma de reduzir o consumo de energia elétrica, é que esta tese busca trazer contribuição, tendo como objetivo principal analisar o fenômeno de transferência de calor por cavidades enclausuradas, condição típica em envoltórias de edificações compostas por blocos de concreto. Ao longo do trabalho, são levantadas as correlações matemáticas apresentadas na literatura para a transferência de calor em cavidades enclausuradas juntamente com suas respectivas restrições de utilização. Identifica-se que para o caso específico de envoltórias com blocos de concreto, apenas três correlações atendem aos seus critérios de uso, porém, o percentual de desvio encontrado aplicando-se essas correlações quando comparado aos valores experimentais em um bloco de concreto superam 30%, com exceção de uma, a qual considera de forma conjunta os modos de transferência de calor por convecção e radiação, e assim consegue reduzir este desvio, apresentando percentual da ordem de 10%. Entretanto, quando há uma redução na emissividade da superfície da cavidade, nenhuma destas correlações apresenta resposta adequada para reproduzir o comportamento de transferência de calor, sendo percebido um aumento significativo dos desvios à medida em que se reduz a emissividade da superfície da cavidade, atingido percentuais superiores à 100% para emissividades inferiores a 0,4. Assim, uma nova correlação para a determinação do número adimensional de Nusselt modificado (Nu<sub>md</sub>) foi desenvolvida, tomando-se como base resultados de simulações numéricas variando-se emissividade ( $\epsilon$ ), razão de aspecto (H/L), diferença de temperatura ( $\Delta$ T), temperatura média da cavidade (T<sub>m</sub>), considerando tanto o fenômeno convectivo quanto o radiativo. Essa nova modelagem ao ser validada, por meio de um comparativo com resultados experimentais de um bloco de concreto, apresentou desvios inferiores a 8% e quanto variada a emissividade da superfície da cavidade o desvio não ultrapassou o percentual de 20%, independentemente da faixa de emissividade atribuída, fato que não foi observado em nenhuma outra correlação da literatura, tornando assim o cálculo da taxa de calor transferido pela envoltória menos incerto. Também foi percebida uma redução na taxa de transferência de calor durante os testes práticos, quando a emissividade da superfície interna da cavidade foi reduzida de 0,95 para 0,68 a redução na taxa de transferência de calor foi da ordem de 20% e, quando a emissividade foi alterada de 0,95 para 0,45, a queda foi da ordem de 40% na cavidade. Por fim, ao desenvolver uma nova correlação para Nusselt modificado, este trabalho apresenta meio de determinar a transmitância térmica no interior de cavidades enclausuradas com capacidade de predizer o comportamento térmico de envoltórias com menores desvios, ao mesmo tempo que demonstra a influência significativa do fenômeno radiativo na transferência de calor em envoltórias, evidenciando portanto que a modificação da emissividade das superfícies da cavidade passa a ser uma alternativa para melhoria do desempenho energético de elementos construtivos, com resultados que podem atingir os 30% necessários para superar a restrição de utilização de blocos de concreto em regiões específicas da Brasil, imposta pela norma NBR15575-4.

### PALAVRAS-CHAVE

Cavidades enclausuradas, correlações de Nusselt, eficiência energética, barreira de radiação, transmitância térmica.

### ABSTRACT

In a context of concern with the increasing demand for electricity, and the importance of energy performance of buildings as a way to reduce the electricity consumption, this thesis seeks to contribute, having as its main objective to analyze the heat transfer phenomenon through the enclosed cavities, typical condition in build envelop composed of concrete blocks. Thus, were raised the mathematical correlations presented in the literature for heat transfer in enclosed cavities together with their respective restrictions of use. For the specific case of building envelopes composed by concrete bricks, only three correlations meet their utilization criteria. However, the deviation percentage applying these correlations when compared to experimental values in a concrete block exceeds 30%, except for one, which considers together the convection and the radiation heat transfer mode and thus reduce the deviation, presenting a percentage around 10%. However, when there is a reduction in the cavity internal surface emissivity, none of these correlations has adequate accuracy to reproduce the heat transfer behavior, and a significant deviation increase is possible to be observed when the cavity internal surface emissivity is reduced, reaching percentages greater than 100% for emissivity below 0.4. Thus, a new correlation for the determination of the modified Nusselt dimensionless number (Nu<sub>md</sub>) was developed, based on numerical simulation results varying emissivity ( $\epsilon$ ), aspect ratio (H / L), temperature difference ( $\Delta$ T), mean cavity temperature  $(T_m)$ , considering both the convective and radiative phenomena. When was validated this new model, by a comparison with a concrete brick practical results, was presented deviations values below 8% and, when was changed the emissivity of cavity internal surface the deviation did not exceed the 20%, regardless of the emissivity range attributed, a fact that was not observed in any other correlation in the literature, making it more accuracy to calculate the heat rate transferred by the building envelope. Also was verified a reduction in the heat transfer rate through the cavity during the practical tests, when was changing the surface emissivity from 0.95 to 0.68 it was about 40% and, when the emissivity change from 0.95 to 0.45, the reduction was about 20% in the cavity. At the end, by developing a new correlation for modified Nusselt, this work presents a way to determine the thermal transmittance inside cavities, able to predict the thermal behavior of building envelopes with lower deviations. In the same time, was demonstrated the significant influence of radiative phenomenon at heat transfer through building envelop and was evidenced that modify the cavity surface emissivity is an alternative to improve the energy performance of building elements, with results that may attend the 30% necessaries to overcome the use restriction of the concrete bricks, imposed by NBR 15575-4 for specific regions of Brazil.

#### **KEY-WORDS**

Enclosed cavities, Nusselt correlations, energy efficiency, radiative barrier, overall heat transfer coefficient.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Caixa Quente Protegida, disposição esquemática de funcionamento	27
Figura 2: Caixa Quente: a) aberta, b) instrumentada e c) posicionada para estabilização	28
Figura 3: Arranjo de resistências térmicas utilizado na norma NBR 15220	31
Figura 4: Parede com blocos de concreto colados, sem reboco	32
Figura 5: Dimensões da Cavidade	37
Figura 6: Modelo Numérico: a) Geometria, b) Malha, c) Detalhe da Malha	38
Figura 7: Arranjo de resistências térmicas para um bloco de concreto sem acabamentos	
externos	44
Figura 8: Distribuição de temperaturas em um bloco de concreto simulado	44
Figura 9: Erro percentual utilizando correlação de Nusselt, por Mavromatidis, nas condiçõ	es
de parede de edificação variando a emissividade da parede interna da cavidade.	.49
Figura 10: Esquemático da cavidade enclausurada	51
Figura 11: Influência das variáveis emissividade (a), razão de forma (b) e diferença de	
temperatura (c) no número de Nusselt modificado.	54
Figura 12: Influência da temperatura média das paredes da cavidade no parâmetro $\beta_1$	55
Figura 13: Influência da razão de forma da cavidade no parâmetro $\beta_2$	55
Figura 14: Comparativo de erro entre a correlação de Nusselt, por Mavromatidis, e a	
correlação de Nusselt modificado proposto pelo Autor, variando a emissividade	e da
parede interna da cavidade	59
Figura 15: Cavidade de teste em suas três configurações de parede, (a) emissividade 0,95,	(b)
emissividade 0,68 e (c) emissividade 0,45.	60
Figura 16: Emissividade superficial	62
Figura 17: Tendência do erro em função da variação da emissividade utilizando as correlaç	ções
de Nusselt por Mavromatidis (Eq.20) e pelo Autor (Eq.36). (a) $\Delta T=25K$ , (b)	
$\Delta T=20K e (c) \Delta T=15K$	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Instrumentação empregada no ensaio	28
Tabela 2: Resumo das incertezas de medição utilizadas	29
Tabela 3: Resultados encontrados nos ensaios experimentais do bloco de concreto origina	ıl29
Tabela 4: Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior o	que a
espessura	30
Tabela 5: Resistência térmica superficial interna e externa	30
Tabela 6: Resistência térmica superficial interna e externa	33
Tabela 7: Comparativo dos resultados da simulação computacional variando qualidade de	)
malha	41
Tabela 8: Comparativo dos valores obtidos através de ensaios experimentais e resultados	da
simulação computacional	42
Tabela 9: Quantidade de calor transferida pelo bloco de concreto em cada modo em um p	lano
médio	46
Tabela 10: Comparativo entre correlações de Nusselt para cavidades enclausuradas	47
Tabela 11: Comparativo de erro entre correlações de Nusselt e dados experimentais	48
Tabela 12: Condições e diferenças de temperatura na cavidade	50
Tabela 13: Comparativo de erro entre as correlações de Nusselt por outros autores e Nuss	elt
modificado contra dados experimentais em blocos de concreto	58
Tabela 14: Reflectividade e emissividade das amostras para superfícies internas da cavida	ade.
	62
Tabela 15: Resultados experimentais das três amostras submetidas ao método da Caixa	
Quente Protegida	63
Tabela 16: Resultados experimentais comparados aos valores previstos utilizando as	
correlações de Nusselt por Mavromatidis (Eq.20) e pelo Autor (Eq.36)	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Símbolo	Definição	Unidade
А	área transversal ao fluxo de calor,	m²
ср	calor específico a pressão constante,	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
$\Delta T$	diferença de temperatura entre os ambientes quente e frio, ( $T_{ext}$ - $T_{ir}$	nt) K
$\Delta T_{cav}$	diferença de temperatura no interior da cavidade, (T <sub>h</sub> - T <sub>c</sub> )	K
Gr	número de Grashoff, (= g $\beta$ (T <sub>h</sub> – T <sub>c</sub> ) L <sup>-3</sup> v <sup>-2</sup> )	-
Н	altura do bloco de concreto,	m
$H_{cav}$	altura da cavidade enclausurada,	m
hext	coeficiente convectivo do ambiente externo,	$Wm^{-2} K^{-1}$
h <sub>int</sub>	coeficiente convectivo do ambiente interno,	$W m^{-2} K^{-1}$
k <sub>air</sub>	condutividade térmica do ar,	W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
L	comprimento do bloco de concreto, distância entre os ambientes	
	quente e frio,	m
L <sub>cav</sub>	comprimento da cavidade enclausurada, distância entre as paredes	
	quente e fria,	m
Nu	número de Nusselt, (= h L k $^{-1}$ )	-
$Nu_L$	número de Nusselt médio, (= h L k <sup>-1</sup> )	-
Nu <sub>cav</sub>	número de Nusselt médio na cavidade, (= h L k <sup>-1</sup> )	-
$Nu_{md}$	número de Nusselt modificado, (= $U_{cav} L_{cav} k^{-1}$ )	-
Pr	número de Prandlt, (= $\mu$ cp k <sup>-1</sup> ),	-
q"	fluxo de calor,	W m <sup>-2</sup>
q'	taxa de transferência de calor,	W
Qam	taxa de transferência de calor que atravessa a amostra,	W
Ra	número de Rayleigh, (Gr Pr),	-
T <sub>C</sub>	temperatura fria da superfície externa da cavidade,	°C
T <sub>c</sub>	temperatura fria da superfície interna da cavidade,	°C
$T_{cav}$	temperatura média no interior da cavidade,	Κ
Text	temperatura do ar no ambiente quente externo,	°C
$T_{\rm H}$	temperatura quente da superfície externa da cavidade,	°C
$T_h$	temperatura quente da superfície interna da cavidade,	°C
T <sub>int</sub>	temperatura do ar no ambiente frio interno,	°C
T <sub>CmQ</sub>	temperatura do ar na Câmara Quente (Câmara de Guarda),	°C

T <sub>CxQ</sub>	temperatura do ar na Caixa Quente,	°C
T <sub>CmF</sub>	temperatura do ar na Câmara Fria,	°C
Ucav	transmitância térmica da cavidade enclausurada,	W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
W	largura do bloco de concreto,	m
W <sub>cav</sub>	largura da cavidade enclausurada,	m

## Símbolos Gregos

Símbolo	Definição	Unidade
α	difusividade térmica, (k $\rho^{-1}$ cp <sup>-1</sup> )	$m^2 s$
β	fator de expansão térmica, (T <sub>cav</sub> -1)	<b>K</b> <sup>-1</sup>
ε	emissividade da superfície	-
$\mathcal{E}_h$	emissividade da superfície quente	-
$\mathcal{E}_{\mathcal{C}}$	emissividade da superfície fria	-
$\mathcal{E}_m$	emissividade característica da superfície	-
μ	viscosidade,	kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
V	viscosidade cinemática, (= $\mu / \rho$ )	m <sup>2</sup> s
ρ	massa específica,	kg m <sup>-3</sup>

# SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	6
1.1. 1.2. 1.3.	Objetivo Geral Objetivos Específicos Estrutura do Trabalho	9 10 10
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
<ol> <li>2.4.</li> <li>2.5.</li> <li>2.6.</li> <li>2.7.</li> </ol>	Correlações Matemáticas Estudos com Modelos Numéricos Estudos com Barreira de Radiação Transmitância Térmica de Envoltórias	18 21 24 26
2.7.1.	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL	26
2.7.2.	VALORES APRESENTADOS EM NORMA	30
3.	METODOLOGIA	34
4.	MODELAGEM COMPUTACIONAL	35
4.1. 4.2.	Equações governantes Primeira Amostra	35 36
4.3.		38
4.4. 4.4.1.	ANÁLISE DE MALHA	39 40
5.	ANÁLISE DO FENÔMENO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA CAVIDADE	43
6.	DETERMINAÇÃO DE NÚMERO ADIMENSIONAL PARA CAVIDADES ENCLAUSURADAS	50
6.1. 6.2.	Análise da Cavidade Validação do Número de Nússet modificado	52 57
7.	CONCLUSÃO	67
8.	BIBLIOGRAFIA	69
APÊ	NDICE	72
ANE	XO	72

### 1. INTRODUÇÃO

Ao se observar a civilização moderna é improvável que o tema energético passe sem ser analisado, cabendo uma maior atenção a dois aspectos deste tema: a capacidade de transformação da energia em parcela aproveitável pelo homem e os modos de consumo dessa energia. Quanto a primeira abordagem, a humanidade e a ciência evoluíram muito no que diz respeito a modos de transformação de energia, utilizando potenciais hídricos, fósseis, eólicos, de biomassa, nucleares e solares. Todavia, este potencial comumente dito gerador é limitado, geralmente finito e em alguns casos nocivo ao meio ambiente. Em se tratando dos modos de consumo de energia, seja para a produção de matérias prima, produtos e bens de consumo, seja para locomoção, iluminação, conservação de alimentos ou para o conforto, o fato é que o consumo energético vem aumentando dia após dia, enquanto que a transformação das diversas formas de energia em energia elétrica, o modo mais versátil de utilização, não acompanha este crescimento. Tal comportamento vem causando o atual cenário de restrição energética mundial.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2018 (BEN) são consumidos no Brasil 526.234 GWh, dos quais 50,8% – ou o equivalente a 267.482 GWh – representam o consumo somado dos setores residencial, comercial e público, no que diz respeito ao consumo de energia elétrica. Vale ressaltar que entre os anos de 2005 a 2015 o gasto energético teve um aumento de 41,5% enquanto que só o setor residencial teve um acréscimo de 58,7% em seu consumo elétrico, ou seja um aumento de 48.856 GWh em uma década.

A preocupação com a questão energética atinge todas as civilizações levando à criação de legislações e programas para incentivar novos modos de transformação de energia bem como a redução do consumo energético. Em 1985 foi criado no Brasil, pelo governo federal, o Programa Brasileiro de Conservação de Energia Elétrica (Procel) com o objetivo de promover o uso eficiente de energia elétrica, combatendo o desperdício, reduzindo os custos e os investimentos do setor, sendo este programa gerido pela Eletrobras. No ano de 2003 foi instituído pela Eletrobras/Procel um subprograma chamado Procel Edifica, que consiste no Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, visando focar a atenção neste setor, por sua influência significativa no consumo energético do país e cujo potencial de redução, segundo o programa, é de 50% para novas edificações e de 30% para aquelas submetidas a reformas.

Concentrando-se as atenções nas edificações, faz-se necessário compreender quais fatores interferem de modo significativo a questão da eficiência energética. Assim, fazendo um exercício de organização, no que se refere ao consumo energético, geralmente agrupa-se as variáveis sob as quais as edificações estão expostas em cinco categorias, a saber: 1) as variáveis que são herdadas da posição geográfica onde está localizado ou se pretende fazer o empreendimento; 2) as variáveis oriundas dos projetos pelos quais o empreendimento foi concebido; 3) aquelas variáveis que ocorrem durante a construção da edificação; 4) as variáveis provenientes do modo de utilização do ambiente e, por fim, 5) as variáveis temporais, que ocorrem com o passar do tempo. Considerando esta organização, verifica-se que: a localização geográfica e o modo de utilização do ambiente são características inerentes ao tipo e função da edificação; as variáveis associadas à construção dependem fortemente do processo produtivo e mão-de-obra utilizados; e as que ocorrem com o tempo possuem dependência com as do projeto ou estão relacionadas com novas tecnologias de compostos. Fica assim evidente que de todas as categorias descritas, aquela que se tem maior controle é o grupo das variáveis oriundas dos projetos.

Dentre os diversos projetos necessários para se obter uma edificação energeticamente eficiente, destaca-se o projeto de climatização, que vem ganhando importância a cada dia devido a necessidade de redução do consumo energético das edificações, bem como, para o cumprimento da regulamentação em vigor no país. No Brasil, um exemplo claro deste fato é a Portaria INMETRO nº 372/2010, que apresenta o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RQT-C). Tomando-se como referência o item A.7 do anexo IV do citado RQT-C, Pontuação Total, pode-se observar que o desempenho energético das edificações é calculado através da ponderação das variáveis: envoltória, com peso equivalente a 30%; a iluminação, contribuindo com outros 30%; e o sistema de condicionamento de ar, com os 40% restantes.

Neste contexto, estudar as variáveis que influenciam o resultado do projeto de climatização, passa a ser fundamental para aprimorar os meios de obtenção de bons resultados. Pode-se ainda, neste ponto, segmentar esta análise em 3 partes, sendo: a determinação da carga térmica de edificações – atividade essencial para o desenvolvimento de um projeto de climatização eficiente; a seleção de equipamentos adequados; e a utilização de boas práticas de instalação. Ao se determinar a carga térmica de uma edificação, são exemplos de variáveis significativas para um bom projeto de climatização: a sua localização geográfica; o clima da região; o grau de sombreamento; o projeto arquitetônico; a quantidade de ocupantes; cargas geradoras de calor; e a radiação solar incidente. Estes fatores, por consequência, são também importantes para o projeto de uma edificação energeticamente eficiente.

Do ponto de vista deste trabalho, busca-se focar atenção às variáveis provenientes do projeto da envoltória de edificações, por se tratar de interface entre projetos arquitetônicos,

estruturais e também de climatização. A envoltória é responsável apenas por uma parcela da carga térmica total, entretanto, é onde se tem grande possibilidade de ação na etapa de projeto e, também, trata-se da variável que – se mal projetada – poderá acarretar em consequências permanentes para a edificação. No projeto da envoltória de uma edificação, além dos aspectos arquitetônicos e estéticos já consagrados, cada dia mais os aspectos energéticos e de conforto térmico devem ser levados em conta, aspectos esses que recaem nos elementos construtivos que serão utilizados para a confecção de paredes, pisos, tetos, forros, portas, janelas e acabamentos em geral. Envoltórias com blocos de concreto passaram a ser utilizados no Brasil por volta de 1940, quando foram construídas 2400 residências do conjunto habitacional do Realengo, no Rio de Janeiro (LORDSLEMM JR. et al., 2008). As primeiras máquinas destinadas à produção dos blocos de concreto vieram dos Estados Unidos para o Brasil na década de 1950, marco do início da história desses componentes no país (BARBOSA, 2004). Desde então, é comum observarmos edificações de todos os portes construídas com blocos de concreto, devido ao grande atrativo de economia da ordem de 20% na construção de uma casa, ante o sistema convencional. Além disso, a redução do tempo da obra e de mão de obra. Mas, no tocante às informações técnicas, ainda existe uma grande lacuna.

Apesar de redução do número de fabricantes de blocos de concreto nos últimos anos, ainda existe um número significativo com pouca informação relacionada à normatização estabelecida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), além da falta de infraestrutura adequada à produção desses componentes (LORDSLEMM JR. et al., 2008), o que é considerado um dos grandes entraves para o crescimento do setor por causar insegurança ao comprador.

Outro aspecto a ser ressaltado, é que são raros os registros sobre as características térmicas deste elemento construtivo. Uma provável causa desta escassez de dados técnicos pode ser atribuída à busca prioritária da garantia das funções elementares de resistência mecânica e de sua geometria. Entretanto, ainda que aparentemente não seja uma função crítica, as propriedades térmicas – sem dúvida – são de fundamental importância para a determinação das cargas térmicas e especificação de equipamentos condicionadores de ar apropriados para proporcionar o melhor conforto térmico com o menor consumo de energia.

Os métodos existentes para predizer o comportamento térmico e energético de edificações utilizam as diversas variáveis já citadas como base para cálculos, abrangendo suas características geométricas, estruturais e propriedades termodinâmicas. Entretanto, as propriedades termodinâmicas dos elementos construtivos utilizadas por estes métodos estão baseadas em dados de fabricantes europeus ou norte-americanos bem como em experimentos

feitos nestas regiões, o que não traduz necessariamente a realidade ocorrida no Brasil, uma vez que as propriedades termodinâmicas de elementos como tijolos, ou blocos de concreto são influenciadas pelas matérias-primas que os compõem e também pelo seu processo de fabricação.

Outro ponto que reforça a importância do presente estudo é o fato da legislação, através da norma NBR15220, determinar valores de referência para a transmitância térmica de elementos construtivos de edificações. Deste modo a norma proíbe ou, no mínimo, desaconselha, o uso de certos elementos construtivos de acordo com as regiões geográficas e climáticas de utilização, levando fabricantes a buscarem soluções para que seus produtos atendam a estas novas exigências normativas, para permanecerem no mercado destas regiões.

O desenvolvimento de novos elementos construtivos, ou adequação dos existentes, por parte dos fabricantes vem exigindo a geração de novas propostas de matérias-primas, novas geometrias e novos processos de fabricação, que de algum modo necessitam ser validados antes de serem apresentados ao mercado.

Atualmente o método de validação é experimental, por meio de ensaio normatizado, entretanto para o desenvolvimento de novas propostas, ensaios práticos são onerosos e possuem tempo de resposta nem sempre adequados às necessidades da indústria. Em se tratando de desenvolvimento de novos produtos, a utilização de modelos que possam simular o comportamento tanto dos elementos construtivos quanto dos ambientes onde estes elementos serão utilizados é uma ferramenta de grande valia. Todavia, esta ferramenta deve se mostrar confiável e possibilitar respostas rápidas.

Neste sentido, a busca por modelos matemáticos que possam auxiliar na predição de comportamentos termo físicos dos materiais e estruturas por eles compostos é um campo de pesquisa a ser explorado. Assim, objetivando elucidar a questão da transferência de calor nas cavidades enclausuradas, formada pela sobreposição de elementos construtivos como os blocos de concreto, é que este trabalho se apresenta, propondo uma nova maneira para auxiliar a modelagem física, por meio de uma correlação matemática de Nusselt modificada em cavidades enclausuradas onde são acoplados fenômenos de convecção e radiação.

### 1.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho visa analisar o fenômeno de transferência de calor no interior de uma cavidade enclausurada exposta a diferença de temperatura entre suas superfícies verticais

10

opostas, condição característica de paredes de edificações compostas por blocos de concreto, como forma de contribuição para o aprimoramento da eficiência energética de edificações.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os principais pontos de ineficiência térmica de um bloco de concreto tipicamente utilizado como elemento de vedação na envoltória de edificações;
- Desenvolver modelagem teórico-experimental do fenômeno de transferência de calor que ocorre em cavidades enclausuradas;
- Propor correlação matemática inovadora para cavidades enclausuradas com foco na melhoria do desempenho de envoltórias compostas por blocos de concreto;
- Validar a correlação matemática proposta por meio de comparação com resultados numéricos e experimentais;
- Propor alternativa de modificação das cavidades do elemento construtivo visando melhoria de eficiência energética de edificações.

### 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Primeiramente, na introdução, foi apresentada uma visão geral sobre o consumo energético da civilização moderna, e a preocupação com o crescente aumento da demanda por eletricidade sem a existência de equivalente geração deste recurso. Ainda neste capítulo, a eficiência energética de edificações foi colocada no centro da discussão e então foram elencados cinco grandes grupos de variáveis que influenciam no seu desempenho energético. Feita esta contextualização foi então apresentado o bloco de concreto como elemento de estudo e sua influência no projeto de climatização de ambientes. Ao final da introdução foram apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

No segundo capítulo, está a revisão bibliográfica, momento em que são apresentados os conceitos de transferência de calor, seu equacionamento, características típicas de cavidades enclausuradas e números adimensionais. O capítulo segue com uma pesquisa das várias correlações matemáticas apresentadas na literatura para a transferência de calor em cavidades enclausuradas, juntamente com as restrições a cada uma destas correlações dadas pelos limites sob os quais foram apresentadas. Ainda no segundo capítulo são apresentados comentários a respeito de artigos cujos temas dizem respeito a modelagens numéricas de fenômenos similares ao da transferência de calor em blocos de concreto, bem como artigos que tratam da barreira de radiação. Ao final do capítulo é então abordado o tema da transmitância térmica e a recomendação da norma NBR 15220, neste momento também é apresentado o dispositivo experimental, Caixa Quente Protegida, tendo como objetivo deixar claro as restrições e limitações sob as quais os valores experimentais foram coletados e as incertezas destas medições.

No terceiro capítulo encontra-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho, momento onde são descritas as etapas, sequência e os objetivos de cada passo desta pesquisa.

No capítulo seguinte é abordada a modelagem computacional, *software* utilizado, a definição da amostra com suas características e propriedades, etapas da simulação computacional, equacionamento para conservação de massa, movimento e energia, discretização, simplificações e teste de convergência, tendo como referência valores obtidos em ensaios práticos em blocos de concreto.

No capítulo cinco é tratado do fenômeno de transferência de calor que ocorre na cavidade enclausurada, é apresentada a analogia elétrica com o arranjo de resistências térmicas utilizado, destacando a condição de fluxos de calor distintos entre a região onde há cavidade e a região totalmente sólida de um bloco de concreto. No mesmo capítulo é apresentada uma análise da influência de cada modo de transferência de calor no total transferido pelo bloco, são analisadas também as correlações de Nusselt apresentadas na literatura e suas limitações devido seus critérios de utilização. Também são verificados os erros de cada correlação quando comparadas aos resultados experimentais em blocos de concreto.

No capítulo seis é apresentada a determinação da nova correlação para o Número de Nusselt "modificado", onde são acoplados os fenômenos convectivos e radiativos que ocorrem em cavidades enclausuradas. É apresentada a validação da modelagem comparando resultados numéricos com os experimentais e confrontado com valores obtidos com a nova correlação. Então, é feita uma análise dos erros comparando as correlações da literatura que têm seus critérios de utilização atingidos, os resultados obtidos por meio da nova correlação proposta e tendo como referência os dados experimentais.

Por fim, encontram-se as considerações e as conclusões encontradas após este trabalho de pesquisa, bem como são apresentadas alternativas para melhoria do elemento construtivo tendo como base os resultados encontrados e sugeridos temas para continuidade deste estudo.

### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Transferência de Calor é um fenômeno físico natural que ocorre sempre que houver diferença de temperatura entre dois sistemas, ou um gradiente de temperatura no interior de um mesmo sistema.

Segundo KREITH (1977), são definidos na literatura três modos de transferência de calor a saber: a condução, a radiação e a convecção. Destes modos, os dois primeiros seguem estritamente a definição de que havendo diferença de temperatura haverá transferência de calor e, por isso, são considerados processos de transferência de calor. O terceiro, a convecção, depende também do transporte macroscópico da massa, entretanto por igualmente efetuar a transferência de calor entre regiões de maior temperatura para as de menor, esse modo se tornou aceito.

Como mencionado, o modo de transferência de calor por convecção depende de dois mecanismos: um microscópico, relacionado ao movimento molecular aleatório – chamado de difusão; e outro macroscópico, provocado pelo movimento de massa – dito advecção, como visto em INCROPERA (2008).

A literatura traz relações matemáticas para se quantificar essa energia transferida, nos três diferentes modos.

Para o processo condutivo encontra-se a lei de Fourier que relaciona a diferença de temperatura, a área pela qual ocorre a transferência energética, a espessura do meio que está sob a diferença de potencial térmico e a característica difusiva deste meio, conforme mostrado na Equação 01:

$$q' = -k.A.\frac{dT}{dx} \tag{01}$$

Onde:

q': representa a taxa de calor transferido entre os sistemas;

A: é a área perpendicular ao fluxo de calor;

dT: é o diferencial de temperatura entre os sistemas;

dx: é o diferencial da distância entre os pontos de medição de temperatura; e

k: é a condutividade térmica do material.

Para o processo radiativo, a lei de Stefan-Boltzmann, considerando todo o espectro de comprimento de onda, define que a taxa líquida radiativa depende da diferença de temperaturas absolutas das superfícies – elevadas à quarta potência – da área exposta a essa radiação, de uma característica das superfícies quanto sua capacidade de refletir e absorver radiação dita emissividade além de uma constante de proporcionalidade. É expressa pela Equação 02:

$$q' = \varepsilon. \sigma. A. \left(T_s^4 - T_{vis}^4\right) \tag{02}$$

Onde:

- ε: representa a emissividade da superfície;
- σ: é a constante de Stefan-Boltsmann, que segundo NIST CODATA (2018),  $σ = (5,670367 \pm 0,000013) \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ;
- A: é a área perpendicular ao fluxo de calor;

T<sub>s</sub>: é a temperatura absoluta da superfície, em Kelvin; e

T<sub>vis</sub>: é a temperatura absoluta da vizinhança, em Kelvin.

Uma outra forma de expressar a taxa de transferência de calor por radiação é através da Equação 03:

$$q' = h_{rad}. A. \Delta T \tag{03}$$

Onde:

h<sub>rad</sub>: representa um coeficiente de transferência térmica radiativa, o qual pode ser calculado como mostrado na Equação 04;

$$\mathbf{h}_{rad} = \varepsilon. \, \sigma. \left( T_s^2 + T_{vis}^2 \right) \left( T_s + T_{vis} \right) \tag{04}$$

A: é a área perpendicular ao fluxo de calor;

 $\Delta T$ : é a diferença de temperatura entre os sistemas, dado por: (T<sub>s</sub> - T<sub>vis</sub>)

No que diz respeito ao modo de transferência de calor por convecção, encontra-se a lei de Newton do resfriamento, que relaciona o potencial térmico, a área pela qual ocorre a transferência energética e a característica do fluido, conforme Equação 05:

$$q' = h. A. \Delta T \tag{05}$$

Onde:

- h: representa uma constante de proporcionalidade, dita coeficiente de transferência convectiva de calor, condutância de película ou coeficiente de película;
- A: é a área perpendicular ao fluxo de calor;
- $\Delta T$ : é a diferença de temperatura entre os sistemas;

A transferência de calor por convecção depende de vários fatores, em especial as condições próximas da superfície, como: geometria, natureza do movimento, assim como das propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. Deste modo, como descrito por INCROPERA (2008), "qualquer investigação sobre a convecção se reduz, essencialmente, à investigação sobre os métodos de determinação do coeficiente convectivo (h)".

Como as características do fluido são essenciais para se determinar a transferência convectiva de calor, e o comportamento do fluido nas proximidades da superfície se difere das regiões mais afastadas, torna-se importante mencionar o conceito de camada limite.

Camada limite pode ser tratada como a região do fluido cujo comportamento sofre alteração pela interação com uma superfície. Essa alteração pode ocorrer devido vários fatores, recebendo diferentes denominações, como: camada limite hidrodinâmica – alteração da velocidade do fluido, devido fricção entre o fluido e a superfície – ou, camada limite de concentração – alteração da quantidade de determinada espécie no fluido, devido a transferência de massa – ou ainda, camada limite térmica – alteração de temperatura do fluido, devido a transferência de calor entre fluido e superfície.

Uma vez evidenciada a importância da camada limite no processo de transferência de calor, deve-se analisar o que pode alterar o comportamento do fluido no interior desta região.

Um dos fatores que interferem no comportamento do fluido é o perfil de escoamento, podendo este ser laminar ou turbulento. Neste caso encontra-se, como mostrado na Equação 06, a relação de Reynolds (Re) que é expressa por:

$$Re_x = \frac{\rho . u_{\infty} . x}{\mu} \tag{06}$$

Onde:

ρ: representa a massa específica do fluido;

 $u_{\infty}$ : é a velocidade do fluido na condição externa à camada limite;

x: é a dimensão característica percorrida pelo fluido em contato com a superfície;

μ: é a viscosidade dinâmica do fluido; e

Re<sub>x</sub>: é o número adimensional de Reynolds, que relaciona a força de inércia e a força viscosa do fluido.

Alguns outros grupos adimensionais se tornam importantes para o estudo da convecção, como é o caso do número de Prandtl (Pr), de Grashoff (Gr), de Rayleigh (Ra) e de Nusselt (Nu).

O número adimensional de Prandtl (Pr) relaciona a viscosidade cinemática do fluido com a sua difusividade térmica, ou seja, compara a difusão de quantidade de movimento e a difusão da quantidade de calor dentro do próprio fluido sendo assim uma referência de eficiência destas transferências nas camadas limites hidrodinâmica e térmica, como apresentado na Equação 07, é expresso por:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{07}$$

Onde:

- c<sub>p</sub>: calor específico do fluido a pressão constante;
- μ: é a viscosidade dinâmica do fluido;
- k: é a condutividade térmica do fluido;
- v: é a viscosidade cinemática do fluido; e
- $\alpha$ : é a difusividade térmica do fluido;

O número adimensional de Grashoff (Gr), na convecção livre, tem papel similar ao número de Reynolds, para convecção forçada, relacionando a força de empuxo e as forças viscosas do fluido, sendo apresentado como na Equação 08:

$$Gr_x = \frac{g.\beta.(T_s - T_\infty).x^3}{v^2} \tag{08}$$

Onde:

- g: é a aceleração da gravidade;
- $\beta$ : é o coeficiente de expansão térmica do fluido;
- T<sub>s</sub>: é a temperatura da superfície; e
- $T_{\infty}$ : temperatura do meio;
- x: é a distância percorrida pelo fluido em contato com a superfície;
- v: é a viscosidade cinemática do fluido; e

Cabe salientar que o coeficiente de expansão térmica do fluido (β) é dado por uma expressão que relaciona a massa específica e sua eventual variação em função da temperatura, numa dada pressão, como mostrado na Equação 09:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta T} \right)_p \tag{09}$$

onde:

- ρ: é a massa específica do fluido;
- T: é a temperatura do fluido; e
- p: é a pressão a qual o fluido está submetido.

Para gases ideais a relação  $\rho = p/(R.T)$  pode ser aplicada, desta forma o coeficiente de expansão térmica se reduz à Equação 10, mas neste caso deve-se empregar a temperatura absoluta, em Kelvin.

$$\beta = \frac{1}{T} \tag{10}$$

Já o número adimensional de Rayleigh (Ra) é outra forma de utilização que relaciona as forças de empuxo e as forças viscosas do fluido e também a sua difusividade térmica, é usado quando a movimentação do fluido ocorre de forma natural, trata-se do produto do número de Grashoff e número de Prandlt, portanto expresso como na Equação 11:

$$Ra_{x} = Gr_{x} \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{s} - T_{\infty}) \cdot x^{3}}{v \cdot \alpha}$$
(11)

Por fim, o número adimensional de Nusselt (Nu), que representa o gradiente de temperatura adimensional numa superfície ou, por outra perspectiva, relaciona a resistência térmica de condução e a resistência térmica de convecção do fluido, é apresentado como na Equação 12:

$$Nu_x = \frac{h.x}{k} \tag{12}$$

Onde:

h: é o coeficiente convectivo de transferência de calor do fluido;

x: é a dimensão característica do problema;

k: é a condutividade térmica do fluido;

### 2.4. CORRELAÇÕES MATEMÁTICAS

A transferência de calor em cavidades é um caso particular do fenômeno de convecção livre e bastante comum no interior da envoltória das edificações. Uma vez que um determinado fluido se encontra enclausurado, e exista um gradiente de temperatura, acontece uma mudança localizada da massa específica deste fluido que, por sua vez, provoca o surgimento de uma força de empuxo que pode provocar movimentação do fluido. Quando a força de empuxo se torna maior que as forças viscosas do fluido, ocorre então movimentação macroscópica da massa, movimentação essa que pode influir substancialmente na capacidade do fluido de transferir calor.

Existe, portanto, no fluido um mecanismo microscópico de transferência de calor – difusivo – que depende do contato molecular e da característica química das ligações atômicas, mas existe também um segundo mecanismo, agora macroscópico, de transferência de calor – advectivo – que depende de características de velocidade do fluido, tipo de escoamento, viscosidade, temperatura, pressão, forças de campo, etc. (INCROPERA, 2008)

A lei de Newton do resfriamento atribui a uma constante de proporcionalidade (h) a função de considerar todas as influências, tanto difusivas quanto advectivas, com o objetivo de englobar todas as variáveis. Encontrar o valor adequado para o coeficiente convectivo de transferência de calor, nome dado à referida constante de proporcionalidade (h), passa a ser o grande desafio de problemas de convecção, em especial quando se trata de convecção livre e ainda mais no caso particular de cavidades enclausuradas.

Com o objetivo de trazer ferramentas para auxiliar a determinação do coeficiente convectivo de transferência de calor, são encontradas na literatura correlações matemáticas, envolvendo as diversas variáveis de influência. Uma definição, segundo FERREIRA (1999), diz que correlação é uma relação de dependência mútua de duas ou mais variáveis que ocorrem em conjunto ou de maneira não casual.

Quando fenômenos particulares de transferência de calor são devidamente observados, pode-se correlacionar números adimensionais como Nusselt (Nu), Rayleigh (Ra) e Prandtl (Pr), como apresentado na literatura, INCROPERA (2008). Entretanto, estas correlações ficam restritas aos casos particulares não devendo ser aplicadas fora dos limites determinados, situações em que ficam sujeitas a resultados equivocados por não mais reproduzirem o fenômeno físico. Diversas correlações são obtidas para o número de Nusselt, nas mais distintas condições de escoamento. Entretanto, para regiões enclausuradas como cavidades verticais, encontram-se as correlações empíricas propostas por alguns autores, determinadas experimentalmente.

Max JACOB (1949) apresentou no livro "*Heat Trasfer*, Vol 1" as primeiras correlações encontradas para cavidades enclausuradas, Equações 13 e 14, para diferentes faixas de Grashof

$$\overline{Nu_L} = 0,18.\,Gr^{1/4}.\,\left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{9}}$$
(13)

para:

$$[2x10^4 < Gr < 2x10^5]$$

e:

$$\overline{Nu_L} = 0,065.\,Gr^{1/3}.\left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{9}} \tag{14}$$

para:

$$[2x10^5 < Gr < 11x10^6]$$

LANDIS e YANOWITZ (1966) correlacionaram o número de Nusselt com uma razão de forma (L/W), razão entre a espessura da cavidade pela largura da região vertical uma vez que fixa a altura da cavidade, como expresso na Equação 15.

$$\overline{Nu_L} = 0,123. \left(\frac{L}{W}\right)^{0,84}. (Gr. \Pr)^{0,28}$$
(15)

para:

$$\begin{bmatrix} H = 10 \\ L < 2 \\ 2x10^3 < Gr. Pr. \left(\frac{L}{W}\right)^3 < 10^7 \end{bmatrix}$$

onde:

L: é a distância entre as duas paredes verticais que o fluxo de calor dever percorrer e onde está enclausurado o fluido;

W: é a largura da superfície vertical; e

H: é a altura da superfície vertical.

Ainda segundo estes autores, as correlações apresentadas foram validadas para três fluidos distintos a saber: ar, água e óleos de silicone.

MACGREGOR e EMERY (1969), publicaram em seu artigo "*Free Convection Through Vertical Plane Layers – Moderate and High Prandtl Number Fluids*" uma correlação utilizando outra razão de forma (H/L), relacionando a altura da cavidade pela sua espessura, e limitando esta razão entre 1 e 40 vezes.

Assim, os autores trazem duas correlações para cavidades enclausuradas, conforme Equações 16 e 17.

$$\overline{Nu_L} = 0,42. Ra^{1/4}. Pr^{0,012}. \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,3}$$
(16)

para:

$$\begin{bmatrix} 10 < \frac{H}{L} < 40\\ 1 < Pr < 2x10^{4}\\ 10^{4} < Ra < 10^{7} \end{bmatrix}$$

e:

$$\overline{Nu_L} = 0,046. \, Ra^{1/2} \tag{17}$$

para:

$$\begin{bmatrix} 1 < \frac{H}{L} < 40\\ 1 < Pr < 20\\ 10^{6} < Ra < 10^{9} \end{bmatrix}$$

onde:

- L: é a distância entre as duas paredes verticais que o fluxo de calor dever percorrer e onde está enclausurado o fluido; e
- H: é a altura da superfície vertical.

CATTON (1978) em sua obra "*Natural Convection in Enclosure*" propôs uma correlação similar às de MACGREGOR e EMERY, porém delimita sua utilização à razão de forma (H/L) em até 10 vezes, apresentando também duas correlações para cavidades enclausuradas, conforme Equações 18 e 19.

$$\overline{Nu_L} = 0.22. \left(\frac{Pr}{0.2+Pr} \cdot Ra_L\right)^{0.28} \cdot \left(\frac{H}{L}\right)^{-\frac{1}{4}}$$
(18)

para:

$$\begin{bmatrix} 2 < \frac{H}{L} < 10 \\ Pr < 10^5 \\ 10^3 < Ra < 10^{10} \end{bmatrix}$$

e:

$$\overline{Nu_L} = 0,18. \left(\frac{Pr}{0,2+Pr}.Ra_L\right)^{0,29}$$
<sup>(19)</sup>

para:

$$\begin{bmatrix} 1 < \frac{H}{L} < 2\\ 10^{-3} < Pr < 10^{5}\\ 10^{3} < \frac{\text{Ra.Pr}}{(0,2+Pr)} \end{bmatrix}$$

As Equações 16, 17, 18 e 19 foram estabelecidas considerando paredes verticais externas com temperaturas constantes e distintas e as demais paredes, tanto verticais quanto horizontais, adiabáticas. Com relação ao fluido no interior da cavidade, foi utilizado ar.

### 2.5. ESTUDOS COM MODELOS NUMÉRICOS

Estudos utilizando modelos numéricos que abordam a convecção natural em cavidades enclausuradas são encontrados na literatura, em grande parte associados a aplicações em vidros, tanto como material utilizado em janelas quanto em painéis solares.

SHARMA, *et al.* (2007), apresentaram um estudo da influência da radiação térmica no processo de convecção natural turbulenta em cavidades. Focaram seu trabalho em um modelo bidimensional em que a base da cavidade é aquecida e as demais faces são mantidas a baixa temperatura. Analisaram também a influência da emissividade da parede e do coeficiente

22

de transferência de calor externo. Demonstraram que devido ao aumento de temperatura das paredes frias em consequência do processo de transferência de calor radiativo, ocorre uma redução da ordem de 18 a 27% na transferência de calor por convecção no interior da cavidade.

NOGUEIRA, *et al.* (2011), apresentaram um estudo numérico variando a razão de forma, ou seja, a razão entre a altura e a espessura de uma cavidade com largura infinita, assumindo valores para a espessura com 50%, 100%, 200% e 300% da altura da cavidade. Utilizam a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para simular, através de modelos 2D, problemas de convecção natural com o objetivo de determinar o efeito da razão de aspecto e do número de Rayleigh no comportamento do fluido e na transferência de calor na cavidade. O modelo considera fluido newtoniano e incompressível, além de utilizar coordenadas retangulares (x,y) e a aproximação de Boussinesq. Concluem que o número de Rayleigh apresenta uma grande influência no perfil do fluxo e na transferência de calor dentro da cavidade bem como na espessura da camada limite térmica. Verificaram também que o número de Nusselt é fortemente dependente da razão de forma.

PRINCIPI e FIORETTI (2012), trouxeram uma análise de desempenho de duas propostas para melhorar a resistência térmica de elementos construtivos de edificações. Em seu trabalho apresentaram a utilização de um material com característica de mudança de fase (PCM) no interior de blocos de construção com o objetivo de atenuar a oscilação térmica existente ao longo do dia. Apresentaram também, uma aplicação de cobertura da superfície interna das cavidades do bloco com material de baixa emissividade. Juntamente com resultados experimentais os autores apresentaram uma análise numérica baseada em simulações computacionais utilizando o programa comercial COMSOL<sup>®</sup>, onde mostraram graficamente a relação da condutividade equivalente do bloco em função da emissividade das paredes para três diferentes configurações de cavidade interna. Ao final concluíram que ambas as propostas produzem efeito positivo quanto à redução na transferência de calor, sendo que com a cobertura de baixa emissividade afirmaram ser possível uma redução da ordem de 20% na condutividade térmica equivalente do bloco para uma variação de 0,9 para 0,5 na emissividade.

PRINCIPI e FIORETTI (2014), desenvolveram um estudo teórico do impacto do recobrimento via pintura das superfícies internas de tijolos de concreto, variando de 0,1 a 0,9 o valor da emissividade. Este estudo foi feito por meio de modelo numérico 2D, em regime permanente, com propriedades constantes e sem transferência de massa. Foram apresentados

resultados de 20 casos simulados chegando à conclusão que é possível reduzir até 24% a condutividade térmica equivalente do bloco para o caso de emissividade 0,1.

BAÎRI, *et al.* (2014), apresentaram um resumo dos diversos trabalhos relacionados à convecção natural em cavidades, passando pelas principais aplicações, as soluções encontradas por pesquisas experimentais, teóricas e numéricas. Listaram e comentaram trabalhos cujo foco está na influência da geometria da cavidade, outros abordaram modelos com fluido turbulentos, na inclinação da cavidade, na estratificação térmica, ou na temperatura localizada em pontos da cavidade e outros trabalhos ainda cujo objetivo está na análise da influência da radiação ou nos fluidos convectivos. Desse modo aos autores contribuíram para a compilação e agrupamento dos diversos trabalhos já apresentados sobre o tema, demonstrando assim sua relevância, motivo pelo qual continuam sendo objeto de estudo.

MAVROMATIDIS (2016), apresentou uma comparação entre a simulação computacional e estudos experimentais acoplando a transferência de calor por convecção natural e os efeitos da radiação através das paredes da cavidade para um comportamento transiente, usando filmes de baixa emissividade no interior da cavidade para reduzir a transferência de calor. O mesmo autor também havia apresentado anteriormente duas correlações matemática, uma para fluxo laminar, Equação 20, e outra para fluxo turbulento, Equação 21.

$$\overline{Nu_L} = 0.68 + \left\{ \left( 0.670 \ Ra^{\frac{1}{4}} \right) / \left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{4}{9}} \right\}$$
(20)

$$\overline{Nu_L} = \left\{ 0,825 + \left(0,387 \, Ra^{\frac{1}{6}}\right) / \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{8}{27}} \right\}^2 \tag{21}$$

Com exceção desta última proposta, todas as outras correlações até então apresentadas utilizam a Equação 22 para modelar o fenômeno radiativo no interior da cavidade e, por vezes, este fenômeno é erroneamente negligenciado pelo argumento de se estar trabalhando com baixas temperaturas.

$$h_{rad} = \varepsilon_r \sigma \left( T_h^2 + T_c^2 \right) (T_h + T_c)$$
<sup>(22)</sup>

onde:

 $\varepsilon_r$ : é a emissividade resultante para duas superfícies paralelas, segundo INCROPERA (2008) ela é calculada pela Equação 23;

$$\varepsilon_r = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{\varepsilon_h}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right) - 1\right]}$$
(23)

εh: é a emissividade da parede do lado de maior temperatura da cavidade;

 $\varepsilon_c$ : e emissividade da parede do lado de menor temperatura da cavidade;

Cabe, porém, observar que as correlações das Equações 20 e 21, as quais acoplam os fenômenos convectivos e radiativos que ocorrem no interior da cavidade, não apresentam em sua formulação a variação da emissividade da parede.

PEREIRA (2017), apresenta análise de aprimoramento do desempenho térmico do bloco de concreto, alterando a geometria e quantidade de cavidades no interior desse elemento construtivo. Em paralelo apresenta também uma integração entre um programa de simulação energética de edificações (BES) com um programa de fluido dinâmica computacional (CFD). Essa abordagem de simulação termoenergética é utilizada para a análise dos efeitos geométricos combinados aos fenômenos de convecção e radiação nos elementos construtivos, resultando em simulações transientes na escala das edificações e demonstrando ter maior precisão.

### 2.6. ESTUDOS COM BARREIRA DE RADIAÇÃO

Uma barreira de radiação diz respeito à utilização de material que possua a propriedade de refletir a energia proveniente da radiação, como forma de reduzir o fluxo de calor total que atravessa a superfície. Estudos utilizando barreira de radiação associados à edificações são encontrados na literatura principalmente relacionados a aplicações em forros e áticos.

WINARSKY e O'NEAL (1996), apresentaram um estudo demonstrando a influência de uma barreira de radiação na transferência de calor por um ático, definem três diferentes condições de instalação da barreira de radiação, *Truss Radiant Barrier* (TRB), quando instalada acompanhando a inclinação do teto, *Horizontal Radiant Barrier* (HRB),

quando instalada horizontalmente sobre o forro e *Deck Radiant Barrier* (DRB), quanto instalada sob o forro. Os autores compararam resultados obtidos por modelos matemáticos e dados experimentais, e apresentaram resultados de redução de transferência de calor da ordem de 39% pelos modelos matemáticos contra 33% no teste prático.

MICHELS, LAMBERTS e GÜTHS (2008) desenvolveram um estudo para avaliar a eficiência de alguns tipos materiais comerciais como barreiras de radiação também em áticos de residências. Foram realizados experimentos *in loco* na cidade de Florianópolis e monitoradas variáveis como temperatura e fluxo de calor e comparados com experimentos laboratoriais. A melhor amostra, com alumínio dos dois lados de um substrato de papel cartão com 0,5mm, atingiu uma redução do fluxo de calor em 70% no dia de maior radiação solar, enquanto a amostra de embalagem longa vida composta por papel cartão, alumínio e filme de polietileno, reduziu em 42%.

MEDINA (2010) desenvolveu um comparativo entre experimentos práticos e simulação computacional para avaliar o comportamento de barreira de radiação em uma residência. Utilizou para tanto duas plantas idênticas sendo uma a referência e a outra utilizada para aplicação da barreira de radiação. Em paralelo utilizou modelo computacional de transferência de calor e massa. Na medida em que a resistência térmica da isolação foi aumentada devido a barreira de radiação, ocorreu redução no fluxo de calor e os resultados numéricos foram bastante próximos dos valores obtidos experimentalmente.

LEE, LIM e SALLEH (2016) apresentaram uma revisão sobre sistemas de isolação reflectiva com foco em barreira de radiação. Os principais parâmetros utilizados para se avaliar a performance de barreiras de radiação são a redução do fluxo de calor, da carga térmica e da temperatura do ar no ático durante o verão. Apresentaram que em média as barreiras de radiação instaladas em áticos podem reduzir o fluxo de calor de 26% a 50%. O método mais comumente utilizado para medir a resistência térmica é a caixa quente protegida que permite, de modo experimental, testar amostras maiores próximas das condições reais, enquanto que medições de fluxo de calor são utilizadas para pequenas amostras. Cálculos utilizando abordagens teóricas tendem a resultar em valores maiores de resistência térmica que os valores reais, além de não considerarem a degradação devido ao acúmulo de poeira, condensação e oxidação.

### 2.7. TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE ENVOLTÓRIAS

A norma ABNT-NBR 15220 de 2003, que trata de desempenho térmico de edificações, em sua parte 2, traz entre outros pontos os métodos de cálculo do coeficiente global de transferência de calor – ao qual chama transmitância térmica. O método apresentado na norma, toma como base a proposta da norma ISO 6946:1996(E) "Building components and building elements – Thermal resistance and thermal transmittance – Calculation methods."

Na NBR 15220, apesar de apresentar uma alternativa teórica para o cálculo da resistência térmica (Rt), determina que, sendo possível, os valores devem ser obtidos via ensaios normalizados.

Nesta direção, TURCO (2011) desenvolveu um equipamento, que atende às exigências da norma NBR-6488/1980 e da norma internacional ASTM C1363 – 05, para a determinação da transmitância térmica de envoltórias e, na oportunidade, também foi apresentada uma análise detalhada sobre as exigências normativas para o aparato experimental.

### 2.7.1. Dispositivo Experimental

Alguns métodos são usualmente mais utilizados para a determinação das propriedades térmicas de materiais isolantes e sua seleção está diretamente relacionada a faixa de temperatura na qual o isolante é submetido bem como à estrutura interna do material isolante. Métodos como: disco quente (*hot-disc*), placa quente protegida (*guarded hot-plate*), medição de fluxo de calor (*heat flow meter*), tubo quente (*hot-pipe*), fio quente (*hot-wire*), dentre outros, são exemplos de métodos utilizados para a determinação de propriedades térmicas de materiais homogêneos. Estes métodos foram descritos em TURCO (2011).

Quando a amostra não é uniforme ao longo de toda a área de medição, ou sua composição não é homogênea, utiliza-se o método da caixa quente protegida (*guarded hot-box*). Esta configuração de amostra não uniforme é típica de partes de edificações como janelas, pisos, tetos, paredes e outros elementos em geral.

O dispositivo, caixa quente protegida, é aplicado na determinação de propriedades térmicas de materiais, homogêneos e não homogêneos. Este dispositivo leva em conta as características do fenômeno físico de transferência de calor, necessitando uma diferença de

temperatura entre os ambientes de cada lado do elemento de interesse a ser ensaiado. Esta diferença de temperatura é estabelecida por meio do aquecimento de um dos lados do painel e da manutenção de uma determinada temperatura no outro lado. As temperaturas em ambos os lados do painel devem ser mantidas estáveis e, como a velocidade do ar na proximidade de uma superfície pode interferir fortemente na transferência de calor, também deve haver um controle do fluxo de ar nestas regiões. (TURCO, 2011).

O equipamento desenvolvido no Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR (LST) é composto de duas câmaras externas, sendo uma câmara fria cujas dimensões são 3,66 m de comprimento, 3,22 m de largura e 3,45 m de altura, e outra câmara de guarda com 3 m de comprimento, 3,22 m de largura e 2,60 m de altura. Uma terceira câmara, dita caixa quente, é instalada no interior da câmara guarda, com dimensões de 0,5 m de comprimento, 1,15 m de largura e 1,48 m de altura, onde são controladas as condições do ar que fica enclausurado em seu interior. Entre a caixa quente e a câmara fria é então disposta a amostra, como mostrado na Figura 1.



Figura 1: Caixa Quente Protegida, disposição esquemática de funcionamento

Fonte: TURCO, 2011.

Neste equipamento determina-se, após ser atingido o regime permanente, a transmitância térmica da amostra, através da relação entre a leitura da potência necessária para

manter a diferença de temperatura entre a caixa quente e a câmara fria e a área conhecida da amostra (MOURA, 1993).

Os detalhes da adaptação do calorímetro do laboratório de sistemas térmicos da PUCPR para habilitá-lo ao método da caixa quente protegida, bem como a instrumentação utilizada e sua análise de incertezas são apresentados em TURCO (2011), sendo apresentado um resumo das grandezas medidas e sensores utilizados na Tabela 1.

Grandeza	Тіро	Quantidade	Tipo de Leitura
Temperatura	Termopar tipo T	17	Analógica – Tensão
Umidade Relativa	RHT-DM	2	Analógica – Tensão
Tensão	Transdutor de grandezas elétricas	1	Digital – RS232
Corrente	Transdutor de grandezas elétricas	1	Digital – RS232
Potência	Transdutor de grandezas elétricas	1	Digital – RS232
Velocidade do ar	Esfera quente	1	Direta no visor

Tabela 1: Instrumentação empregada no ensaio

Fonte: TURCO, 2011.

O dispositivo Caixa Quente Protegida desenvolvido apresenta uma incerteza na transmitância térmica em elementos não homogêneos de  $\pm 0,09 \text{ W m}^{-2} \text{K}^{-1}$ , ou seja  $\pm 2,7 \%$ , e um resumo das incertezas de medição da Caixa Quente Protegida é apresentado na Tabela 2 e uma visualização do equipamento pode ser feita pelas imagens apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Caixa Quente: a) aberta, b) instrumentada e c) posicionada para estabilização



Fonte: TURCO, 2011.

Grandeza	Тіро	Relação	Incerteza
Temperatura (T <sub>CmQ</sub> )	Е	-	±0,7 K
Temperatura (T <sub>CxQ</sub> )	Е	-	±0,5 K
Temperatura (T <sub>CmF</sub> e tq <sub>am</sub> )	Е	-	±0,4 K
Temperatura (tf <sub>am</sub> )	Е	-	±0,6 K
Temperatura (∆T <sub>ex</sub> )	S	$\Delta T_{ex} = (T_{CxQ} - T_{CmQ})$	±0,8 K
Temperatura (ΔT <sub>cal</sub> )	S	$\Delta T_{cal} = (T_{CxQ} - T_{CmF})$	±0,6 K
Temperatura ( $\Delta T_{am}$ )	S	$\Delta T_{am} = (Tq_{am} - Tf_{am})$	±0,7 K
Comprimento (L, H)	Е	-	±0,0005 m
Área (A <sub>am</sub> )	S	$A_{am} = L \cdot H$	±0,0006 m <sup>2</sup>
Potência da Resistência (Q <sub>res</sub> )	Е	-	±0,4 W
Curva Correção Caixa Quente (Q <sub>cx</sub> )	Е	-	±0,6 W
Curva Correção Calorímetro (Q <sub>cal</sub> )	Е	-	±1 W
Potência pela amostra (Q <sub>am</sub> )	Е	$Q_{am} = (Q_{res} - Q_{cal} - Q_{cx})$	±1 W
Coef. Global Transf. Calor (U <sub>am</sub> )	S	$U_{am} = [Q_{am}/(A_{am} \cdot \Delta T_{cal})]$	±0,09 W/(m².K)

Tabela 2: Resumo das incertezas de medição utilizadas

Fonte: TURCO, 2011.

TURCO (2011) apresentou resultados obtidos com o dispositivo Caixa Quente Protegida, quando foram feitas medições em uma amostra de parede composta por blocos de concreto sob três diferentes condições de diferença de temperatura, e foi determinada a transmitância térmica média deste elemento construtivo como sendo 3,33 W/(m<sup>2</sup>.K). Os resultados obtidos também podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados encontrados nos ensaios experimentais do bloco de concreto original

	#1	#2	#3	Unidade
T' <sub>CxQ</sub>	46,3	44,1	39,1	[°C]
h <sub>ext</sub>	12,8	11,4	11,3	[W/(m².K)]
h <sub>int</sub>	19,9	20,6	20,5	[W/(m².K)]
T' <sub>CmF</sub>	14,7	17,7	17,8	[°C]
$\Delta T'_{am}$	31,6	26,4	21,3	[K]
Q <sub>am</sub>	70,5	55,2	43,9	[W]
U <sub>am</sub>	3,49	3,27	3,22	[W/(m².K)]
$\overline{U}_{am}$		3,33 ± 0,09	[W/(m².K)]	

Fonte: O Autor, adaptado de TURCO, 2011.
#### 2.7.2. Valores Apresentados em Norma

Como dito anteriormente, a norma NBR 15220 apresenta uma alternativa teórica para o cálculo da resistência térmica (Rt) como sendo a razão entre a espessura (e) de camada sólida e a condutividade térmica do material (k). Esta mesma norma apresenta uma tabela com dados de resistência térmica para câmaras de ar não ventiladas (R<sub>ar</sub>), Tabela 4. Observa-se ainda que, em elementos com câmaras de ar circulares, deve-se fazer uma transformação da área desta circunferência em uma área equivalente a um quadrado com centros coincidentes.

Cabe ressaltar que os valores apresentados na Tabela 4, são válidos para uma temperatura média da camada entre 0°C e 20°C e, ainda, com a diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa não superior a 15°C.

		Resist	Resistência térmica R <sub>ar</sub> (m².K)/W						
Naturoza da	Espessura "e" da câmara de ar	Direção do fluxo de calor							
superfície da câmara de ar		Horizontal	Ascendente	Descendente					
	cm	$\Rightarrow$	Ŷ	Û					
Superfície de alta	1,0 ≤ e ≤ 2,0	0,14	0,13	0,15					
emissividade	2,0 < e ≤ 5,0	0,16	0,14	0,18					
ε > 0,8	e > 5	0,17	0,14	0,21					
Superfície de baixa	1,0 ≤ e ≤ 2,0	0,29	0,23	0,29					
emissividade	2,0 < e ≤ 5,0	0,37	0,25	0,43					
ε > 0,2	e > 5	0,34	0,27	0,61					

Tabela 4: Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura

Fonte: Excerto da norma NBR 15220: Tabela B.1

Ainda segundo a norma NBR 15220, referente à resistência térmica convectiva nas regiões externas, são apresentados valores de referência para algumas condições típicas de aplicação, como reproduzido na Tabela 5.

Tabela 5: Resistência térmica superficial interna e externa.

	R <sub>si</sub> (m².K)/W		R <sub>se</sub> (m².K)/W					
Dire	eção do fluxo de c	calor	Direção do fluxo de calor					
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente			
		<u> </u>	$\hat{\Gamma}$		<u> </u>			
0,13	0,1	0,17	0,04	0,04	0,04			

Fonte: Excerto da norma NBR 15220: Tabela A.1

Tanto a norma ISO 6946:1996, como a NBR 15220, definem o cálculo da resistência térmica de elementos ou componentes baseando-se no método de arranjo de resistências – uma analogia com o arranjo de resistências elétricas – como apresentado na Figura 3 e pela Equação 24, ou seja, considerando que não há diferença significativa de fluxo de calor pelas regiões sólidas e pelas regiões que contenham cavidades.

$$R_t = R_{se} + R_{eq} + R_{si} \tag{24}$$

onde:

R<sub>t</sub>: representa a resistência térmica total do elemento;
R<sub>se</sub>: é a resistência térmica superficial para o ambiente externo;
R<sub>eq</sub>: é a resistência térmica equivalente associada as camadas que compõem o elemento; e
R<sub>si</sub>: é a resistência térmica superficial para o ambiente interno.

Figura 3: Arranjo de resistências térmicas utilizado na norma NBR 15220.



Fonte: Autor, 2019

Para o cálculo da resistência térmica equivalente do elemento ( $R_{eq}$ ) é necessário fazer a diferenciação entre arranjo de resistências em série, onde o valor equivalente é encontrado pela soma simples das resistências das camadas como mostrado na Equação 25, ou se o arranjo de resistências está em paralelo, quando o valor equivalente se dá pela Equação 26.

$$R_{eq\_s} = \sum_i R_i \tag{25}$$

onde:

R<sub>eq\_s</sub>: representa a resistência equivalente para resistências em série; e
R<sub>i</sub>: representa a resistência térmica da camada "i" que compõe o elemento.

$$R_{eq\_p} = \frac{A_t}{\sum_{i \in R_i}^{A_i}}$$
(26)

onde:

 $R_{eq_p}$ : representa a resistência equivalente para resistências em paralelo;

At: representa a soma das áreas parciais "Ai"; e

R<sub>i</sub>: representa a resistência térmica da cada camada "i" que compõe o elemento.

Para o caso específico de um bloco de concreto, a norma NBR 15220 – Parte 2, traz em seu Anexo "C" um exemplo de como calcular a resistência térmica de um elemento com dimensões 390 mm x 190 mm x 90 mm, como mostrado na Figura 4. Neste cálculo simplificado, a resistência térmica utilizada para a superfície externa é 0,04 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup>, já para a superfície interna é 0,13 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup>, o equivalente a coeficientes convectivos externos e internos respectivamente de 25 e 7,7 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>.

Figura 4: Parede com blocos de concreto colados, sem reboco



Fonte: Excerto da norma NBR 15220: Figura C.2

Para o cálculo da resistência equivalente – uma vez que o bloco de concreto é um misto de arranjo em série e paralelo – o valor final utilizado leva em conta a resistência térmica da região maciça de concreto com valor igual a 0,0514 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup> enquanto que para a região composta por concreto, cavidade de ar e novamente concreto, o valor foi composto por  $0,01 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$  para as regiões sólidas e 0,16 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup> para a cavidade de ar.

Ao final, o cálculo da resistência térmica equivalente apresentado para o exemplo da norma NBR 15220 tem valor de 0,3012 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup> para o bloco de concreto padrão, representado uma transmitância térmica (U) de 3,32 m<sup>2</sup> K W<sup>-1</sup>. Esse valor não atinge a condição mínima de 2,5 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> e, portanto, possui restrições de utilização em algumas regiões do território nacional, em especial nas regiões de zona térmica 01 e 02. Como pode

ser visto na Tabela 6, retirada da norma NBR 15.575-4. O zoneamento bioclimático do Brasil pode ser visto no Anexo 1.

<b>Transmitância Térmica U</b> W/m².K									
Zonas 1 e 2 Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8									
11.05	α <sup>a</sup> ≤ 0,6	$\alpha^{a}$ > 0,6							
$U \le 2,5$ $U \le 3,7$ $U \le 2,5$									
$\frac{1}{\alpha}$ é absortância à radiação solar da superfície externa da parede									

Tabela 6: Resistência térmica superficial interna e externa.

Fonte: Excerto da norma NBR 15575-4: Tabela 13

É esta restrição de transmitância térmica que vem promovendo desenvolvimento de novos elementos construtivos, em especial a condição dos blocos de concreto, exigindo adequação por parte dos fabricantes e pesquisadores.

#### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho analisa os modos de transferência de calor em cavidades enclausuradas considerando condições de temperatura, razão de aspecto e emissividade das superfícies. Propõem uma nova correlação matemática de Nusselt acoplando os efeitos convectivos e radiativos para que possa ser empregado na análise do desempenho térmico de blocos de concreto.

Trata-se de um trabalho teórico-experimental, onde inicialmente valores extraídos de testes práticos utilizando o método da Caixa Quente Protegida para a determinação da transmitância térmica em blocos de concreto, apresentados por TURCO (2011), são utilizados como valores de referência. É então desenvolvido um primeiro modelo computacional, capaz de reproduzir o comportamento da amostra real, de onde são estratificados os percentuais de cada modo de transferência de calor que atravessam a amostra e feita a análise da sua influência.

É então proposta uma segunda modelagem computacional isolando-se a cavidade enclausurada, objeto de estudo deste trabalho. Utiliza-se o programa comercial CFX<sup>®</sup> 14.5, versão acadêmica e são desenvolvidas centenas de simulações variando os principais fatores de influência no fenômeno de transferência de calor em cavidades enclausuradas, tais como razão de aspecto, diferença de temperatura das superfícies, temperatura média da cavidade e a emissividade das superfícies.

Com os resultados obtidos nestas simulações computacionais, uma nova correlação de Nusselt modificado é então proposta, acoplando-se os modos de transferência de calor convectivo e radiativo no interior da cavidade enclausurada, buscando-se tornar mais precisa a determinação da resistência térmica equivalente deste tipo de região, característica de envoltórias de alvenaria quando são utilizados blocos de concreto.

Por fim, novos ensaios experimentais são realizados, utilizando novamente o método da Caixa Quente Protegida, e seus resultados são então comparados com os valores obtidos por meio das correlações de Nusselt, tanto as correlações existentes na literatura quanto a nova correlação proposta, quando são analisados os erros para cada proposta, buscando evidenciar a efetiva contribuição da nova correlação na compreensão do fenômeno de troca em cavidades verticais e como consequência para a melhoria da eficiência energética de edificações.

#### 4. MODELAGEM COMPUTACIONAL

A abordagem computacional para problemas físicos complexos já pode ser considerada uma ferramenta comum no dia-a-dia da engenharia. Com o desenvolvimento dos novos softwares e hardwares houve aumento da capacidade de memória e da velocidade de processamento, assim novos modelos computacionais têm sido viabilizados e soluções mais próximas dos fenômenos reais têm sido atingidas.

Uma parede composta por blocos de concreto pode ser modelada computacionalmente de modo a possibilitar a predição de comportamento térmico sem a existência física da amostra, reduzindo assim tempo, custo e principalmente possibilitando uma compreensão mais abrangente do fenômeno que ocorre no interior destes elementos construtivos. Entretanto, para que se possa confiar nos resultados obtidos via simulação computacional, se faz necessário validar inicialmente o modelo e, para tanto, são utilizadas condições conhecidas e já testadas como parâmetro de comparação aos resultados obtidos via simulação.

## 4.1. EQUAÇÕES GOVERNANTES

As equações governantes que regem o fenômeno físico para o ar no interior de uma cavidade enclausurada são definidas pela conservação da massa, conservação de energia e conservação da quantidade de movimento, como expresso nas equações 27, 28 e 29. Massa:

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho\vec{u}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho\vec{v}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho\vec{w}) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho) = 0$$
(27)

Energia:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\vec{u}\frac{\partial T}{\partial x} + \vec{v}\frac{\partial T}{\partial y} + \vec{w}\frac{\partial T}{\partial z}\right) = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)$$
(28)

Quantidade de Movimento:

(em x) 
$$\rho\left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u}\frac{\partial \vec{u}}{\partial x} + \vec{v}\frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + \vec{w}\frac{\partial \vec{u}}{\partial z}\right) = \rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial z^2}\right)$$
(29a)

(em y) 
$$\rho\left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{u}\frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + \vec{v}\frac{\partial \vec{v}}{\partial y} + \vec{w}\frac{\partial \vec{v}}{\partial z}\right) = \rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu\left(\frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2}\right)$$
(29b)

(em z) 
$$\rho\left(\frac{\partial \vec{w}}{\partial t} + \vec{u}\frac{\partial \vec{w}}{\partial x} + \vec{v}\frac{\partial \vec{w}}{\partial y} + \vec{w}\frac{\partial \vec{w}}{\partial z}\right) = \rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{w}}{\partial z^2}\right)$$
(29c)

Ao se utilizar a modelagem numérica, cada nó de malha precisa garantir que a conservação de massa, energia e quantidade de movimento ocorra, e como o método é iterativo essa ação ocorrerá por muitas vezes até que os critérios de convergência sejam atendidos. Tendo esse conhecimento fica mais fácil perceber a necessidade de uma grande capacidade computacional para que fenômenos mais complexos possam ser reproduzidos. Para que seja possível reduzir o custo computacional, ou o tempo de simulação, são utilizadas hipóteses simplificadoras na modelagem tomando-se o cuidado de não alterar significativamente o fenômeno que se está estudando ou, em outras palavras, promover simplificação sem que haja a descaracterização do fenômeno.

No caso em questão não é diferente, por se tratar de uma abordagem em regime permanente, os termos que consideram variação de propriedade em função do tempo apresentam valor nulo, simplificando o equacionamento. Na mesma direção, outra simplificação utilizada foi a aproximação de Boussinesq com a linearização da dependência da massa específica do fluido com a temperatura, condição típica para o fenômeno de convecção natural que ocorre no interior da cavidade. Por fim, as forças de campo que ocorrem no sistema se resumem à força gravitacional, cuja atuação ocorre apenas na direção do eixo 'z'.

### 4.2. PRIMEIRA AMOSTRA

O primeiro passo para uma correta modelagem computacional é a reprodução de uma amostra representativa, mantendo as propriedades e características construtivas reais, mas também permitindo eventuais simplificações geométricas que não provoquem alterações no fenômeno real para possibilitar a redução do custo computacional, o que em última análise representa a diminuição do tempo de simulação.

Segundo a norma NBR 6136 existem classes de blocos de concreto, sendo a Classe AE utilizada para paredes externas, acima ou abaixo do nível do solo, podendo estar expostas à umidade ou intempérie sem receber revestimento de argamassa enquanto os blocos de Classe BE são utilizados acima do nível do solo, e devem ser revestidos e não devem estar expostas a intempéries. Um bloco deve apresentar dimensões e formas adequadas, compacidade, resistência, bom acabamento geométrico, boa aparência visual, de modo a garantir qualidade e economia às edificações. Além disso, deve promover isolamento termo acústico. O elemento construtivo para análise é um bloco de concreto não estrutural com as seguintes dimensões externas: largura do bloco (W) 0,390 m, altura do bloco (H) 0,190 m e espessura total do bloco (L) 0,140 m, e a espessura das paredes do bloco de concreto (t) 0,025 m. Este bloco possui duas cavidades internas, local onde ocorre o fenômeno de transferência de calor convectivo acoplado à transferência radiativa que é estudado neste trabalho.

A altura da cavidade é função do número de blocos que são colocados uns sobre os outros para a formação da altura da parede, na envoltória da edificação. Assim, a altura da cavidade é função da variável  $H_{cav}$ , que representa a distância entre as superfícies horizontais entre a base e o topo da parede.  $L_{cav}$  representa a distância entre as superfícies verticais da cavidade que separam os ambientes de maior e menor temperatura e seu valor é determinado pela espessura do bloco subtraída a espessura da parede do bloco nos dois lados. De modo similar, a largura da cavidade  $W_{cav}$  é dada pela largura do bloco dividida pelo número de cavidades internas existentes e subtraída a espessura da parede do bloco nos dois lados. Uma representação é apresentada na Figura 5.





Fonte: O Autor, 2019.

Na amostra em estudo, foi modelado inicialmente um único elemento onde  $H_{cav}$ ,  $L_{cav}$  e  $W_{cav}$  são mantidos constantes por serem características construtivas e possuírem valores iguais a 0,190 m, 0,090 m e 0,157 m respectivamente. A reprodução do elemento e o seu modelo virtual podem ser vistos na Figura 6.

O bloco é composto por cimento, areia, brita, pó de pedra e água e seu processo de fabricação passa pela homogeneização, envase no molde, prensagem, desmoldagem e cura, esta última podendo ser natural ou acelerada em fornos. Ao final do processo de fabricação os blocos assumem massa específica de aproximadamente 2400 kg/m<sup>3</sup>, propriedades mecânicas de resistência à compressão de variando de 4,5MPa até 16Mpa em função de sua classe e a condutividade térmica da região sólida do bloco é da ordem de 1,75 W/(m<sup>2</sup>.K), conforme NBR 15220.



Figura 6: Modelo Numérico: a) Geometria, b) Malha, c) Detalhe da Malha

Fonte: O Autor, 2019.

### 4.3. CFD

Para a análise computacional do comportamento térmico da envoltória vários *softwares* de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) possuem potencial para a análise proposta neste trabalho, os principais – além do CFX<sup>®</sup> – são: COMSOL<sup>®</sup>, OPENFOAM<sup>®</sup> e

FLUENT<sup>®</sup>. Neste trabalho o *software* utilizado foi o comercialmente conhecido como CFX<sup>®</sup> *release* 14.5, versão acadêmica, do fabricante ANSYS.

Trata-se de *software* robusto e amplamente utilizado para análises térmicas e de dinâmica de fluidos, cuja eficácia já está amplamente comprovada, desde que os modelos sejam validados previamente.

## 4.4. ETAPAS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Todas as simulações deste trabalho foram feitas em um computador equipado com processador Intel Cor i7 de 3,4GHz e com 16GB de memória RAM. O sistema operacional instalado é o Windows 10 (x64) e nesta máquina está instalado o software ANSYS Workbench CFX 14.5, versão acadêmica, que permitiu o processamento paralelo em 6 núcleos.

Inicialmente, com base na geometria do bloco de concreto utilizado como referência, é gerado um modelo tridimensional de modo a representar as características geométricas típicas do elemento construtivo, ou seja, a parede de blocos de concreto. Cabe observar que neste trabalho não são representadas as porosidades do material real e também não foram reproduzidas curvaturas nos vértices da cavidade do bloco, por entender que estes detalhes geométricos não interferem no fenômeno térmico em estudo, mas possibilitam com esta ação, uma redução no custo computacional, como já mencionado anteriormente.

Com a geometria definida é criada a malha em cada domínio – ou seja a discretização dos volumes nas regiões sólidas e fluidas – para que as equações de balanço de massa, balanço de energia e balanço de quantidade de movimento possam ser aplicadas. Entretanto, esta é uma das fases críticas da simulação uma vez que o tamanho dos volumes e portanto a quantidade de elementos que compõem a malha é fator importante para a qualidade do resultado mas também influi diretamente no custo computacional.

O passo posterior é o pré-processamento, etapa onde são atribuídas à cada região do modelo as suas propriedades, de modo que as características do material real sejam reproduzidas no modelo computacional. Além das propriedades dos domínios sólido e fluido, é nesta fase que são definidas as condições de contorno bem como as condições iniciais que serão implementadas no modelo computacional. Também é nesta etapa que são definidos quais modelos matemáticos de solução serão utilizados. Ao inserir as propriedades para o domínio sólido (concreto) foi atribuído massa específica de 2400 kg/m<sup>3</sup>, calor específico 0,835 kJ/(kg K), temperatura de referência 25°C, entalpia e entropia de referência 0 kJ/kg, condutividade térmica 1,75 W/(m K). Para o domínio fluido (ar) foram atribuídas as condições de ar real e com modelo de fluxo laminar, uma vez que nas faixas de temperatura em que o ar no interior da cavidade fica exposto os valores para o número de Rayleigh (Ra) são da ordem de 7x10<sup>5</sup>, indicando nível superior aos de condução pura (Ra < 10<sup>3</sup>) e inferiores aos níveis de regime turbulento (Ra > 10<sup>9</sup>).

Outra fase crítica da simulação é quando são estabelecidas as condições de contorno as quais irão definir quão próximo o modelo computacional estará da amostra real. Foram feitas então as seguintes considerações: atribuído às superfícies laterais, superiores e inferiores do bloco condição adiabática para todas, enquanto que para as superfícies verticais externas foram atribuídas temperatura externa e coeficiente convectivo. Além disso, foi considerado o modelo radiativo de Monte Carlo no domínio fluido, e meio não participante, mas com troca de calor radiativo entre superfícies.

Uma vez concluída a preparação do modelo numérico computacional chega-se ao início do processamento iterativo, momento em que se aguarda até o critério de convergência ser atingido, neste caso definido como sendo o erro máximo total inferior a 10<sup>-3</sup>.

Finalizada a simulação computacional, passa-se à etapa de pós-processamento quando são feitas as análises dos resultados da simulação. Para essa etapa algumas expressões foram definidas de modo a facilitar a extração dos resultados da simulação, tais como: temperatura média da superfície externa quente ( $T_H$ ), temperatura média da superfície interna quente ( $T_h$ ), temperatura média da superfície externa fria ( $T_C$ ), temperatura média da superfície interna fria ( $T_c$ ) e taxa de calor que atravessa a amostra ( $Q_{am}$ ).

As primeiras simulações visaram reproduzir a mesma situação experimental de tal sorte que se pudesse utilizar os dados extraídos do teste prático como subsídios para a análise da qualidade de malha e validação da modelagem computacional.

#### 4.4.1. Análise de Malha

O modelo computacional foi preparado tendo como referência a condição crítica do teste prático, cujas temperaturas externas das câmaras quente e fria eram 46,3°C e 14,7°C

respectivamente. Também extraído dos resultados práticos, os coeficientes convectivos nas superfícies externas do bloco foram mantidos, sendo para o lado da câmara quente 12,77 W/m<sup>2</sup>K e para o lado da câmara fria 19,94 W/m<sup>2</sup>K.

Nestas condições descritas e com as características dos domínios sólido e fluido definidas como as do concreto e do ar real, quatro malhas foram geradas, variando-se a quantidade de elementos, e para cada uma delas foram coletados os resultados do tempo de processamento e da taxa de calor que atravessa o bloco, comparando com o resultado prático de referência que é 70,5 W. Comparando-se os resultados obtidos e o custo computacional envolvido, optou-se pela configuração de malha #2. Todos resultados são apresentados na Tabela 7.

	Malha #1	Malha #2	Malha #3	Malha #4
$\Delta T_{amostra}$	31,6 K	31,6 K	31,6 K	31,6
n° nós	137.268	167.740	309.853	507.215
n° elementos	119.200	629.888	1.591.965	2.638.058
Tempo simulação	18min 39s	31min 45s	56min 36s	1h 30min 41s
Q' <sub>amostra</sub>	72,19 W	71,53 W	71,53 W	71,21 W
Q'referência		70,	5W	
Erro	2,4%	1,5%	1,5%	1,0%

Tabela 7: Comparativo dos resultados da simulação computacional variando qualidade de malha.

Fonte: O Autor, 2019.

Foram então reproduzidas as três condições de teste práticos anteriormente executados por TURCO em 2011, e o comparativo dos resultados é expresso na Tabela 8, onde é possível observar o desvio entre valores experimentais e os simulados numericamente, bem como extrair novos dados, fundamentais para continuidade do trabalho, como é o caso da diferença de temperatura no interior da cavidade  $\Delta T_{cav}$  e as temperaturas nas paredes da cavidade  $T_h$  e  $T_c$ , lado quente e lado frio, respectivamente.

Posteriormente uma nova amostra foi elaborada, isolando a cavidade como objeto de estudo na simulação numérica. Nesta condição foram então simuladas 10 condições de altura da cavidade  $H_{cav}$  de 0,3 m a 3,0 m, 4 condições de diferença de temperatura na cavidade  $\Delta T_{cav}$  de 10°C a 25°C em 3 diferentes faixas de temperatura absoluta e 8 condições de emissividade nas paredes internas da cavidade  $\varepsilon$  de 1,0 a 0,3. Ao todo foram feitas 960

simulações, gerando um conjunto de dados bastante representativos para a determinação da nova correlação de Nusselt modificada, objeto principal deste trabalho.

$\Delta T_{amostra}$	31,6 K				26,4 K				21,3 K			
Valor	Q' <sub>amostra</sub>	T <sub>h</sub>	T <sub>c</sub>	$\Delta {\rm T}_{\rm cav}$	Q' <sub>amostra</sub>	T <sub>h</sub>	T <sub>c</sub>	$\Delta {\rm T}_{\rm cav}$	Q' <sub>amostra</sub>	T <sub>h</sub>	T <sub>c</sub>	$\Delta T_{\text{cav}}$
Medido	70,5 W	-	-	-	55,2 W	-	-	-	43,9 W	-	-	-
Simulado	71,5 W	35,6°C	22,4°C	13,2 K	58,2 W	34,6°C	23,6°C	11,0 K	46,0 W	31,6°C	22,4°C	9,2 K
Diferença	1,5%	-	-	-	5,4%	-	-	-	4,8%	-	-	-

Tabela 8: Comparativo dos valores obtidos através de ensaios experimentais e resultados da simulação computacional.

Fonte: O Autor, 2019.

## 5. ANÁLISE DO FENÔMENO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA CAVIDADE

A transferência de calor em uma parede real ocorre nas três dimensões, e as propriedades dos materiais que compõe esta parede não se mantém constantes ao longo de toda área, uma vez que existem poros preenchidos por ar no interior dos blocos. Entretanto, é bastante razoável tratar esse fenômeno físico da transferência de calor com algumas hipóteses simplificadoras, como: propriedades homogêneas das regiões sólidas – negligenciando aspectos como porosidade, pequenas diferenças geométricas, eventuais diferenças de compactação. Em função da grande diferença de áreas transversais ao fluxo somadas à diferença de potencial térmico que ocorre entre os lados externo e interno da parede da edificação, quando comparados ao que ocorre no interior da cavidade, tanto vertical quanto horizontalmente, em uma representação simplificada de resistências térmicas pode-se admitir um fluxo de calor unidimensional.

Na literatura, principalmente quando a abordagem trata de fluxo de calor unidimensional, utiliza-se amplamente a analogia com circuitos elétricos onde uma resistência equivalente pode ser obtida por meio de arranjo de resistências. Ao se observar o tipo de arranjo de resistências, para a aplicação de parede composta por blocos de concreto, existem mais de uma configuração possível e esse fato precisa ser verificado para se definir qual dos arranjos melhor representa a condição real. Para tanto, diferentes arranjos foram analisados como pode ser melhor observado no Apêndice 1. Utilizando o arranjo de resistências como na Figura 7, onde por hipótese assume-se oito tipos de resistências térmicas, os tipos 01 e 02 (R1 e R2) em contato com a região de temperatura elevada; os tipos 03 e 04 (R3 e R4) que são as paredes sólidas externas ou internas do bloco em contato com a ponte térmica ou com a cavidade respectivamente; os tipos 05 e 06 (R5 e R6) em contato com a região de temperatura baixa; o tipo 07 (R<sub>cond</sub>) das pontes térmicas do bloco – ou paredes sólidas no sentido do fluxo de calor; e por fim o tipo 08 (R<sub>cav</sub>) das cavidades – foco principal deste trabalho. Como se trata de fluxo de calor unidimensional, a região enclausurada dependente apenas das temperaturas nas superfícies perpendiculares ao fluxo de calor, do fluido em seu interior e das propriedades de troca no interior da cavidade.

A Figura 8 mostra a distribuição de temperaturas na região sólida do bloco com condição de fluxo de calor distinto nas regiões onde existe a cavidade e, portanto, evidenciando que as temperaturas das superfícies que fazem fronteira com os ambientes de temperatura mais

alta e mais baixa não permaneçam homogêneas, reforçando que o arranjo de resistências utilizado na Figura 7 é o mais adequado para reproduzir o fenômeno real, por permitir temperaturas distintas nas superfícies.





Fonte: O Autor, 2019.



Figura 8: Distribuição de temperaturas em um bloco de concreto simulado.

Fonte: O Autor, 2019.

Para que a resistência térmica na região da cavidade enclausurada seja isolada, utiliza-se como referência os valores dos ensaios experimentais de TURCO (2011), valores determinados da taxa de transferência de calor e coeficientes convectivos, os ambientes de temperatura elevada e os de temperatura baixa para as mesmas condições ensaiadas. As dimensões e propriedades do bloco de concreto – como mencionados anteriormente – são consideradas homogêneas e constantes. Do valor total da taxa de transferência de calor é subtraída as quantidades que fluem pelas regiões sólidas do bloco, restando a diferença de temperatura entre superfícies da cavidade e a parte do calor transferido pela região enclausurada.

Como existem dois grupos de resistências, a série de resistências da região sólida do bloco – a qual é denominada grupo de ponte térmica – e a série de resistências onde existe a cavidade – que é denominada grupo de cavidade. Estes grupos formam arranjo em paralelo entre si, sendo necessário levar em consideração a proporção de área que cada um assume, sendo área, e desse modo determinar a resistência equivalente.

As resistências térmicas R1 e R5 são definidas pelo inverso dos coeficientes convectivos dos respectivos ambientes, considerando a área de ponte térmica, enquanto R2 e R6 são definidas pelo inverso dos coeficientes convectivos dos respectivos ambientes, considerando a área de cavidade. Já as resistências térmicas das regiões sólidas dependem da condutividade térmica do concreto e da espessura de parede, que no caso  $R_{cond}$  trata-se do comprimento da cavidade  $L_{cav}$ , e considerando área de ponte térmica, enquanto que para de R3 e R4 trata-se da espessura do bloco, considerando área de ponte térmica e área da cavidade respectivamente. Com estas informações é possível calcular as temperaturas nas paredes internas da cavidade, tanto na região quente T<sub>h</sub> quanto na fria T<sub>c</sub>, necessárias para a continuidade dos cálculos.

Tendo como referência as dimensões nominais do bloco de concreto, como apresentado no capítulo 5.1, a área total da amostra do teste prático  $A_{tot} = 0,64 \text{ m}^2$ , considerando para as propriedades do concreto os valores da norma NBR 15220, uma massa específica do bloco de 2400 kg/m<sup>3</sup>, (k<sub>concreto</sub> = 1,75 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup> e  $\varepsilon$  = 0,85), as condições definidas pelo experimento prático e complementadas pelo modelo numérico para os coeficientes convectivos para o grupo de ponte térmica (h<sub>ext\_b</sub> = 15,4 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> e h<sub>int\_b</sub> = 26,4 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) e convectivos para o grupo da cavidade (h<sub>ext\_cav</sub> = 10,7 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup> e h<sub>int\_cav</sub> = 19,3 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>) é então possível isolar o valor da resistência térmica da cavidade, e utilizando a expressão para transferência de calor por radiação separar os modos de transferência de calor, como apresentado na Tabela 9. Assim, é possível observar que os três modos de transferência de calor estão presentes no fenômeno de transferência de calor em envoltórias e possuem influência significativa. Na busca pelas ineficiências do bloco de concreto observa-se que além das variáveis relativas à propriedade do concreto (composição, massa específica, porosidade, etc) a região da cavidade passa a ter maior influência, visto que é nela que ocorrem os fenômenos convectivo e radiativo.

Modo de Transferência	∆T entre	ambientes	Percentual médio de calor	
de Calor	31,6 K	26,4 K	21,3 K	transferido
Condução	24,0 W	19,4 W	15,6 W	35%
Radiação	21,7 W	18,7 W	15,0 W	33%
Convecção	24,8 W	17,1 W	13,3 W	32%
TOTAL	70,5 W	55,2 W	43,9 W	100%

Tabela 9: Quantidade de calor transferida pelo bloco de concreto em cada modo em um plano médio.

Fonte: O Autor, 2019.

Quando se procura predizer o comportamento térmico de uma envoltória, como é o caso das paredes compostas por blocos de concreto, faz-se uso de correlações matemáticas para cavidades enclausuradas com o objetivo de encontrar o número adimensional de Nusselt (Nu) e a partir dele determinar o coeficiente convectivo médio da região enclausurada, por meio da Equação 12 apresentada neste trabalho. Como já apresentado no Capítulo 2, existem várias correlações na literatura para cavidades enclausuradas, e cada uma delas é apresentada com as restrições geométricas e de propriedades sob as quais se pode aplicá-las. Porém, o questionamento é se as condições que ocorrem nas colunas de ar enclausurado no interior de envoltórias compostas por bloco de concreto estão contempladas por alguma das correlações existentes.

Buscou-se então, verificar a os desvios destas correlações de Nusselt ao longo de suas faixas de utilização quando aplicadas ao caso específico da cavidade no bloco de concreto. Assim, um comparativo desta verificação é apresentado na Tabela 10, destacando-se em negrito os critérios que não foram atendidos. Também na Tabela 10, percebe-se que, analisando o caso particular de cavidades em envoltórias de edificações construídas com blocos de concreto, das nove correlações apresentadas, apenas três delas têm as restrições de aplicação atendidas, Equações 14, 18 e 20, sendo que a Equação 18 apenas atende de maneira parcial – para razões de forma não superiores a 10.

Autor (Equação)	Critério para aplicação	H <sub>cav</sub>	W <sub>cav</sub>	L <sub>cav</sub>	$\frac{L_{cav}}{W_{cab}}$	$\frac{H_{cav}}{L_{cab}}$	$\Delta T_{cav}$	Pr	Gr	Ra	Aplicação
							17,30	0,706	8E+05	6E+05	Não
JACOB Eq. 13)	2x10 <sup>3</sup> < Gr < 2x10 <sup>4</sup>	De 0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	Não
		a sm					11,70	0,707	6E+05	4E+05	Não
							17,30	0,706	8,0E+05	5,7E+05	ОК
JACOB Eq. 14	$2x10^4 < Gr < 11x10^6$	0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	6,9E+05	4,9E+05	ОК
		a Sili					11,70	0,707	5,6E+05	4,0E+05	ОК
e TZ	H = 10	Da					17,30	0,706	8E+05	6E+05	Não
ANDIS NOWI Eq. 15	L<2	0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	ОК
Υ Γ (	2x10 <sup>3</sup> < Gr Pr (L/W) <sup>3</sup> < 10 <sup>7</sup>	a Sili	m		11,70	0,707	6E+05	4E+05	ОК		
OR e	10 < (H/L) < 40	2					17,30	0,706	8E+05	6E+05	Parcial
MACGREGC EMERY (Eq. 16)	1 < Pr < 2 x 10 <sup>4</sup>	De 0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	Não
	$10^4 < \text{Ra} < 10^7$	a 3m					11,70	0,707	6E+05	4E+05	ОК
OR e	10 < (H/L) < 40	2					17,30	0,706	8E+05	6E+05	Parcial
GREGOF IMERY Eq. 17)	1 < Pr < 20	0,8m a 3m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	Não
MAC I	10 <sup>6</sup> < Ra < 10 <sup>9</sup>	a sm					11,70	0,707	6E+05	4E+05	Não
۸ (	2 < (H/L) < 10	Da					17,30	0,706	8E+05	6E+05	Parcial
ATTON Eq. 18	Pr < 10 <sup>5</sup>	0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	ОК
00	$10^3 < \text{Ra} < 10^{10}$	a Sili					11,70	0,707	6E+05	4E+05	ОК
7 0	1 < (H/L) < 2						17,30	0,706	8E+05	6E+05	Não
Eq. 19	$10^{-3} < Pr < 2 \times 10^{5}$	0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	ОК
0 0	10 <sup>3</sup> < [(Ra Pr)/(0,2 + Pr)]	a sm					11,70	0,707	6E+05	4E+05	ОК
TIDIS )		Da					17,30	0,706	8E+05	6E+05	ОК
ROMA Eq. 20)	Laminar	0,8m	0,16	0,09	0,57	De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	ОК
MAV )		a sm					11,70	0,707	6E+05	4E+05	ОК
TIDIS )							17,30	0,706	8E+05	6E+05	Não
ROMA <sup>-</sup> Eq. 21)	Turbulento (Ra > 10 <sup>9</sup> )	De 0,8m	0,16	0,09	0,57	, De 8,89 a 33,3	14,40	0,707	7E+05	5E+05	Não
)		a 3m					11,70	0,707	6E+05	4E+05	Não

Tabela 10: Comparativo entre correlações de Nusselt para cavidades enclausuradas

Fonte: O Autor, 2019.

Uma vez encontradas as correlações que podem ser utilizadas, a questão é se estas correlações efetivamente possuem capacidade de predizer o comportamento de transferência de calor nas condições típicas de edificações, construídas com blocos de concreto. Para essa verificação, as três correlações que atendem aos seus critérios de utilização são aplicadas ao caso específico da amostra testada e são comparados os resultados calculados com os obtidos experimentalmente, para as três condições de temperatura que a amostra foi submetida. Os resultados são apresentados na Tabela 11.

Autor	Critério para	H <sub>cav</sub>	W <sub>cav</sub>	L <sub>cav</sub>	$\frac{H_{cav}}{L_{cab}}$	∆T <sub>cav</sub>	3	Aplicação	Q <sub>wall</sub> Calc.	Q <sub>wall</sub> Med.	Diferença
(Lquuçuo)	apricação	[m]	[m]	[m]	[-]	[K]	[-]	[-]	[W]	[W]	[%]
JACOB (Eq. 14)					8,89	17,30	0,9	ОК	91,9	70,5	30,2%
	$2x10^4 < Gr < 11x10^6$	0,80	0,80	0,09		14,40	0,9	ОК	75,3	55,2	36,4%
						11,70	0,9	ОК	59,6	43,9	35,7%
7 0	2 < (H/L) < 10					17,30	0,9	ОК	92,2	70,5	30,7%
CATTON (Eq. 18	Pr < 10 <sup>5</sup>	0,80	0,80	0,09	8,89	14,40	0,9	ОК	75,7	55,2	37,1%
	$10^3 < \text{Ra} < 10^{10}$					11,70	0,9	ОК	60,0	43,9	36,6%
TIDIS )						17,30	0,9	ОК	75,1	70,5	6,5%
ROMAT (Eq. 20)	Laminar	0,80	0,80	0,09	8,89	14,40	0,9	ОК	60,6	55,2	9,7%
MAV						11,70	0,9	ОК	47,9	43,9	9,1%

Tabela 11: Comparativo de erro entre correlações de Nusselt e dados experimentais

Fonte: O Autor, 2019.

Como mencionado anteriormente, MAVROMATIDIS (2016) ao propor suas correlações apresenta uma condição onde são acoplados os fenômenos convectivos e radiativos de transferência de calor no interior da cavidade. No comparativo da Tabela 11 fica evidente a melhor aproximação dos resultados quando comparados às outras duas correlações que consideram fenômenos isolados. Entretanto, em nenhuma das correlações propostas por Mavromatidis a emissividade da parede está sendo explicitamente considerada como variável. Assim, utilizando como referência valores simulados com o modelo computacional desenvolvido e validado neste trabalho buscou-se analisar a capacidade desta correlação em reproduzir o fenômeno de transferência de calor quando é variada a emissividade da superfície

da cavidade, e constatou-se que os níveis de incerteza não são mantidos. Na Figura 9 é possível observar o comportamento dos desvios na correlação de Nusselt proposta por Mavromatidis quando ocorre variação da emissividade na superfície da cavidade, em quatro condições de diferenças de temperatura entre suas superfícies verticais opostas. Observa-se nível mínimo de desvio para valores de emissividade próximos a 0,9 mas este nível aumenta significativamente com a redução da emissividade, apresentando desvios superiores a 150%.

Figura 9: Erro percentual utilizando correlação de Nusselt, por Mavromatidis, nas condições de parede de edificação variando a emissividade da parede interna da cavidade.



Fonte: O Autor, 2019.

# 6. DETERMINAÇÃO DE NÚMERO ADIMENSIONAL PARA CAVIDADES ENCLAUSURADAS

Analisados os comparativos das correlações da literatura, observa-se que nenhuma das correlações apresentadas se mostrou eficaz para reproduzir o fenômeno de transferência de calor nas cavidades de uma parede de blocos de concreto quando variada a emissividade da parede da cavidade. Surge então a necessidade de se propor uma nova correlação que supra essa demanda, em especial à aplicação em cavidades enclausuradas como as que ocorrem em paredes de edificações.

Neste sentido, foram estabelecidas as restrições sob as quais a nova correlação será aplicável, a saber: o fluido no interior da cavidade será o ar real, uma vez que outros fluidos não são comuns em edificações; a altura da cavidade H varia de 0,3 até 3m para que se possam gerar alturas representativas, sem que elementos construtivos interrompam a cavidade, como por exemplo vigas e suportes para janelas ou ainda a parte superior de portas; e emissividade de parede interna à cavidade varia entre 1 e 0,3, possibilitando uma ampla faixa de aplicação. A diferença de temperatura sob a qual a cavidade é exposta ficará entre 10K e 25K, visando cobrir a faixa de exposição de um ambiente climatizado e o ambiente externo. Sabe-se que para a determinação da transferência de calor radiativa são necessários os valores absolutos de temperatura e que uma mesma diferença de temperatura pode ser obtida por temperaturas absolutas distintas e para mapear essa influência, foram então utilizadas três condições de temperatura para cada diferença de temperatura desejada, conforme Tabela 12.

Th	Тс	Tm	Th	Тс	Tm	Th	Тс	Tm	Th	Тс	Tm	
	∆T = 25K		ΔT = 20K			<b>ΔT = 15K</b>			ΔТ = 10К			
40,0°C	15,0°C	27,5°C	40,0°C	20,0°C	30,0°C	35 <i>,</i> 0°C	20,0°C	27,5°C	30,0°C	20,0°C	25,0°C	
32,5°C	7,5°C	20,0°C	30,0°C	10,0°C	20,0°C	27,5°C	12,5°C	20,0°C	25,0°C	15,0°C	20,0°C	
20,0°C	-5 <i>,</i> 0°C	7,5°C	20,0°C	0,0°C	10,0°C	20,0°C	5,0°C	12,5°C	20,0°C	10,0°C	15,0°C	

Tabela 12: Condições e diferenças de temperatura na cavidade

Fonte: O Autor, 2019.

A proposta é apresentar uma nova correlação de Nusselt modificado que inclua a emissividade da parede da cavidade juntamente com o fenômeno convectivo na correlação e por essa razão adiciona-se o termo "modificado", para que assim se possa definir não mais o coeficiente convectivo, mas sim a transmitância térmica da cavidade – uma vez que estarão

acoplados os fenômenos convectivos e radiativos – tornando mais fácil o cálculo da taxa de transferência de calor. Uma representação do elemento construtivo e suas variáveis é apresentada na Figura 10.



Figura 10: Esquemático da cavidade enclausurada.

Fonte: O Autor, 2019.

Como o resultado apresentado pela correlação levará à transmitância térmica no interior da cavidade e não ao coeficiente convectivo, e como a radiação não tem relação direta com transferência de massa, entende-se que a relação entre o número de Nusselt modificado e o número de Sherwood (Sh) não deva ser empregada.

Para a determinação da nova correlação são considerados ao todo 10 diferentes razões de forma, 8 diferentes valores de emissividades de parede e 4 diferenças de temperaturas na cavidade em 3 condições, resultando em 960 condições a serem verificadas.

Esse número elevado de condições reforça a importância de uma abordagem computacional em contraposição a uma pesquisa puramente experimental, que levaria um tempo muito maior e seria também muito mais oneroso.

## 6.1. ANÁLISE DA CAVIDADE

Buscando isolar os fenômenos condutivo das paredes do bloco e os que ocorrem nas paredes externas no bloco dos fenômenos que ocorrem no interior da cavidade, um novo modelo computacional é então proposto, ou seja apenas a cavidade é analisada, permitindo desta forma alterar todas as variáveis e posteriormente gerar amostra real que possa validar os dados computacionais por meio de testes práticos.

Para tanto, utilizou-se distância fixa entre as paredes verticais L no valor de 0,09m e lateralmente W no valor de 0,8m, variando-se a altura H como mencionado anteriormente para obter as dez razões de aspecto distintas. Uma superfície sólida de alta condutividade 51(Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>) com espessura de 0,003m foi posicionada nas duas superfícies verticais, lado quente e lado frio da cavidade, com dois objetivos principais: o de garantir homogeneidade de temperaturas nas superfícies e assim reduzindo muito a influência da condução como modo de transferência de calor; e possibilitar alteração dos valores de emissividade superficiais, objeto fundamental do desenvolvimento de nova correlação.

Observando as condições de temperatura no interior da cavidade da totalidade dos casos a serem simulados verificou-se que o número de Rayleigh se manteve maior que 10<sup>3</sup> representando que a transferência de calor na cavidade não ocorre apenas por condução, ou seja, ocorre movimento macroscópico do ar – convecção. Os valores de Rayleigh, para todos os casos analisados, também não superam 10<sup>9</sup> significando que dentro da cavidade o fluxo de ar é laminar. Com estes resultados, as variáveis do fenômeno de troca de calor no interior da cavidade podem ser reduzidas aos aspectos geométricos, expressos pela razão de forma, às condições de temperatura das superfícies internas da cavidade, representados pela diferença de temperatura e pela temperatura média das superfícies, e à propriedade radiativa das superfícies da cavidade, indicado pela emissividade das paredes.

Para cada uma das condições simuladas foi verificada a taxa de calor que atravessa a cavidade ( $Q_{cav}$ ) e, conhecendo a diferença de temperatura da cavidade ( $\Delta T_{cav}$ ), determina-se a resistência térmica da cavidade ( $R_{cav}$ ) por meio da Equação (27). Na sequência, determina-se o valor da transmitância térmica na região enclausurada ( $U_{cav}$ ), incluindo os modos convectivos e radiativos de transferência de calor, pela Equação (28). Utiliza-se então o conceito do número de Nusselt, e substituindo o coeficiente convectivo (h) pela transmitância térmica da cavidade ( $U_{cav}$ ), juntamente com o uso da espessura da cavidade ( $L_{cav}$ ) e da condutividade térmica do ar (k<sub>ar</sub>) na temperatura média das superfícies, obtém-se o número de Nusselt modificado (Nu<sub>md</sub>), por meio da Equação (29), para cada uma das 960 condições simuladas de cavidade retangular enclausurada.

$$R_{cav} = \frac{Q_{cav}}{A_{cav} \Delta T_{cav}} \tag{27}$$

$$U_{cav} = \frac{1}{R_{cav}} \tag{28}$$

$$Nu_{md} = \frac{U_{cav} \ L_{cav}}{k_{ar}} \tag{29}$$

Foram então obtidas curvas do número de Nusselt modificado em função das 3 variáveis principais de modo a serem verificadas as influências de cada uma delas, como apresentado na Figura 11, onde em (a) é mostrada a relação de Nusselt em função da variação da emissividade ( $\varepsilon$ ) da parede interna da cavidade mantendo constante a razão de forma em 42,9 e a diferença de temperatura em 25K, nas três condições de temperaturas; em (b) é apresentada a relação de Nusselt em função da razão de forma (H/L) mantendo constantes a diferença de temperatura em 25K e a emissividade da parede interna da cavidade igual a 1; e em (c) é mostrada a razão de Nusselt em função da diferença de temperatura ( $\Delta T_{cav}$ ) entre as paredes da cavidade mantendo-se constante a razão de forma em 42,9 e a emissividade da parede em 1.

Observa-se na Figura 11 que a variável de maior influência dentro desta abordagem é a emissividade das paredes internas da cavidade, enquanto que a variação da razão de forma ou da diferença de temperatura na cavidade pouco interferem no resultado de Nusselt modificado. Observa-se, ainda, que as temperaturas absolutas que definem uma mesma diferença têm influência no valor de Nusselt modificado, porém não mudam o comportamento das curvas, não alterando a análise da variável de maior influência. Sendo assim, é então proposta uma função linear para relacionar o número de Nusselt modificado com a emissividade das paredes do interior da cavidade, do tipo  $y = \beta_1 x + \beta_2$ . No Apêndice 2 estão dispostos em forma de tabela todos os coeficientes da função linear de Nusselt Modificado.

Essa análise é feita para todas as condições de fator de forma e diferença de temperatura, nas três condições distintas de temperatura, totalizando 120 configurações e consequentemente 120 funções do tipo y = f(x) a serem novamente analisadas. Percebe-se,

porém, o mesmo comportamento de influência da emissividade e a pouca influência da diferença de temperatura e razão de forma, porém com coeficientes  $\beta_1$  e  $\beta_2$  distintos.



Figura 11: Influência das variáveis emissividade (a), razão de forma (b) e diferença de temperatura (c) no número de Nusselt modificado.



Agrupando-se os valores obtidos para o parâmetro  $\beta_1$  em relação à temperatura média entre as paredes da cavidade, encontra-se uma nova curva do tipo y =  $\gamma_1 x + \gamma_2$ , como mostrado na Figura 12, onde os valores encontrados para  $\gamma_1 \notin 0,1294$  e para  $\gamma_2 \notin 15,366$ , de tal forma que o parâmetro  $\beta_1 \notin$  definido como uma função da temperatura média, como apresentado na Equação 30. No Apêndice 3 estão dispostos em forma de tabela os coeficientes da função linear de  $\beta_1$  em função da temperatura média na cavidade.

$$\beta_1 = 0,1294 \, T_m + 15,366 \tag{30}$$

Figura 12: Influência da temperatura média das paredes da cavidade no parâmetro  $\beta_1$ .



Fonte: O Autor, 2019.

Figura 13: Influência da razão de forma da cavidade no parâmetro  $\beta_2$ .



Fonte: O Autor, 2019.

De modo similar ao que foi feito anteriormente com  $\beta_1$ , os valores do parâmetro  $\beta_2$ foram agrupados em relação a razão de forma, e uma curva do tipo  $y = \lambda_1 x^2 + \lambda_2 x + \lambda_3$  foi encontrada, porém constatou-se que a diferença de temperatura das paredes da cavidade exerce influência significativa, como pode ser observado na Figura 13. No Apêndice 4 estão dispostos em forma de tabela os coeficientes da função polinomial de segunda ordem de  $\beta_2$  em função da razão de aspecto e da diferença de temperatura da cavidade.

Faz-se necessário então a determinação dos parâmetros " $\lambda$ " em função da diferença de temperatura, de onde são determinados três polinômios de primeira ordem cujos valores são:  $\lambda_1 = 0,00009 \Delta T + 0,0003, \lambda_2 = -0,006 \Delta T + 0,0104$  e  $\lambda_3 = 0,1049 \Delta T - 1,4845$ .

Assim, o parâmetro  $\beta_2$  é definido como sendo função da razão de forma e da diferença de temperatura entre as paredes da cavidade, como expresso pela Equação 31.

$$\beta_2 = \lambda_1 \left(\frac{H_{cav}}{L_{cav}}\right)^2 + \lambda_2 \left(\frac{H_{cav}}{L_{cav}}\right) + \lambda_3 \tag{31}$$

onde:

 $\lambda_1$ : é dado pela Equação 32;

 $\lambda_2$ : é dado pela Equação 33;

 $\lambda_3$ : é dado pela Equação 34;

$$\lambda_2 = (0,00009 \,\Delta T_{cav} + 0,0003) \tag{32}$$

$$\lambda_2 = (-0,006 \,\Delta T_{cav} + 0,0104) \tag{33}$$

$$\lambda_3 = (0,1049 \,\Delta T_{cav} - 1,4845) \tag{34}$$

Ao final, é então possível definir uma nova correlação matemática para obter o número adimensional de Nusselt modificado levando-se em consideração a emissividade da superfície interna da cavidade, como mostrado pela Equação 35.

$$Nu_{md} = \beta_1 \varepsilon + \beta_2 \tag{35}$$

onde:

 $Nu_{md}$ : é o número de Nusselt modificado;

 $\beta_1$ : é dado pela Equação 30;

 $\varepsilon$ : é a emissividade das superfícies paralelas;

 $\beta_2$ : é dado pela Equação 31;

Pode-se expressar a nova correlação de maneira completa, ou detalhada, como mostrado na Equação 36.

$$Nu_{md} = (0,1294 T_m + 15,366) \varepsilon + (0,00009 \Delta T_{cav} + 0,0003) \left(\frac{H_{cav}}{L_{cav}}\right)^2 + (-0,006 \Delta T_{cav} + 0,0104) \left(\frac{H_{cav}}{L_{cav}}\right) + (0,1049 \Delta T_{cav} - 1,4845)$$
(36)

para:

$$\begin{bmatrix} 0,3 \ m < H < 3 \ m \\ 10 \ K < \Delta T_{cav} < 25 \ K \\ 208 \ K < T_m < 305 \ K \\ 10^5 < Ra < 5x10^5 \\ Fluido \ Ar \\ Fluxo \ Lamiar \end{bmatrix}$$

Determinada a correlação para o número de Nusselt modificado no interior da cavidade vertical, é então possível encontrar a transmitância térmica desta cavidade, de modo similar à determinação do coeficiente convectivo, como mostra a Equação 37.

$$U_{cav} = \frac{(Nu_{md} k_{ar})}{L_{cav}}$$
(37)

onde:

- U<sub>cav</sub>: é a transmitância térmica no interior da cavidade, acoplando os fenômenos de transferência convectiva e radiativa;
- k<sub>ar</sub>: é a condutividade térmica da ar no interior da cavidade, determinada na condição de temperatura média da cavidade:  $\frac{(T_h+T_c)}{2}$
- L<sub>cav</sub>: é a distância entre as paredes da cavidade

# 6.2. VALIDAÇÃO DO NÚMERO DE NÚSSET MODIFICADO

Obtida a nova correlação de Nusselt modificado, foram primeiramente calculadas as taxas de calor para as mesmas condições da amostra ensaiada experimentalmente em blocos de concreto e os erros provocados pela nova correlação foram comparados com as três outras correlações que tiveram seus critérios de utilização atendidos, como mostrado na Tabela 13, de modo a verificar se a nova correlação tem capacidade de representar adequadamente os efeitos da cavidade, tendo como referência os dados extraídos das simulações numéricas na segunda amostra.

Uma das vantagens apresentadas por essa nova proposta quando comparada às correlações anteriores é que – assim como as de Mavromatidis – já leva em consideração os fenômenos de transferência de calor convectivo e radiativo, impedindo que o fenômeno de transferência de calor por radiação seja erroneamente negligenciado. Percebe-se também que nas condições padrão de emissividade do bloco de concreto,  $\varepsilon = 0,85$ , os erros encontrados utilizando-se a nova correlação são similares aos apresentados pela proposta de Mavromatidis, indicando, porém, um erro menor.

Autor	Critério para	$\frac{H_{cav}}{L_{cab}}$	Text	Tint	Tm <sub>cav</sub>	∆T <sub>cav</sub>	3	Q <sub>wall</sub> Calc.	Q <sub>wall</sub> Med.	Diferença (Abs)
(Equação)	apiicação	[-]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[-]	[W]	[W]	[%]
<b>x</b> (†			46,30	14,70	28,95	17,30	0 <i>,</i> 85	91,9	70,5	30,2%
JACOB Eq. 14	$2x10^4 < Gr < 11x10^6$	8,89	44,10	17,70	29,20	14,40	0,85	75,3	55,2	36,4%
_			39,10	17,80	27,05	11,70	0,85	59,6	43,9	35,7%
7 (	2 < (H/L) < 10		46,30	14,70	28,95	17,30	0 <i>,</i> 85	92,2	70,5	30,7%
CATTON (Eq. 18	Pr < 10 <sup>5</sup>	8,89	44,10	17,70	29,20	14,40	0 <i>,</i> 85	75,7	55,2	37,1%
0 0	$10^3 < \text{Ra} < 10^{10}$		39,10	17,80	27,05	11,70	0 <i>,</i> 85	60,0	43,9	36,6%
TIDIS )			46,30	14,70	28,95	17,30	0 <i>,</i> 85	75,1	70,5	6,5%
ROMA (Eq. 20	Laminar	8,89	44,10	17,70	29,20	14,40	0,85	60,6	55,2	9,7%
MAV			39,10	17,80	27,05	11,70	0,85	47,9	43,9	9,1%
_	0,3 < H < 3		46,30	14,70	28,95	17,30	0 <i>,</i> 85	73,1	70,5	3,7%
AUTOR Eq. 36)	$7,5^{\circ}C < Tm < 32,5^{\circ}C$	8,89	44,10	17,70	29,20	14,40	0 <i>,</i> 85	59,5	55,2	7,7%
	10 <sup>5</sup> < Ra < 5x10 <sup>5</sup> Lamiar		39,10	17,80	27,05	11,70	0,85	47,3	43,9	7,8%

Tabela 13: Comparativo de erro entre as correlações de Nusselt por outros autores e Nusselt modificado contra dados experimentais em blocos de concreto.

Fonte: O Autor, 2019.

Cabe destacar, que na correlação apresentada por Mavromatidis a emissividade das superfícies está implícita na equação enquanto que na proposta deste trabalho ela é deixada

explicita. Sendo assim, o comportamento destas duas correlações é então comparado, quando são variados os valores de emissividade.

Na Figura 14 são apresentados os erros provocados pela correlação proposta pelo autor em contraposição aos provocados pela correlação de Mavromatidis, quando as emissividades das superfícies da cavidade são modificadas. Utiliza-se para essa comparação de erros os resultados obtidos por meio da simulação numérica na segunda amostra, ou seja, apenas na cavidade. Também ressalta-se que as demais correlações não foram trazidas a esta comparação por apresentarem elevado erro para emissividades abaixo de 0,8 com valores superiores 100%.



Figura 14: Comparativo de erro entre a correlação de Nusselt, por Mavromatidis, e a correlação de Nusselt modificado proposto pelo Autor, variando a emissividade da parede interna da cavidade.

Observa-se, na Figura 14, que para emissividades das superfícies no interior da cavidade entre 0,95 e 0,75 a correlação proposta por Mavromatidis apresenta desvios de até

Fonte: O Autor, 2019.

30%, enquanto que os desvios provocados pela correlação proposta do autor são inferiores a 9%. Verifica-se também que para emissividades inferiores a 0,75 os erros provocados pela correlação proposta por Mavromatidis apresentam um aumento significativo à media em que a emissividade é reduzida, ultrapassando 100% de erro para emissividades inferiores a 0,4. Por outro lado, percebe-se que os erros provocados pela correlação apresentada pelo autor se mantém estável e com valores absolutos inferiores a 15% em toda a faixa de emissividade.

Uma outra abordagem de verificação da eficácia da nova correlação diz respeito a validação dessas simulações computacionais, feitas no modelo que aborda isoladamente a cavidade, por meio de resultados experimentais. Com esse intuito foram montadas três amostras de cavidades, com as mesmas características dos modelos computacionais, ou seja, tendo as mesmas dimensões, propriedades e condições de contorno. Foram então realizados ensaios práticos no Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR, no mesmo dispositivo experimental onde já haviam sido medidas as amostras de bloco de concreto, utilizando também o método da Caixa Quente Protegida.

Como o intuito de garantir um maior controle das variáveis envolvidas, uma cavidade única foi construída com dimensões de 0,8 m de largura, 0,8 m de altura e 0,09 m entre as paredes verticais. Para as paredes foram utilizadas chapas de aço com 3 mm de espessura, enquanto que nas laterais da cavidade uma máscara de fechamento em poliestireno expandido (EPS) promoveu a condição adiabática. As três configurações testadas, variando-se a emissividade da superfície interna da cavidade, podem ser observadas na Figura 15.

Figura 15: Cavidade de teste em suas três configurações de parede, (a) emissividade 0,95, (b) emissividade 0,68 e (c) emissividade 0,45.



Fonte: O Autor, 2019.

60

A diferença entre as três amostras testadas está no material que faz a cobertura das superfícies internas da cavidade, onde foram utilizadas diferentes emissividades. Na primeira amostra experimental foi aplicada uma pintura em preto fosco da região metálica utilizada como superfície da cavidade; a segunda amostra experimental utiliza uma aplicação de papel longa vida, composta por seis camadas sendo duas de polietileno, uma camada de alumínio, uma nova camada de polietileno, uma camada de papel e por fim uma camada de polietileno; e a terceira amostra experimental é composta pela aplicação de folha de alumínio polido.

É possível observar na Figura 15, que a condição de emissividade nas duas superfícies que compõem a cavidade foi mantida constante, ou seja, a variável  $\varepsilon_h$  é igual a  $\varepsilon_c$ , conforme representação da Figura 10. Ainda analisando a Figura 15, verifica-se a existência de sensores de temperatura distribuídos na superfície da amostra, no interior da cavidade. Trata-se de termopares do tipo "T", os quais também foram posicionados sensores na superfície externa da cavidade, no interior da Caixa Quente e também nas Câmaras Fria e Quente, de modo a possibilitar a observação do comportamento das temperaturas em cada etapa do fenômeno de transferência de calor. O posicionamento dos sensores pode ser visto no Apêndice 5.

Para que fossem conhecidos os valores de emissividade, cada amostra experimental teve sua reflectividade medida em um espectômetro modelo PerkinElmer Frontier FT-IR, equipamento existente no Laboratório de Caracterização de Materiais da PUCPR. Fazendo a consideração de que todas as amostras se comportam como corpos cinzentos, suas emissividades são consideradas iguais às suas absortividades em uma mesma temperatura, e essas possuem valor complementar aos resultados medidos de reflectividade, uma vez que a energia total emitida pelo equipamento foi parcialmente refletida pela amostra e então coletada pelo sensor do aparelho (é o valor medido) enquanto que a parcela complementar foi absorvida pela amostra (absortividade). Considerando que a temperatura média da cavidade nas condições dos testes fica entre 10°C e 25°C, pode-se afirmar, considerando a Equação 38 (INCROPERA, 2008), que o comprimento de onda máximo será de 10,2 µm e 9,7 µm, respectivamente, o que leva a uma faixa de comprimento de onda entre 4,8 µm e 51 µm como região que compreende 95% da energia transferida. Os resultados obtidos nas leituras do espectômetro são apresentados na Tabela 14 e na Figura 16.

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8\,[\mu mK]}{T[K]} \tag{38}$$

Tabela 14: Reflectividade e emissividade das amostras para superfícies internas da cavidade.

Amostra	Refectividade	Absortividade	Emissividade
Pintura - preto fosco	0,05	0,95	0,95
Adesivo - papel longa vida	0,32	0,68	0,68
Adesivo - papel alumínio	0,55	0,45	0,45

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 16: Emissividade superficial.



Fonte: O Autor, 2019.

Cada amostra experimental foi submetida então a três condições de diferença de temperatura, sendo a temperatura nominal para a Câmara Fria ajustada para 18°C e a Caixa Quente variando em 43°C, 38°C e 33°C para se obter diferenças de 25K, 20K e 15K respectivamente, sempre tendo a Câmara Quente ajustada para a mesma temperatura da Caixa Quente a fim de proporcionar a guarda, ou a mínima troca de calor que não seja através da amostra. A velocidade do ar foi mantida próxima de 0,25 m/s em ambos os lados externos à cavidade, como recomendado pela norma ASTM C1363-05. Após atingida a condição de estabilização, foram então coletados os dados do teste por meio de software desenvolvido em LabView para esse fim, dados esses que são apresentados na Tabela 15.

Os resultados obtidos pelos experimentos práticos são então comparados com os valores calculados utilizando-se tanto a correlação de Mavromatidis como a correlação proposta pelo autor neste trabalho. Os erros percentuais encontrados nas três condições de teste podem

ser observados na Tabela 16 e reproduzem o mesmo comportamento demonstrado nas simulações computacionais e apresentados na Figura 14. São percebidos valores de erro inferiores a 20% e um comportamento mais linear na proposta apresentada pelo autor quando há variação da emissividade na superfície da cavidade, enquanto que para a correlação apresentada por Mavromatidis são percebidos erros mais elevados, ultrapassando os 40%, e um comportamento menos estável em função da variação da emissividade, como pode também ser observado na Figura 17.

Amostra	Pintura	a em Preto	o Fosco	Foll	na Longa \	/ida	Fo	lha Alumíi	nio	
Variável	Val	ores Medi	dos	Val	ores Medi	dos	Valores Medidos			
TCmQ [°C]	43,2	38,3	33,2	43,0	38,0	33,2	43,4	38,3	33,4	
TCxQ [°C]	42,9	38,0	33,0	42,9	38,0	33,0	42,9	38,0	33,0	
TCmF [°C]	17,3	17,5	17,2	17,6	17,1	17,6	17,0	17,0	17,1	
∆Tam [K]	25,6	20,4	15,8	25,3	20,9	15,4	25,9	20,9	16,0	
TH [°C]	39,6	35,1	30,8	39,5	35,3	31,0	39,6	35,3	31,2	
Th [°C]	35,0	31,1	28,5	37,7	34,0	30,3	37,4	33,6	30,0	
Tc [°C]	24,9	23,2	21,6	21,8	20,5	19,4	21,0	19,9	19,0	
TC [°C]	19,3	20,2	18,8	19,7	18,8	18,3	18,9	18,3	17,9	
H [m]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
W [m]	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	
L [m]	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	
A [m²]	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	
H/L [-]	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	8,9	
hext [W/(m²K)]	14,8	18,8	21,3	17,0	17,6	20,3	12,6	15,3	16,2	
hint [W/(m²K)]	25,3	20,2	28,0	27,8	28,3	53,3	22,7	31,5	36,6	
$\Delta$ Tcav [K]	10,1	7,9	6,9	15,9	13,5	11,0	16,4	13,7	10,9	
Qam [W]	57,3	34,3	29,9	36,9	30,9	25,5	26,7	26,0	19,7	

Tabela 15: Resultados experimentais das três amostras submetidas ao método da Caixa Quente Protegida.

Fonte: O Autor, 2019.

Observa-se na Tabela 16 que os valores de fluxo de calor extraídos, tanto pela correlação do autor quanto pela de Mavromatidis, são inferiores aos valores de fluxo medidos quando a emissividade é 0,95. Ao analisar a emissividade 0,68 percebe-se uma inversão, com valores de fluxo superiores aos encontrados experimentalmente. E quando verificamos a emissividade de 0,45, os valores extraídos pela correlação de Mavromatidis continuam superiores aos medidos além de ficarem mais distantes, enquanto que pela correlação do Autor os resultados voltam a ficar inferiores aos valores medidos e com uma diferença menor.

Essa tendência de erro reforça o que havia sido previsto pela simulação computacional onde já eram esperados erros maiores quanto utilizada a correlação de Mavromatidis para emissividades inferiores a 0,8. Foi observado, porém, um deslocamento do ponto de inflexão, ficando este agora próximo a emissividade de 0,7.

				Qcav			Erro (Abs)	
$H_{cav}/L_{cav}$	3	$\Delta T_{am}$	$\Delta T_{cav}$	Medido	Mavromatidis	Autor	Mavromatidis	Autor
[-]	[-]	[K]	[K]	[W]	[W]	[W]	[%]	[%]
8,9	0,95	25,6	10,1	57,3	25,5	38,0	55,5	33,7
8,9	0,95	20,4	7,9	34,3	18,7	28,6	45,5	16,7
8,9	0,95	15,8	6,9	29,9	15,9	24,5	46,7	18,1
8,9	0,68	25,3	15,9	36,9	44,6	43,3	21,0	17,5
8,9	0,68	20,9	13,5	30,9	36,6	35,6	18,5	15,2
8,9	0,68	15,4	11,0	25,5	28,3	27,9	11,2	9,4
8,9	0,45	25,9	16,4	26,7	46,5	29,3	74,0	9,7
8,9	0,45	20,9	13,7	26,0	37,2	23,4	43,0	9,9
8,9	0,45	16,0	10,9	19,7	28,2	17,9	43,2	8,9

Tabela 16: Resultados experimentais comparados aos valores previstos utilizando as correlações de Nusselt por Mavromatidis (Eq.20) e pelo Autor (Eq.36).

Fonte: O Autor, 2019.

Figura 17: Tendência do erro em função da variação da emissividade utilizando as correlações de Nusselt por Mavromatidis (Eq.20) e pelo Autor (Eq.36). (a)  $\Delta T=25K$ , (b)  $\Delta T=20K$  e (c)  $\Delta T=15K$ 





(b)

Fonte: O Autor, 2019.

Avaliando a tendência de erros quando utilizada a nova proposta de correlação percebesse que os percentuais continuam sendo inferiores a 20% independentemente da emissividade, o que já era esperado uma vez que esta é a primeira correlação que leva em consideração explicitamente essa variável em sua formulação.

Tendo como base os resultados experimentais apresentados, fica assim evidenciado que tanto o modelo computacional quanto a nova correlação de Nusselt modificado, propostas neste trabalho, reproduzem o comportamento de transferência de calor no interior de cavidades enclausuradas, de modo que a sua aplicação se mostra confiável e com níveis de erros inferiores às demais correlações apresentadas na literatura para as mesmas condições, mesmo ocorrendo variação da emissividade das superfícies internas da cavidade.
#### 7. CONCLUSÃO

Ao final deste trabalho, é possível afirmar que os três modos de transferência de calor têm peso equivalente na envoltória de edificações, ou seja cada modo contribui com cerca de 33% da taxa de calor, mas uma atenção especial deve ser dada à transferência de calor por radiação a qual em função das temperaturas típicas da aplicação costumam ser negligenciadas nos cálculos e, portanto, pode-se estar provocando erro significativo no resultado somente por essa hipótese equivocada.

Foi desenvolvida modelagem teórico-experimental do fenômeno de transferência de calor que atravessa uma cavidade enclausurada utilizando o software comercial CFX<sup>®</sup> 14.5, versão acadêmica, e comparado os resultados obtidos numericamente com testes práticos em uma amostra significativa de envoltória composta por blocos de concreto, nesta validação os desvios encontrados ficaram abaixo de 8% o que demonstram uma excelente reprodução do fenômeno físico real. Desta modelagem foi então isolada a cavidade enclausurada e novo modelo numérico foi desenvolvido para o estudo específico do fenômeno na cavidade enclausurada.

Foram consideradas 4 condições de diferença de temperatura: 25K, 20K, 15K e 10K, com 3 diferentes condições de temperatura média da cavidade para cada diferença de temperatura proposta, 10 razões de forma (H/L) e 8 condições de emissividade da superfície da cavidade, totalizando 960 casos. Com os resultados obtidos após simulados todos esses casos, e após análise criteriosa, foi proposta uma nova correlação matemática para cavidades enclausuradas levando-se em consideração tanto as características convectivas quanto as radiativas da cavidade, condição existente em blocos de concreto, com foco na melhoria do desempenho de envoltórias.

Essa correlação proposta, tendo como referência os 960 resultados numéricos, foi comparada com as demais correlações existentes na literatura e cujos critérios de utilização eram atendidos para os casos típicos de envoltórias, sendo que os erros encontrados demonstraram uma resposta similar às demais correlações para emissividades entre 0,8 e 1, mas quando os valores de emissividade são reduzidos de 0,8 a 0,3 apresentou erros muito menores, demonstrando mais uma vez a eficácia desta nova proposta.

Com o objetivo de assegurar a validade do método de obtenção dos dados, testes práticos foram feitos sob 9 condições variando-se a diferença de temperatura e a emissividade das superfícies internas da cavidade. Então, os resultados dos testes práticos foram comparados com os valores obtidos por meio das correlações da literatura que tiveram melhor desempenho, ou seja, a de Mavromatidis (Eq. 20) e do Autor (Eq. 36). A análise da comparação dos resultados práticos e os obtidos via correlação confirmou o comportamento previsto nas simulações, onde a proposta do autor consegue reproduzir com menores desvios o fenômeno físico apresentando erros inferiores a 20% para condições de utilização tendo valores de emissividade da superfície da cavidade na faixa entre 0,3 a 1, razão de forma entre 5 e 40, e diferença de temperatura de 10 K a 25 K, considerando temperaturas médias da cavidade de 280 K a 305 K.

Ao analisar os resultados práticos quanto a variação da emissividade da superfície interna da cavidade comprova-se a influência da radiação no processo de transferência em elementos de envoltórias. Percebe-se uma redução da taxa de transferência de calor da ordem de 20% quando reduzida a emissividade da superfície da cavidade de 0,95 para 0,68. Quando se altera a emissividade para 0,45 atinge-se redução da ordem de 40% na taxa de transferência de calor que atravessa a cavidade.

Deste modo, este trabalho atende seu objetivo principal de estudar o fenômeno de transferência de calor no interior de uma cavidade vertical enclausurada exposta a diferença de temperatura entre as superfícies verticais opostas. Comprova-se ainda que a variação da emissividade das superfícies internas da cavidade é uma alternativa eficaz de modificação do elemento construtivo visando melhoria de eficiência energética de edificações, uma vez que reduzindo em 30% a energia que atravessa um bloco de concreto esse atenderia o critério estabelecido em norma para todo o território nacional, independentemente do zoneamento bioclimático da região de utilização.

Como sugestão para futuros trabalhos, pode ser verificada a efetividade dessa nova correlação a outros casos de transferência de calor por cavidades enclausuradas, também é possível se verificar a eficácia da barreira de radiação em cavidades circulares horizontais, bem como verificar, em elementos construtivos reais, o percentual de ganho de eficiência energética. Novos fluidos no interior da cavidade podem gerar correlações distintas, bem como se alterada a faixa de temperatura na qual a cavidade é exposta ou ainda colocando em uso diferentes restrições geométricas.

#### 8. BIBLIOGRAFIA

- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6488/80: componentes de construção, determinação da condutância e transmitância térmica, método da caixa quente protegida. Rio de Janeiro, 1980.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220/03: Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15287/11: Informação e documentação – Projeto de pesquisa – Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.
- ABOUALI O., AHMADI G., Computer simulations of natural convection of single phase nanofluids in simple enclosures: A critical review. Applied Thermal Engineering. Vol. 36, 2012. p.1-13
- ASTM AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C1363-05: Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus. West Conshohocken, 2005.
- BAIRI. A., PERNIA, E. Z., MARIA. J.M.G.; A review on natural convection in enclosures for engineering applications. The particular case of the parallelogrammic diode cavity. Applied Thermal Engineering. Vol 63. 2014. P.304-322
- BEN, **Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia, 2018**. Disponível em: <a href="http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018">http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018</a> >. Acesso em: 07/09/2019.
- CATTON, I. *Natural convection in enclosures*. *Proceedings of the Sixth International Heat Transfer Conference*, 6 (1978).
- ELETROBRAS, **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica** (**Procel**)<https://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm >. Acesso em: 13/11/2010.
- FERREIRA, A. B. H.; Novo Aurélio Século XXI: o dicionário da língua portuguesa, 3.ed., Rio de Janeiro, Nova Fronteira, 1999.
- INMETRO, RTQ-C. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas, Portaria nº 372/2010, com alterações das portarias nº 17/2012 e nº 299/2013.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., **Fundamentos de transferência de calor**, 6 ed., tradução Eduardo Mach Queiroz, Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- ISO 6946:1996(E) *Building components and building elements Thermal resistance and thermal transmittance Calculation method*.1996.
- JACOB, M., Heat Transfer, Vol. 1, Wiley, New York, 1949.

- KREITH, F. Princípios da Transmissão de Calor, 3 ed., tradução Eitaro Yamane, Otávio de Mattos Silvares e Virgílio Rodrigues Lopes de Oliveira, São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
- LAMBERTS, R., GÜTHS, S. Relatório de recomendações para construção do equipamento caixa quente protegida. Relatório interno. Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.
- LANDIS, F., H. YANOWITZ: *Transient Natural Convection in a Narrow Vertical Cell*. *Proceedings of the Third International Heat Transfer Conference, A.I.Ch.E., New York, Volume 2* (1966) pp. 139/151. (Apud, KNUDSEN at al. Heat and Mass Transfer, Section 5).
- LEE, S.W., LIM C. H., SALLEH I.B. *Reflective thermal insulation systems in building: A review on radiant barrier and reflective insulation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 65* (2016) 643-661.
- MACGREGOR R. K., EMERY A. F., *Free Convection Through Vertical Plane Layers Moderate and High Prandtl Number Fluids*, J. Heat Transfer Journal 91(3), pp391-401, (1969). [doi:10.1115/1.3580194]
- MAVROMATIDIS, L.E., Study of coupled transient radiation-natural convection heat transfer across rectangular cavities in the vicinity of low emissivity thin films for innovative building envelope applications, Energy and Buildings 120, pp114-134, (2016).
- MEDINA, M. A. On the performance of radiante barriers in combination with diferente attic insulation levels, Energy and Buildings 33 (2000) 31-40.
- MELO, A. P., Análise da influência da transmitância térmica no consumo de energia de edificações comerciais. Concurso Catarinense de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética. Instituto IDEAL, 2008.
- MICHELS, C., LAMBERTS R., GUTHS S. *Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs*, *Energy and Buildings 40* (2008) 445-451.
- MOURA, L. M., **Desenvolvimento de um protótipo de equipamento de placa quente protegida**, Dissertação de Mestrado da Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil.1993.
- NIST CODATA, *Values of the Fundamental Constant;* Disponível em: < https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma|search\_for=boltzmann>. Acesso em: 15/11/2018.
- NBR 6136 **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria Requisitos** Associação Brasileira de normas Técnicas, 2016.
- NBR 15220 **Desempenho Térmico de Edificações**; ABNT Associação Brasileira de normas Técnicas, 2003.

- NBR 15575-4 Edificações habitacionais Desempenho, Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas SVVIE; ABNT Associação Brasileira de normas Técnicas, 2013.
- NOGUEIRA, R. M., MARTINS, M. A., AMPESSAN, F.; *Natural Convection in Rectangular Cavities with Different Aspect Ratios*, *Thermal Engineering*, *Vol10*. No.01-02, Junho e Dezembro 2011, p.44-49
- PEREIRA, G. C. C.; Bloco de Concreto: Aprimoramento e Análise Avançada de Desempenho Térmico, Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, 2017.
- PHILIPPI, P. C.; NICOLAU, V. P.; CUNHA NETO, J. A. B.; PERIN, M. G.; GÜTHS, S.; FERNANDES, C. P. Procedimentos para a determinação das propriedades térmicas de materiais e elementos de edificações. Relatório do SITERPA, UFSC. Florianópolis. 1988.
- PRINCIPI, P., FIORETTI, R., *Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks*. *Energy and Building*. Vol 51. 2012. p.131-142
- PROCEL EDIFICA. **Eletrobras**. Disponível em: <a href="http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD">http://www.procelinfo.com.br/data/Pages/LUMIS623FE2A5ITEMIDC46E0FFDBD</a> 124A0197D2587926254722LUMISADMIN1PTBRIE.htm#>. Acesso em: 13/11/2010.
- SHARMA, A.K., VELUSAMY, K., BALAJI, C., VENKATESHAN, S.P.; Conjugate turbulent natural convection with surface radiation in air filled rectangular enclosures. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol 50. 2007. P.625-639
- SIMÕES, N., COELHO, D., MARTINS, S., TADEU, A. Influência das juntas de argamassa no desempenho térmico de paredes de alvenaria. In: 3º Congresso Português de Argamassas de Construção. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Lisboa. Março, 2010.
- TURCO, L. C. C., Determinação Experimental do Coeficiente Global de Transferência de Calor de Elementos Não-homogêneos de Edificações, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUCPR, 2011.
- WINARSKY, D. W., O'NEAL, D. L. A quasi-steady-state model of attic heat transfer with radiant barriers, Energy and Buildings 24 (1996) 183-194.

# APÊNDICE

APÊNDICE 1: Arranjos de resistências térmicas	73
APÊNDICE 2: Coeficientes da função linear de Nusselt Modificado	78
APÊNDICE 3: Coeficientes da função linear do coeficiente $\beta_1$ em função	da temperatura
média da cavidade	81
APÊNDICE 4: Coeficientes da função polinomial de segunda ordem do co	beficiente $\beta_2$ em
função da razão de aspecto e diferença de temperatura da c	avidade81
APÊNDICE 5: Esquemático da posição dos sensores na amostra de caviad	le82

## ANEXO

Anexo 1: Zoneamento Bioclimático do	Brasil8	3
-------------------------------------	---------	---

#### **APÊNDICE 1: Arranjos de resistências térmicas**

Ao se transferir calor em paredes compostas, muitos arranjos de resistências podem ser utilizados, em função das características térmicas das camadas que compõe a parede.

Considerando que as temperaturas ao logo das seções transversais se mantenham uniformes e que a transferência de calor seja dada unidimensionalmente, o arranjo de resistências mostrado na Figura Ap1.1 pode ser utilizado para se encontrar qual a resistência térmica equivalente.

Figura Ap1.1: Arranjo de resistências térmicas com temperatura uniforme.



Fonte: O autor, 2019

Conhecendo as resistências como:

$$R1 = \frac{1}{h_{ext}} \qquad R2 = \frac{e^2}{k_2} \qquad R3 = \frac{e^3}{k_3} \qquad R_{cav} = \frac{1}{h_{cav}}$$
$$R_{cond\_1} = \frac{e_{cav}}{k_3} \qquad R4 = \frac{e^4}{k_4} \qquad R5 = \frac{1}{h_{int}}$$

Onde:

h<sub>ext</sub> representa o coeficiente convectivo do ar em contato com o ambiente externo;

e2 é a espessura de acabamento da região do bloco de concreto exposta ao ambiente externo;

- k2 é a condutividade térmica do material de acabamento da região exposta ao ambiente externo;
- e3 é a espessura da parede do bloco de concreto;
- k3 é a condutividade térmica do concreto;
- $e_{cav}$  é a distância entre as paredes verticais do bloco de concreto na região interna, ou espessura da cavidade;
- $h_{cav}$  representa o coeficiente convectivo do ar ( $h_{conv}$ ) somado ao coeficiente radiativo de transferência de calor( $h_{rad}$ ) que se encontra no interior da cavidade;
- e4 é a espessura de acabamento da região do bloco de concreto exposta ao ambiente interno;
- k2 é a condutividade térmica do material de acabamento da região exposta ao ambiente interno;
- h<sub>int</sub> representa o coeficiente convectivo do ar em contato com o ambiente interno;

Cabe diferenciar as áreas através das quais o fluxo de calor atravessará exclusivamente por condução (A1) das áreas onde existem cavidades do bloco (A2). Como na amostra existem três regiões de área A1 e duas de área A2, ao serem somadas estas cinco áreas encontra-se a área total da amostra (At).

Assim, tem-se através da soma das resistências a resistência térmica equivalente (R<sub>eq</sub>):

$$R_{eq_{1}} = R1 + R2 + R3 + \left(\frac{At}{\frac{3.A1}{R_{cond_{1}}} + \frac{2.A2}{R_{cav}}}\right) + R3 + R4 + R5$$

Uma segunda opção de arranjo pode ser analisada para a condição em que a temperatura na camada mais próxima à cavidade é afetada pela diferença do fluxo de calor, porém o mesmo não ocorre com as camadas externas do elemento construtivo. Assim, o arranjo mostrado na Figura Ap1.2 pode ser utilizado para se encontrar qual a resistência térmica equivalente.





Fonte: O autor, 2019

Neste caso, as resistências são as mesmas que as identificadas na condição da Figura Ap1.1, com exceção da  $R_{cond}$  que tem sua espessura alterada.

$$R_{cond_2} = \frac{e_{elemento}}{k_3}$$

Onde:

e<sub>elemento</sub> representa a espessura total do bloco de concreto;

Dessa forma, a resistência equivalente pode ser então encontrada por:

$$R_{eq_2} = R1 + R2 + \left(\frac{At}{\frac{3.A1}{R_{cond_2}} + \frac{2.A2}{(R3 + R_{cav} + R3)}}\right) + R4 + R5$$

Uma terceira hipótese pode ser considerada quando as temperaturas nas superfícies da parede também sofrem alteração em função do fluxo de calor diferenciado nas regiões de transferência puramente condutiva (nas pontes térmicas) e nas regiões onde o fluxo de calor precisa superar a cavidade. Neste caso, novo arranjo de resistências pode ser utilizado, como mostrado na Figura Ap1.3.

Figura Ap1.3: Arranjo de resistências térmicas com toda a parede sendo influenciada pela diferença de fluxo de calor.



Fonte: O autor, 2019

Para se encontrar qual a resistência térmica equivalente, tem-se:

$$R_{eq_{3}} = R1 + \left(\frac{At}{\frac{3.A1}{(R2 + R_{cond_{2}} + R4)} + \frac{2.A2}{(R2 + R3 + R_{cav} + R3 + R4)}}\right) + R5$$

Considerando como referência as mesmas três configurações dos experimentos práticos com blocos de concreto sem acabamento externo nem interno, tem-se as seguintes propriedades como apresentado na Tabela Ap1,1, além disso, as configurações ficam resumidas às duas primeiras com R2 e R4 igual a zero.

Utilizando estas propriedades para cada um dos arranjos encontra-se os valores do coeficiente de transferência de calor na cavidade (h<sub>cav</sub>), como visto na Tabela Ap1.2

	#1	#2	#3	Unidade
k <sub>con</sub> =	1,4	1,4	1,4	W/(m.K)
h <sub>ext</sub> =	12,8	11,4	11,3	W/(m².K)
h <sub>int</sub> =	19,9	20,6	20,5	W/(m².K)
e <sub>cav</sub> =	0,09	0,09	0,09	m
e <sub>bloco</sub> =	0,025	0,025	0,025	m
e <sub>elem</sub> =	0,14	0,14	0,14	m
A1=	0,0048	0,0048	0,0048	m²
A2=	0,0299	0,0299	0,0299	m²
Acav=	0,0299	0,0299	0,0299	m²
Atotal=	0,0741	0,0741	0,0741	m²

Tabela Ap1.1: Propriedades termo físicas e geométricas da amostra

Fonte: O Autor, 2019

Tabela Ap1.2: Propriedades termo físicas e geométricas da amostra

	#1	#2	#3	Unidade
Q <sub>am</sub> =	70,5	55,2	43,9	[W]
A <sub>am</sub> =	0,0741	0,0741	0,0741	m²
Q" <sub>am</sub> =	951,96	744,94	592,44	W/m²
U <sub>am</sub> =	3,49	3,27	3,22	W/(m².K)
R <sub>eq</sub> =	0,287	0,306	0,311	(m².K)/W
R <sub>cav_A1</sub> =	-0,270	-0,270	-0,270	(m².K)/W
$R_{cav_{A2}} =$	0,384	0,384	0,384	(m².K)/W
h <sub>cav_A1</sub> =	-3,7	-3,7	-3,7	W/(m².K)
h <sub>cav_A2</sub> =	2,6	2,6	2,6	W/(m².K)

Fonte: O Autor, 2019

				-	_
$\Delta T_{cav}$	Th	Τc	H <sub>cav</sub> /L <sub>cav</sub>	β1	β2
[K]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]
10	30,0	20,0	4,3	18,466	-0,057
10	30,0	20,0	8,6	18,658	-0,635
10	30,0	20,0	12,9	18,828	-0,971
10	30,0	20,0	17,1	18,698	-1,177
10	30,0	20,0	21,4	18,484	-1,037
10	30,0	20,0	25,7	18,421	-1,153
10	30,0	20,0	30,0	18,502	-1,409
10	30,0	20,0	34,3	18,114	-1,090
10	30,0	20,0	38,6	18,733	-1,552
10	30,0	20,0	42,9	18,489	-0,789
10	25,0	15,0	4,3	17,940	-0,441
10	25,0	15,0	8,6	18,041	-0,981
10	25,0	15,0	12,9	17,969	-1,014
10	25,0	15,0	17,1	17,879	-1,017
10	25,0	15,0	21,4	17,906	-1,083
10	25,0	15,0	25,7	17,901	-0,900
10	25,0	15,0	30,0	18,877	-0,734
10	25,0	15,0	34,3	17,637	-0,730
10	25,0	15,0	38,6	17,672	-0,658
10	25,0	15,0	42,9	17,917	-0,762
10	20,0	10,0	4,3	17,195	-0,485
10	20,0	10,0	8,6	16,969	-0,618
10	20,0	10,0	12,9	17,220	-0,791
10	20,0	10,0	17,1	17,127	-0,642
10	20,0	10,0	21,4	16,835	-0,042
10	20,0	10,0	25,7	17,335	-0,324
10	20,0	10,0	30,0	17,625	-1,003
10	20,0	10,0	34,3	17,182	0,114
10	20,0	10,0	38,6	17,549	-0,522
10	20,0	10,0	42,9	16,917	-0,190
15	35,0	20,0	4,3	18,948	-0,095
15	35,0	20,0	8,6	18,807	-0,585
15	35,0	20,0	12,9	18,866	-0,835
15	35,0	20,0	17,1	18,768	-0,960
15	35,0	20,0	21,4	19,083	-1,273
15	35,0	20,0	25,7	18,728	-1,130
15	35,0	20,0	30,0	18,517	-0,952
15	35,0	20,0	34,3	18,803	-1,204
15	35,0	20,0	38,6	19,251	-1,408
15	35,0	20,0	42,9	18,651	-0,406
15	27,5	12,5	4,3	17,933	0,009
15	27,5	12,5	8,6	18,014	-0,609

## APÊNDICE 2: Coeficientes da função linear de Nusselt Modificado

$\Delta T_{cav}$	Th	Τϲ	H <sub>cav</sub> /L <sub>cav</sub>	β1	β2
[K]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]
15	27,5	12,5	12,9	17,735	-0,652
15	27,5	12,5	17,1	18,409	-1,187
15	27,5	12,5	21,4	17,845	-0,836
15	27,5	12,5	25,7	17,912	-0,795
15	27,5	12,5	30,0	18,009	-0,833
15	27,5	12,5	34,3	18,207	-0,806
15	27,5	12,5	38,6	18,785	-0,339
15	27,5	12,5	42,9	17,661	-0,290
15	20,0	5,0	4,3	16,327	0,201
15	20,0	5,0	8,6	17,095	-0,564
15	20,0	5,0	12,9	16,750	-0,361
15	20,0	5,0	17,1	16,847	-0,403
15	20,0	5,0	21,4	16,864	-0,374
15	20,0	5,0	25,7	16,511	1,315
15	20,0	5,0	30,0	17,465	-0,314
15	20,0	5,0	34,3	17,127	-0,329
15	20,0	5,0	38,6	17,151	0,349
15	20,0	5,0	42,9	16,978	-0,063
20	40,0	20,0	4,3	19,251	0,062
20	40,0	20,0	8,6	19,398	-0,635
20	40,0	20,0	12,9	19,337	-0,948
20	40,0	20,0	17,1	19,280	-1,046
20	40,0	20,0	21,4	19,381	-1,222
20	40,0	20,0	25,7	19,367	-1,270
20	40,0	20,0	30,0	19,081	-1,145
20	40,0	20,0	34,3	19,094	-1,032
20	40,0	20,0	38,6	19,336	-1,150
20	40,0	20,0	42,9	19,395	-0,511
20	30,0	10,0	4,3	17,896	0,370
20	30,0	10,0	8,6	17,906	-0,193
20	30,0	10,0	12,9	17,908	-0,454
20	30,0	10,0	17,1	17,828	-0,634
20	30,0	10,0	21,4	17,865	-0,607
20	30,0	10,0	25,7	17,906	-0,738
20	30,0	10,0	30,0	17,802	-0,686
20	30,0	10,0	34,3	17,825	-0,685
20	30,0	10,0	38,6	17,885	-0,567
20	30,0	10,0	42,9	17,843	-0,217
20	20,0	0,0	4,3	16,619	0,357
20	20,0	0,0	8,6	16,699	-0,115
20	20,0	0,0	17,1	16,789	-0,327
20	20,0	0,0	21,4	16,768	-0,236
20	20,0	0,0	25,7	17,139	0,052
20	20,0	0,0	30,0	17,088	0,156
20	20,0	0,0	34,3	19,195	-2,137

$\Delta T_{cav}$	Th	Τc	H <sub>cav</sub> /L <sub>cav</sub>	β1	β2
[К]	[°C]	[°C]	[-]	[-]	[-]
20	20,0	0,0	12,9	16,738	-0,313
20	20,0	0,0	38,6	16,671	0,402
20	20,0	0,0	42,9	16,693	0,256
25	45,0	20,0	4,3	19,613	0,063
25	45,0	20,0	8,6	19,626	-0,510
25	45,0	20,0	12,9	19,683	-0,895
25	45,0	20,0	17,1	19,595	-0,943
25	45,0	20,0	21,4	19,587	-0,980
25	45,0	20,0	25,7	19,918	-1,165
25	45,0	20,0	30,0	19,644	-1,136
25	45,0	20,0	34,3	19,644	-1,180
25	45,0	20,0	38,6	19,695	-1,193
25	45,0	20,0	42,9	19,661	-0,370
25	32,5	7,5	4,3	18,038	0,607
25	32,5	7,5	8,6	18,049	-0,057
25	32,5	7,5	12,9	17,990	-0,305
25	32,5	7,5	17,1	18,200	-0,614
25	32,5	7,5	21,4	17,822	-0,541
25	32,5	7,5	25,7	18,035	-0,691
25	32,5	7,5	30,0	17,946	-0,698
25	32,5	7,5	34,3	18,095	-0,815
25	32,5	7,5	38,6	18,059	-0,750
25	32,5	7,5	42,9	17,995	-0,108
25	20,0	-5,0	4,3	16,525	0,536
25	20,0	-5,0	8,6	16,441	0,090
25	20,0	-5,0	12,9	16,287	0,026
25	20,0	-5,0	17,1	16,494	-0,060
25	20,0	-5,0	21,4	16,335	0,011
25	20,0	-5,0	25,7	16,323	0,233
25	20,0	-5,0	30,0	16,279	0,869
25	20,0	-5,0	34,3	18,394	-0,043
25	20,0	-5,0	38,6	16,390	0,638
25	20,0	-5,0	42,9	16,255	0,591

Tm	А
[°C]	βı
32,5	19,667
30,0	19,292
27,5	18,842
25,0	18,539
20,0	17,962
15,0	17,195
12,5	16,912
10,0	16,800
7,5	16,370

APÊNDICE 3: Coeficientes da função linear do coeficiente  $\beta_1$  em função da temperatura média da cavidade

Fonte: O Autor, 2019.

# APÊNDICE 4: Coeficientes da função polinomial de segunda ordem do coeficiente $\beta_2$ em função da razão de aspecto e diferença de temperatura da cavidade

Tm	Δт	2.	2	2
[°C]	[K]	$\kappa_1$	<i>N</i> <sub>2</sub>	<i>N</i> 3
32,5	25	0,0024	-0,1287	0,5047
30	20	0,0025	-0,1327	0,4514
27,5	15	0,0021	-0,1157	0,3258
25	10	0,0019	-0,1092	0,2564
20	25	0,0023	-0,1308	1,0269
20	20	0,002	-0,1093	0,6957
20	15	0,0022	-0,1023	0,2542
20	10	0,0008	-0,0337	-0,5738
7,5	25	0,0014	-0,0548	0,5831
10	20	0,0012	-0,0465	0,2948
12,5	15	0,0013	-0,0556	0,1573
15	10	0,0002	0,0019	-0,6039

## APÊNDICE 5: Esquemático da posição dos sensores na amostra de caviade

Figura Ap3.1: Posicionamento dos sensores de temperatura.



- 17 Canais de termopares tipo "T"
- 1 Canal de gradezas elétricas (V, A, W,  $\phi$ )
- 1 Relè de estado sólido para comando das resistências

Software de monitoramento e comando, LabView Transdutor de temperatura, Agilent Transdutor de grandezas elétricas, Ciber Multiplexador de grandezas elétricas, Agilent



Concor	Descrição		Posição em mm			
Sensor			Y	Z		
TCmQ	Temperatura do ar na Câmara Quente	400	400	-800		
T2	Temperatura do ar na Caixa Quente superior esquerda	200	600	-150		
TCxQ	Temperatura do ar na Caixa Quente centro	400	400	-150		
T4	Temperatura do ar na Caixa Quente inferior direita	600	200	-150		
T5	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Quente superior esquerda	200	600	0		
Т6	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Quente centro	400	400	0		
T7	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Quente inferior direito	600	200	0		
Т8	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Quente superior esquerda	200	600	3		
Т9	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Quente centro	400	400	3		
T10	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Quente inferior direito	600	200	3		
T11	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Frio superior esquerda	200	600	83		
T12	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Frio centro	400	400	83		
T13	Temperatura da superfície interna da cavidade lado Frio inferior direito	600	200	83		
T14	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Frio superior esquerda	200	600	86		
T15	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Frio centro	400	400	86		
T16	Temperatura da superfície externa da cavidade lado Frio inferior direito	600	200	86		
TCmF	Temperatura do ar na Câmara Fria	400	400	386		

Tabela Ap5.1: Coordenadas de posicionamento dos sensores de temperatura na amostra.

Obs: Considerando o ponto inferior esquerdo da superfície externa da cavidade lado quente como orígem dos eixos.

#### ANEXO 1: Zoneamento Bioclimático do Brasil

Assim como o planeta é dividido em Zona Polar do Norte, Zona Temperada do Norte, Zona Tropical, Zona Temperada do Sul e Zona Polar do Sul, em função da incidência solar e consequente característica climática, o território brasileiro também tem seu clima mapeado, e está dividido em 8 Zonas Bioclimáticas.

Estas zonas têm relação com as características climáticas das diversas áreas do território e não estão limitadas pelas fronteiras políticas dos estados. É por meio deste mapa, que se pode relacionar as características da região e traçar as estratégias construtivas para cada local, onde será projetada e construída uma edificação.

O mapa do zoneamento bioclimático brasileiro é apresentado na Figura An1.2.

Figura An1.2: Mapa do zoneamento bioclimático do Brasil



Fonte: NBR 15220 - 3, 2003