

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

BLOCO DE CONCRETO: APRIMORAMENTO E ANÁLISE AVANÇADA DE DESEMPENHO TÉRMICO

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de
Doutor em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do
Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil.

Gustavo Cherem Côrte Pereira

CURITIBA, OUTUBRO DE 2017

RESUMO

Blocos de concreto vêm ganhando espaço no mercado brasileiro, devido às vantagens econômicas nos valores investidos nas obras. No entanto, oferecem ainda baixa resistência térmica e, portanto, fraco desempenho térmico o que dificulta a redução de consumo de energia em edificações e o melhoramento de conforto térmico.

Assim, neste trabalho, tem-se como objetivo o aprimoramento do desempenho térmico do bloco de concreto mais utilizado no Brasil, alterando-se o número e o formato das cavidades internas. Ao todo são estudadas 18 configurações. Em regime permanente, seu desempenho térmico é avaliado em termos da condutividade térmica equivalente, alcançando redução em 45% em relação ao modelo utilizado atualmente no mercado. Paralelamente, o desempenho dos blocos é avaliado dinamicamente, utilizando-se de uma nova abordagem 3-D proporcionada pela integração entre um programa de simulação energética de edificações e um programa de CFD, confirmando-se a melhora de desempenho da nova configuração proposta para os blocos de concreto.

A nova abordagem para simulação termoenergética de ambientes construídos é então utilizada para investigar os efeitos de se considerar o detalhamento das cavidades com os fenômenos de convecção e radiação em seus interiores, nos resultados de simulações transientes na escala da edificação. A metodologia apresentada mostra-se promissora para aumento de precisão em análises energéticas de construções e de desempenho de elementos construtivos. O nível de aumento de precisão tem grande variação nos casos de estudo realizados, variando de 2,4% a 741%.

ABSTRACT

Elements for building envelope with lower heat transfer rates are of particular interest to society and government agencies, due to benefits such as reduced energy consumption and improved thermal comfort. In this scenario, the concrete blocks that have been gaining ground in the Brazilian market, due to the economic advantages in the values invested in buildings. Meanwhile they offer low thermal resistance, offering poor thermal performance.

However, the objective is to improve the thermal performance of the most commonly used concrete block in Brazil by altering the number and shape of the internal cavities. In all, 18 configurations are studied. In steady state, its thermal performance is evaluated in terms of the equivalent thermal conductivity, achieving a 45% reduction in relation to the model currently used in the market. In parallel, the performance of the blocks is evaluated dynamically, using a new 3-D approach provided by the integration between a building energy simulation program – BES - and a CFD program, confirming the performance improvement of the proposed new configuration for the concrete blocks.

The new approach for thermo-energetic simulation of constructed environments is then used to investigate the effects of considering cavity detailing with convection and radiation phenomena in its interiors in the results of transient simulations on the building scale. The methodology presented is promising for increased accuracy in energy analysis of constructions and performance of envelope elements. The level of precision increase has great variation in the cases of study performed, ranging from 2.4% to 741%.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Nathan Mendes, pela dedicada orientação.

Aos meus filhos.

Ao colega de doutorado Walter Mazuroski que desenvolveu a programação do método de acoplamento do presente trabalho.

A iESSS, instituto ESSS para Educação, Pesquisa e Desenvolvimento e a Ansys, pelo apoio técnico recebido.

A todos os membros do Laboratório de Sistemas Térmicos – PUCPR.

A CAPES e ao CNPq, do Ministério da Educação e do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, pelo suporte financeiro.

SUMÁRIO

	RESUMO.....	ii
	ABSTRACT.....	iii
	SUMÁRIO.....	iv
	LISTA DE FIGURAS.....	viii
	LISTA DE TABELAS.....	xii
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	ixv
1	CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....	1
2	CAPÍTULO 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ASPECTOS TEÓRICOS.....	8
3	CAPÍTULO 3 –METODOLOGIA.....	18
3.1	Domus.....	18
3.2	Aperfeiçoamento do desempenho térmico do Bloco de Concreto.....	25
3.2.1	Geometria e propriedades dos materiais.....	25
3.2.2	Modelagem física e matemática.....	27
3.2.3	Novas geometrias para o bloco de concreto.....	33
3.2.4	Critérios de convergência nas simulações.....	33
3.3	Análise transiente na escala da edificação.....	34
3.3.1	Metodologia de acoplamento BES-CFD.....	35
3.3.2	Estudos de Caso para simulação integrada BES-CFD.....	40
3.3.2.1	Caso 1: Avaliação da simulação acoplada BES-CFD.....	44
3.3.2.2	Caso 2: Bloco Original de Mercado vs Bloco Aprimorado da P#27.....	46

3.3.2.3	Caso 3: Inclusão de assimetria provocada pela cinemática solar.....	48
3.3.2.4	Caso 4: Adição de uma Camada de Ar Ventilada.....	50
4	CAPÍTULO 4 - RESULTADOS DO APRIMORAMENTO DO DESEMPENHO TÉRMICO DO BLOCO DE CONCRETO.....	54
4.1	Estudo Paramétrico da Condutividade Térmica Equivalente.....	76
4.2	Estudos de Refino de Malha.....	83
4.3	Influências do número de blocos sobrepostos.....	88
4.4	Análise crítica do método de cálculo da norma NBR 15220.....	90
4.4.1	Avaliação da Condutividade Equivalente pelo método da norma.....	95
4.4.1.1	Bloco Original de Mercado (C2P1).....	96
4.4.1.2	Proposta #3 (C2P2).....	97
4.4.1.3	Proposta #24 (C1P2).....	99
4.4.1.4	Proposta #27 (C1P5).....	101
4.4.2	Avaliação dos resultados e das hipóteses consideradas na norma.....	102
5	CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS COM O ACOPLAMENTO ENTRE SOFTWARES BES-CFD.....	106
5.1	Verificação da co-simulação BES-CFD.....	107
5.2	Resultados do Caso 1 – Análise do acoplamento BES-CFD.....	108
5.2.1	Temperatura Interna Livre.....	109
5.2.2	Temperatura Interna Fixa.....	110
5.2.2.1	Com o Bloco de concreto modelo atual de mercado.....	110
5.2.2.2	Bloco de concreto aprimorado (Proposta #27 – C1P5).....	115
5.3	Resultados do Caso 2 – Ganhos com o aprimoramento térmico do bloco de concreto.....	123
5.3.1	Temperatura Interna Livre.....	123
5.3.2	Temperatura Interna Fixa.....	125
5.3.3	Estudo de Refino de Malha no acoplamento BES-CFD – Blocos Aprimorados....	129

5.3.4	Efeito do congelamento do campo de velocidades no interior das cavidades no acoplamento BES-CFD.....	131
5.3.5	Estudo do resíduo mínimo utilizado nas simulações transientes do Ansys-CFX...	132
5.3.6	Estudo do efeito dos passos de tempo.....	134
5.4	Resultados: Caso 3 – Inclusão de assimetria provocada pela cinemática solar.....	135
5.5	Resultados: Caso 4 – Assimetria provocada pela cinemática solar e inclusão de uma camada de ar ventilada.	144
6	CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E DISCUSSÕES.....	154
7	CAPÍTULO 7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	165
	APÊNDICE A – METODOLOGIA DE DISCRETIZAÇÃO DO Ansys-CFX.....	169
	APÊNDICE B – ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE DAS AMOSTRAS DO BLOCO DE CONCRETO ORIGINAL DE MERCADO.....	175
	APÊNDICE C – MODELO DE TURBULÊNCIA K-ÔMEGA NO CFX.....	177

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Bloco de concreto estudado.....	7
Figura 3.1	Modelagem tradicional de elementos com cavidades.....	20
Figura 3.2	Ambiente do Domus.....	23
Figura 3.3	Seleção dos materiais da parede no Domus.....	24
Figura 3.4	Dimensões do bloco de mercado e domínios modelados.....	26
Figura 3.5	Elementos das faces.....	31
Figura 3.6	Fluxograma do modelo de co-simulação entre Domus e Ansys.....	39
Figura 3.7	Ambiente de teste.....	42
Figura 3.8	Função senoidal de variação de temperaturas externas.....	43
Figura 3.9	Função de variação de radiação direta.....	43
Figura 3.10	Modelo representativo de parede para a co-simulação Domus – Ansys-CFX.....	46
Figura 3.11	Domínios de simulação do Caso 3.....	50
Figura 3.12	Montagem da camada de ar ventilada.....	51
Figura 3.13	Ilustração da cinemática solar.....	52
Figura 3.14	Domínios de simulação do Caso 4.....	53
Figura 4.1	Perfil de temperatura no plano central.....	55
Figura 4.2	Perfil de velocidade no plano transversal da cavidade direita.....	56
Figura 4.3	Distribuição da intensidade de fluxo de calor, em Wm^{-2} , nas faces.....	59
Figura 4.4	Seção das propostas #1 a #4, #9, #10, #13 e #14.....	63
Figura 4.5	Campo de velocidades no plano central da cavidade da proposta #1....	69
Figura 4.6	Configurações das propostas #20 a #27.....	73

Figura 4.7	Campo de velocidades no plano central da cavidade da proposta #27..	75
Figura 4.8	Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função da Emissividade do concreto no interior das cavidades.....	77
Figura 4.9	Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do Coeficiente de Convecção Externo.....	78
Figura 4.10	Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do Coeficiente de Convecção Interno.....	79
Figura 4.11	Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função da Condutividade Térmica do Concreto.....	81
Figura 4.12	Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do ΔT	83
Figura 4.13	Influência do número de elementos da malha no domínio do ar.....	85
Figura 4.14	Superfície frontal da primeira cavidade do bloco superior.....	86
Figura 4.15	Influência do número de elementos da malha nos domínios do bloco superior e do bloco inferior.....	87
Figura 4.16	Ilustração do número de blocos sobrepostos.....	88
Figura 4.17	Condutividade térmica equivalente em função do número de blocos sobrepostos.....	89
Figura 4.18	Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas.....	92
Figura 4.19	Tabela B.1 da norma – Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura [5].....	92
Figura 4.20	Tabela A.1 da norma – Resistência térmica superficial interna e externa [5].....	92
Figura 4.21	Zoneamento bioclimático brasileiro.....	95
Figura 4.22	Bloco de concreto atual do mercado dividido em seções.....	96
Figura 4.23	Bloco de concreto da Proposta #3 dividido em seções.....	98
Figura 4.24	Bloco de concreto da Proposta #24 dividido em seções.....	100
Figura 4.25	Bloco de concreto da Proposta #27 dividido em seções.....	102

Figura 5.1	Temperatura interna obtida por ambos os métodos de simulação com bloco maciço com fim de validação.....	108
Figura 5.2	Resultados de temperatura interna livre para Caso 1 – Blocos originais de mercado.....	110
Figura 5.3	Resultados da temp. de superfície interna para Caso 1 com temperatura interna fixa e Blocos originais de mercado.....	113
Figura 5.4	Fluxo de calor para Caso 1 com temp. interna fixa e Blocos de mercado.....	114
Figura 5.5	Convergência da temp. de superfície interna para Caso 1 com temperatura interna fixa e Blocos originais de mercado.....	114
Figura 5.6	Resultados do Caso 1 para blocos aprimorados da proposta #27 – temperaturas de superfície interna da parede em análise.....	116
Figura 5.7a	Caso 1: Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 08:20h.....	117
Figura 5.7b	Caso 1: Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 11:20h.....	118
Figura 5.7c	Caso 1: Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 14:20h.....	119
Figura 5.8	Resultados do fluxo de calor para Caso 1 com temperatura interna fixa em 24°C e Blocos aprimorados C1P5 da proposta #27.....	121
Figura 5.9	Resultados de temperatura para Caso 1 com temperatura interna fixa em 27°C e Blocos aprimorados C1P5 da proposta #27.....	122
Figura 5.10	Resultados de temperaturas internas para Caso 2 com temperatura interna livre.....	124
Figura 5.11	Resultados de fluxos de calor para Caso 2 com temperatura interna livre.....	125
Figura 5.12	Resultados de temperatura de superfície interna para Caso 2 com temperatura interna fixa.....	127
Figura 5.13	Resultados de fluxo de calor para Caso 2 com temperatura interna fixa.....	128
Figura 5.14	Perfis de temperatura para o caso com blocos de mercado e blocos aprimorados da proposta #27 às 16h da tarde no plano central do comprimento dos blocos. [Temp. Externa = 16.5°C; Radiação solar = 415,9Wm-2; Temp. Interna = 24°C].....	129
Figura 5.15	Influência do refino de malha no CFD no método acoplado BES-CFD.....	130
Figura 5.16	Influência do congelamento do campo de velocidades.....	132
Figura 5.17	Influência do resíduo no CFD – Blocos originais de mercado.....	133

Figura 5.18	Influência do resíduo no CFD – Blocos aprimorado proposta #27.....	134
Figura 5.19	Influência do passo de tempo no BES – Blocos originais de mercado.	135
Figura 5.20	Resultados de temperatura de superfície interna para o Caso 3.....	138
Figura 5.21	Resultados de fluxo de calor na superfície interna para o Caso 3.....	138
Figura 5.22a	Campos de temperaturas das 13:00 às 18:00h – Caso 3.....	141
Figura 5.22b	Campos de temperaturas das 19:00 às 23:00h – Caso 3.....	142
Figura 5.23	Detalhe dos campos de temperatura e velocidade nos 4 blocos superiores da parede às 16:00h – Caso 3. (* as cores dos vetores indicam intensidade da velocidade.....	143
Figura 5.24	Domínios simulados.....	145
Figura 5.25	Temperaturas de superfície interna para o Caso 4.....	146
Figura 5.26	Fluxos de calor na superfície interna para o Caso 4.....	148
Figura 5.27a	Campos de temperaturas no plano central das 13:00 às 18:00h–Caso4	149
Figura 5.27b	Campos de temperaturas no plano central das 19:00 às 23:00h–Caso4	150
Figura 5.28	Campo de velocidades no plano central às 16:00h – Caso 4.....	151
Figura A.1	Definição do Volume de Controle.....	171
Figura A.2	Elemento de malha.....	173
Figura B1	Aparato tipo Caixa Quente Protegida [32].....	177

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Propriedades equivalentes para configuração dos blocos no BES.....	21
Tabela 3.2	Propriedades Termofísicas.....	26
Tabela 3.3	Dados de transferências entre programas.....	38
Tabela 4.1	Configurações propostas para cavidades retangulares.....	61
Tabela 4.2	Fração de Vazio.....	62
Tabela 4.3	Resultados das propostas #1 a #4, #9 e #13.....	65
Tabela 4.4	Resultados das propostas #1 a #4, #9 e #13 – Alterando-se a análise comparativa de percentuais.....	66
Tabela 4.5	Configurações propostas para cavidades retangulares.....	71
Tabela 4.6	Resultados das propostas #20 a #28.....	72
Tabela 4.7	Resultados das propostas #20 a #28 – Alterando-se a análise comparativa de percentuais.....	72
Tabela 4.8	Transmitâncias térmicas de paredes externas segundo norma NBR 15220.....	94
Tabela 4.9	Quadro resumo.....	103
Tabela 4.10	Tabela 2 da ISO [13] – Resistência térmica da camada de ar não ventilada para superfícies com emissividade acima de 0,8, em $(m^2K).W-1$	104
Tabela 5.1	Quantidade calor transferido Domus vs Acoplamento Domus-Ansys-CFX com blocos originais de mercado.....	112
Tabela 5.2	Quantidade de calor transferido comparando metodologia Domus vs Acoplamento Domus-Ansys-CFX com blocos aprimorados da proposta #27.....	121

Tabela 5.3	Quantidade de calor transferido para ambos os tipos de blocos no Caso 2, com temperatura interna livre.....	125
Tabela 5.4	Quantidade de calor transferido para ambos os tipos de blocos no Caso 2, com temperatura interna fixa em 24°C.....	127
Tabela 5.5	Número de elementos de malha em cada versão de refinamento.....	130
Tabela 5.6	Quantidade de calor transferido comparando-se os dois métodos de simulação para o Caso 3.....	137
Tabela 5.7	Quantidade de calor transferido comparando-se os dois métodos de simulação para o Caso 4.....	148
Tabela 5.8	Tabela resumo de resultados dos Casos 1, 2 e 3	153
Tabela A.1	Funções de forma.....	175

LISTA DE SÍMBOLOS

Variável	Descrição	Unidade
A	Área	m ²
b	Espessura de paredes	m
C	comprimento	m
c _p	Calor específico a pressão constante	J (kg K) ⁻¹
C _S	Parcela sensível da capacidade de refrigeração	W
d _f	Fator de decréscimo da amplitude térmica	
E _{e.c.}	Espessura equivalente no sentido do comprimento	m
E _{e.l.}	Espessura equivalente no sentido da largura	m
Ė _G	Energia gerada	W
Ė _T	Energia transmitida	W
F _v	Fração de Vazio	%
Gr	Número de Grashof	
h	Coeficiente de convecção de troca de calor	W (m ² K) ⁻¹
J	Fluxo mássico de água	Kg s ⁻¹
L	Profundidade do bloco de concreto	m
L	Largura	m
ṁ	Fluxo mássico	kg/s
n _{cav}	Número de cavidades	-
Nu	Número de Nusselt	
p	Pressão	Pa
Pr	Número de Prandtl	
q̇	Taxa de transferência de calor	W
R	Resistência térmica	(m ² K) W ⁻¹
Ra	Número de Rayleigh	
S	Termo fonte	
T	Temperatura	K, °C
U	Vetor velocidade, U _{x,y,z}	m/s
U	Transmitância Térmica	W(m K)-1
V	Volume	m ³
v	Volume específico	m ³ kg ⁻¹
w	Umidade absoluta do ar	kg kg ⁻¹
β	Expansividade térmica	K ⁻¹
ΔT	Diferença de temperatura	K

ε	Emissividade radiativa do material	
ρ	Densidade	Kg m^{-3}
λ	Condutividade térmica do material	W(m K)^{-1}
λ_{eq}	Condutividade térmica equivalente da montagem de blocos com argamassa.	W(m K)^{-1}

Subescrito

a	do ar
arg	da argamassa
bloco	do bloco
cav	de cavidades
conc	do concreto
eq	equivalente
ext	do ambiente externo
int	do ambiente interno
sup	de superfície
reb	do reboco
t	total

Sobrescrito

0	do passo de tempo anterior
---	----------------------------

1 INTRODUÇÃO

Elementos de envoltórios de edificações que oferecem menores taxas de transferência de calor são de especial interesse da sociedade, dos profissionais da área e dos órgãos governamentais, devido a benefícios tais como redução de consumo de energia e melhoramento de conforto térmico. Segundo o Boletim Energético Nacional [1], 50,8% dos 522,8TWh de energia elétrica consumida no Brasil são atribuídos a edificações residenciais, comerciais e públicas e esse consumo tem aumentado a cada ano. Os sistemas de condicionamento de ar são responsáveis pelo consumo de grande parte desta energia, sendo que nas edificações comerciais 30% da energia consumida devem-se principalmente aos sistemas de climatização [2] e nas residências brasileiras a média da parcela de energia utilizada por condicionadores de ar residenciais varia de acordo com a região, chegando a 16% no inverno do sul do país [3].

Para melhorar este quadro atual de consumo energético de edificações, há necessidades de mudança no perfil de projetista de edificações, construtores e incorporadores, pois ainda grande parte dos projetos se faz com maiores preocupações estrutural e estética e as obras com prioridades econômicas e de prazo, conforme apontado em [4], onde se relata que uma pequena parcela, em torno de 15%, utiliza-se de ferramentas para aprimorar o conforto térmico e o consumo de energia dos futuros ocupantes da edificação em projeto.

Com o objetivo de desacelerar este consumo por parte das edificações brasileiras, o governo brasileiro através do INMETRO, como órgão certificador e pela ELETROBRÁS como órgão financiador, estabeleceu-se o programa brasileiro de etiquetagem. Este programa teve seu início em 1986, promovendo

a etiquetagem de todos os modelos de refrigeradores e congeladores fabricados no país. Em 2001, a lei nacional de eficiência energética (Lei nº. 10.295) define que o poder executivo deve estabelecer níveis máximos de consumo específico de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País e ainda deve desenvolver mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no País. Hoje há um regulamento em vigor através da portaria do INMETRO/ MDIC número 50 de 01/02/2013 que estabelece métodos de avaliação do projeto da edificação para sua classificação energética, onde o objetivo é o alcance da classificação energética “A”.

De modo complementar, as normas brasileiras NBR 15220 [5] e NBR 15575 [6] definem, respectivamente, métodos de cálculo e limites máximos de coeficientes globais de transferência de calor para paredes externas a serem respeitados dentro do país. Tais valores limitam o uso dos blocos de concreto atuais, fato que motivou o trabalho de aprimoramento do desempenho térmico de tais blocos, pois, quando se utiliza o método de cálculo da norma [5] para obtenção do coeficiente global de transferência de calor de uma parede construída com os blocos de concreto de mercado estudados, chega-se a um valor de $2,77\text{W}(\text{m}^2 \text{K})^{-1}$.

O valor de $2,77\text{W}(\text{m}^2 \text{K})^{-1}$ excede o máximo recomendado para paredes externas de edificações construídas nas zonas climáticas 1 e 2 que incluem grande parte do sul do país e regiões do sudeste brasileiro. Adicionalmente, seria um valor adequado segundo a norma, para as demais zonas climáticas somente em caso de pintura de fachada em cores claras, como o branco, amarelo claro, “alumínio” e verde claro.

No Brasil, é fator cultural o uso de alvenaria para a construção de residências e demais edificações comerciais, industriais e públicas. Entre os

elementos construtivos empregados, o bloco de concreto vem ocupando um espaço importante no mercado, substituindo em parte os tijolos de argila e chegando a atuar em aproximadamente 5% do mercado [7]. O aumento do uso dos blocos de concreto segue impulsionado devido a dois fatores altamente relacionados: i) o uso da alvenaria estrutural com blocos de concreto proporciona uma série de vantagens econômicas, alcançando diminuição de 20% no custo total da obra [7, 8] e ii) o mercado imobiliário brasileiro tem se voltado fortemente para o mercado de residências para a população de baixa e média renda onde o bloco de concreto se encaixa perfeitamente devido às economias geradas. Entretanto, os blocos de concreto empregados nas construções oferecem baixa resistência térmica [5] quando comparados aos tijolos de argila.

Como ponto de partida, as menores resistências térmicas encontradas nos blocos de concreto são consequências da maior condutividade térmica do concreto e das maiores espessuras de “paredes” utilizadas no seu *design*. O coeficiente global de uma parede com bloco de concreto convencional é em torno de 60% maior que uma parede com tijolo de argila convencional de 6 furos, diferenças que tem inviabilizado o uso do bloco de concreto em edificações que visam a classificação energética regulamentada. Estudos de aprimoramento de desempenho térmico de tijolos de argila já têm reduzido a condutividade térmica equivalente destes elementos. Contudo, o aprimoramento do desempenho térmico do bloco de concreto se faz necessário, sendo o objetivo principal deste trabalho, com foco no bloco de concreto mais utilizado no Brasil, que possui dimensões singulares. Conforme detalhado na seção de levantamento bibliográfico, não houve ainda nenhum trabalho de aprimoramento do modelo de bloco de concreto mais utilizado no Brasil. Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos para estudar a influência do formato e do número de cavidades retangulares e verticais em tijolos de argila e em blocos de concreto. No entanto,

as melhores configurações encontradas em cada trabalho apresentam diferenças, não convergindo para uma conclusão sólida. Ainda, na literatura, os autores não citam a função estrutural do bloco de concreto e o compromisso de mantê-la.

Portanto, este trabalho visa o seu aprimoramento, alterando-se geometricamente os espaços das cavidades de blocos de concreto para elevação da resistência térmica, avaliá-lo ainda de forma inédita e avançada ao analisar seu desempenho em regime transiente, tridimensionalmente e na escala da edificação, sendo sujeito a condições de contorno heterogêneas nas superfícies, devido a efeitos de sombreamento e de não uniformidade do campo de velocidades. A Figura 1.1 ilustra o tipo de bloco estudado. A metodologia da pesquisa consiste na adoção de um modelo de bloco frequentemente utilizado nas construções brasileiras [7]. O aprimoramento da resistência térmica foi feito levando-se em conta os três fenômenos combinados de transferência de calor em regime permanente por meio de simulações no software Ansys-CFX®, mantendo-se a sua massa e sua função estrutural. Para isto, calculou-se a condutividade térmica equivalente (λ_{eq}) de um conjunto de 18 diferentes configurações geométricas, onde se variaram as quantidades e as dimensões das cavidades internas do bloco de concreto, mantendo-se a fração de vazio em 40%. A condutividade térmica equivalente, que também será chamada de ETC (*Equivalent Thermal Conductivity*), foi calculada considerando-se os fenômenos de convecção livre e radiação no interior das cavidades e condução através do concreto e da argamassa. Nas simulações que consideram todos os três fenômenos, são feitas avaliações detalhadas das influências das configurações das cavidades nas quantidades de calor transferidas por condução, convecção e radiação. A importância de se levar em conta o fenômeno da radiação, bem como o efeito do desalinhamento de cavidades também são investigados. A configuração de maior resistência térmica apresentou como resultado um

coeficiente de condutividade térmica equivalente de 0,498W/m-K, correspondendo a 55% do valor encontrado para a ETC do bloco original do mercado.

Segundo procedimento da norma NBR-15220 [5], quando calculadas as transmitâncias térmicas de paredes com as propostas de blocos de concreto estudadas, os resultados divergem significativamente com os resultados das simulações. Uma análise crítica do método de cálculo da norma é então realizada.

A modelagem em regime permanente utilizada no aprimoramento do desempenho térmico dos blocos de concreto torna possível o estudo da influência de parâmetros utilizados como dados de entrada do modelo, nos dados de saída. Essa análise de sensibilidade é realizada, enriquecendo as análises dos resultados e ajudando a prever quais e como as características físicas podem ser modificadas para melhorar o desempenho do elemento de edificação.

A análise em regime permanente, levando-se em conta a transmitância térmica como parâmetro termofísico único, pode levar a erros significativos em estimativas de consumo e demanda de energia em análises de edificações. Porém, como observado em [9, 10 e 11], o aumento da resistência térmica das paredes externas do edifício é uma boa alternativa para redução das perdas de calor, mas não permite avaliar o comportamento dinâmico do envoltório de uma edificação, pois, o comportamento real envolve diferenças de inércia térmica, diferenças de difusividade térmica no interior dos elementos ao atravessar cavidades e os efeitos da variação de temperaturas nos fenômenos de convecção e radiação no interior das cavidades.

Segundo o levantamento bibliográfico realizado, a literatura é também escassa sobre trabalhos de pesquisa que analisem o desempenho desses blocos

em campo ou por meio de simulações transientes integradas a modelos de edificações e com alto nível de detalhamento das cavidades nos seus interiores.

Este trabalho investiga os efeitos de se considerar o detalhamento das cavidades com os fenômenos de convecção e radiação nos seus interiores, nos resultados de simulações transientes na escala da edificação. Desta forma, propõe-se além da análise em regime permanente do bloco de concreto aprimorado, a avaliação em regime transiente na escala da edificação por meio do acoplamento entre um programa de BES - *Building Energy Simulation*, o Domus [12], e um programa de CFD – Computational Fluid Dynamics, o Ansys-CFX. Analisam-se então, os desempenhos das paredes com o bloco original e com o bloco proposto aplicadas em ambientes de teste que permitem simular as paredes em condições dinâmicas, confirmando a superioridade do desempenho do novo bloco proposto. Em seguida, aumenta-se progressivamente a complexidade da análise – indo de um modelo de 2 blocos superpostos a um modelo de parede ventilada com assimetria de radiação de onda curta, conforme detalhes apresentados no capítulo de metodologia. O acoplamento dos dois programas proporciona uma análise tridimensional refinada e mais realista dos fenômenos no interior na parede e das cavidades de seus elementos construtivos. Nas simulações, monitoram-se na parede os fluxos de calor instantâneo e integrado, temperaturas de superfícies, bem como atividades de radiação e convecção no interior das cavidades.

O desenvolvimento do método de acoplamento entre os programas Domus e Ansys faz parte do presente trabalho. A metodologia apresentada mostra-se promissora para aumento de precisão em análises de impacto de novos elementos construtivos, pois, o método de simulação acoplada oferece maior precisão nas análises de transferência de calor através das paredes analisadas.

Portanto, com a nova metodologia buscam-se dois objetivos com as simulações transientes:

- i) Estudar os ganhos em precisão de resultados adicionando-se o detalhamento físico e matemático no interior da parede; e
- ii) Investigar a melhoria de desempenho que o bloco de concreto aprimorado proporciona.



Figura 1.1 – Bloco de Concreto estudado [8].

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E ASPECTOS TEÓRICOS

Nesta seção, apresenta-se uma revisão de trabalhos científicos que objetivam o aprimoramento de desempenho térmico tanto de blocos de concreto como de tijolos, pois ambos têm funções e formas semelhantes e podem ser aprimorados quanto ao desempenho térmico. Além disso, os fenômenos de transferência de calor envolvidos são semelhantes e, portanto, as técnicas aplicadas e as conclusões alcançadas em trabalhos aplicados a tijolos também podem ser úteis para aplicações de aprimoramento de blocos de concreto.

Anderson [14], em 1981, utilizou o método de cálculo baseado na área proporcional que divide o tijolo ou bloco em faixas paralelas na seção e executa o balanço de energia para cálculo do fluxo de calor em cada uma destas faixas, levando-se em conta apenas condução nos espaços vazios e condução no material sólido. Anderson apresentou uma inovação no método considerando que há condução 2-D na seção, particularmente no material sólido em torno dos furos onde o fluxo de calor tende a “desviar” os furos devido a maior resistência térmica. Assim, segundo o autor, o método que antes subestimava os valores do coeficiente global de transferência de calor agora estaria aprimorado.

Lorente *et al.* [15], em 1996, desenvolveram um método analítico simplificado para a previsão da transferência de calor em tijolos com cavidades verticais com uma cavidade ou mais cavidades alinhadas. Seu método analítico é baseado no método de Karman-Polhausen's para a convecção e no método da radiosidade para o calor transferido por radiação. Seus experimentos utilizaram diferentes temperaturas em duas faces ativas. Todas as outras faces foram iso-

ladas para se tornarem adiabáticas. A diferença de temperatura entre as faces fria e quente variou entre 3 e 30 K, obtidas somente medições em regime permanente. Um conjunto de 28 termopares foi instalado dentro da cavidade para obtenção de perfis de temperatura no seu interior e para dar suporte à criação das correlações propostas. Duas importantes conclusões são apontadas após os ensaios: observou-se simetria no perfil de temperatura do centro de Lx para os dois lados em toda a altura da cavidade; concluiu-se também que pode-se considerar o problema como predominante bidimensional (nas direções x e z). Desta forma, apresentam um método de cálculo validado experimentalmente. Através do método apresentado estimaram-se as temperaturas das faces internas da cavidade e os campos de temperatura e velocidade do ar, em seguida podem-se calcular os fluxos de calor convectivo, radiativo e condutivo. Os maiores erros encontrados entre os cálculos analíticos e as medições foram da ordem de 10%. Enfim os autores apresentam um método analítico e numérico para calcular o fluxo de calor e a resistência térmica em tijolos com diversas cavidades retangulares alinhadas.

Lorente *et al.* [16], em 1998, estudaram quatro configurações de tijolos de argila com furos verticais e com dimensões externas de 45 (largura) x 20 (profundidade) x 25 (altura), em cm. Também variaram as dimensões das cavidades a medida que variaram o número de cavidades, mantendo as três dimensões externas do tijolo constantes. Em apenas um tijolo, foram impostas temperaturas diferentes nas faces externas maiores opostas, com diferenças de temperatura entre 10K e 55K, afim de avaliar a variação da condutividade equivalente em função da diferença de temperatura. Como primeiro resultado observou-se variação da condutividade equivalente com a variação da diferença de temperatura entre as faces opostas onde o aumento da diferença de temperatura decresce a condutividade equivalente em magnitudes que

extrapolam 20% de variação. Encontraram-se grandes melhorias nos valores de condutividade equivalente. Por exemplo, encontraram uma diferença de 47% na condutividade entre os tijolos com 25 (5 x 5) e 10 (5 x 2) cavidades.

Al-Hazmy [17], em 2006, trabalhou para simular a taxa de transferência de calor através de um modelo de tijolo de 19cm de altura por 19cm de largura e 5cm de profundidade com três idênticas cavidades quadrangulares distribuídas na altura com seção de 5cm por 5cm cada. O autor avaliou mais três configurações: i) o tijolo com cavidades; ii) com barras de poliuretano expandido (PUR) nas cavidades; e iii) o mesmo tijolo com barras de poliuretano expandido revestindo internamente às cavidades com PUR mas mantendo vazios de ar. O autor considerou somente troca de calor por condução e convecção internamente às cavidades e cita que a utilização das barras de poliuretano expandido é comum na Arábia Saudita. Utilizou o código de volumes finitos FLUENT para a solução e como resultado principal encontrou redução de 25% na transferência de calor com as barras maciças de PUR realizando-se análises transientes com a temperatura ambiente variando periodicamente.

Díaz *et al.* [18], em 2006, aplicaram o método de elementos finitos para comparar cinco tipos de blocos de concreto leve utilizados no mercado espanhol. Concluíram que o método reproduz com precisão os mecanismos de transferência de calor em paredes. Comparam os diferentes modelos de blocos através de duas características principais, o coeficiente de condutividade térmica equivalente e a eficiência térmica mássica que é definida pela resistência térmica equivalente dividida pela massa, mostrando-se um interessante parâmetro para analisar blocos e tijolos visando-se economia e desempenho.

Li *et al.* [19], em 2008, buscaram encontrar uma configuração ótima de número de furos verticais e retangulares em tijolos de barro medindo 290 x 140 x 90mm, com o objetivo de encontrar a menor taxa de transferência de calor

através da parede, representada pelo menor valor de condutividade térmica da parede, λ_{eq} . Não fixaram a fração de vazio. Realizaram simulações numéricas com um código de volumes finitos 3-D considerando-se condução no material sólido e ainda convecção e radiação internamente nos furos. As análises foram feitas em regime permanente. O domínio de estudo considerou uma pequena estrutura de parede formada com quatro tijolos unidos com argamassa. Dois lados da parede, interno e externo, receberam as condições de contorno e as outras quatro faces foram configuradas como adiabáticas. Como condição de contorno em ambos os lados foi criada uma camada de ar com temperatura e coeficientes de transferência de calor prescritos. Concluem a importância de levarmos em conta a radiação internamente aos furos, pois, encontraram diferenças de até 25,8% nos valores de condutividade quando não se considerava a radiação. A configuração ótima encontrada para o tijolo é com oito furos na largura e quatro furos na profundidade, onde encontraram o valor de 0,400 W/(m K) para ETC. Para este caso, se não for considerada a radiação, o valor da condutividade resulta em 0,350 W/(m K), uma diferença de 12,5%. Os valores de ETC encontrados variam entre 0,400 e 0,905 W/(mK). Nota-se que a melhor configuração encontrada possui 32 cavidades. Nota-se também que existe uma fração de vazio ótima.

Sun e Fang [20], em 2009, avaliaram o desempenho de blocos de concreto do mercado chinês com dimensões externas de 240 (L) x 115 (P) x 90 (A) mm, utilizando-se do software comercial FLUENT®, para simularem 71 diferentes configurações de formatos variando-se o número de cavidades de um até sessenta e quatro. O domínio de simulação englobava somente um bloco, sem aplicação de argamassa, onde duas faces com transferência de calor e outras quatro adiabáticas. Como condições de contorno, utilizaram temperaturas pré-definidas nos dois lados opostos da parede, simulando ambientes interno e

externo de uma edificação com temperaturas de 18,0 e -3,4°C, respectivamente. As temperaturas foram escolhidas com base na norma chinesa para projeto de Aquecimento, Ventilação e Condicionamento de Ar – GB50019-2003. A configuração de menor condutividade equivalente possui oito cavidades sendo uma cavidade na largura e oito na profundidade, tendo 0.34277 W/(m K) que é 24,29% da condutividade do concreto sólido 1,40 W/(m K). Nos resultados, notou-se que a parcela transferida de calor por radiação é significativa, variando entre 7,41 e 25,39%. Analisando-se o efeito da convecção natural interna nas cavidades notou-se que sua influência na transferência de calor é também significativa para configurações com poucas cavidades, chegando a 22,50%. Nas configurações com mais de 5 (cinco) cavidades a parcela de calor transferida por convecção não ultrapassa 0,67%. Também estudaram a influência do desalinhamento das cavidades comparativamente às configurações com cavidades alinhadas. Alcançaram-se maiores resistências térmicas com o desalinhamento das cavidades.

Na seção de resultados, relatam relação entre a razão de aspecto definida pela profundidade da cavidade dividida pela altura da cavidade e informam um valor igual a 0.28 como sendo um divisor de comportamento desde que se maior que 0.28 a convecção natural interna tem efeitos consideráveis na transferência de calor e se menor que 0.28, a convecção é desprezível e a transferência de calor no interior das cavidades ocorre por condução. O presente trabalho mostra que esta conclusão não representa a aplicação real dos blocos de concreto quando a argamassa aplicada não preenche todas as áreas da base e do topo do bloco de concreto. Na montagem de paredes brasileiras com blocos de concreto, a argamassa é aplicada nas extremidades. Sendo assim o ar das cavidades de um bloco se comunica com cavidades dos blocos adjacentes, formando cavidades esbeltas com câmaras que às conectam em todas as junções inter blocos e desta maneira a velocidade do ar internamente às cavidades se intensifica.

Sun *et al.* [21], em 2010, utilizaram algoritmo genético juntamente com a análise 3-D de elementos finitos para otimizar o mesmo modelo de bloco de concreto do trabalho anterior mas fixando-se o número de cavidades em quatro. O resultado nitidamente tende para uma única cavidade no comprimento do bloco.

Svoboda and Kubr [22], em 2010, realizam simulações numéricas para avaliar a condutividade equivalente de tijolos na direção vertical, tanto no sentido ascendente quanto descendente. O primeiro importante objetivo do trabalho é de comparar as condutividades térmicas equivalentes da direção vertical com a direção horizontal mostrando que se diferem bastante. O segundo principal objetivo foi de comparar as transferências de calor nos sentidos ascendente e descendente para a direção vertical. Para tijolos comuns o domínio simulado conta com um tijolo e a metade da camada de argamassa. As bordas consideradas adiabáticas e as superfícies ortogonais ao sentido do fluxo de calor trocam calor com uma camada de ar com temperatura definida. A eficiência térmica do tijolo também é representada pela condutividade térmica equivalente, λ_{eq} . Esta quantidade expressa o valor resultante de toda a parede, incluindo os tijolos, argamassa e ar e engloba a condução, a convecção e a radiação nas cavidades.

Santos *et al.* [23], em 2017, apresentam um estudo de um modelo de bloco de concreto utilizado no Brasil, que se difere do estudado no presente trabalho devido a uma das dimensões e também por ser um modelo de bloco não-estrutural, com 2 grandes cavidades e, portanto, maior fração de vazio. Utilizam o Ansys-Fluent® para as análises, considerando regime permanente e comparando resultados 3-D com resultados 2-D. Como metodologia, utilizam apenas um bloco, com temperaturas fixadas e uniformes nas superfícies opostas, sem argamassa de assentamento, não representando o método normalizado de ensaio [48]. Estudam 8 diferentes configurações de cavidades e apontam como

melhor solução um bloco com 12 cavidades, sendo 4 cavidades no comprimento e três na profundidade.

Dentre os trabalhos citados, observam-se cinco trabalhos de aprimoramento de um modelo de bloco de concreto ou de um tijolo de argila com objetivo de reduzir a condutividade térmica equivalente ou aumentar a resistência térmica equivalente. Dois deles estudam um elevado número de configurações [19,20], mas comparando-se os dois notam-se resultados divergentes, pois, para [19] a melhor solução é o uso de 8 cavidades na largura e 4 cavidades ao longo da profundidade. Já em [20], chega-se a melhor configuração com 8 cavidades na profundidade e 1 na largura. Sabe-se que em [19], pesquisa-se um tijolo de argila que possui condutividade térmica bastante inferior à condutividade térmica do concreto, o que pode ser um fator importante para tal resultado, pois as parcelas de trocas térmicas através das cavidades tornam-se mais evidentes. Além disso, há diferenças importantes na metodologia utilizada. Em [19], o domínio sob análise considera uma montagem com quatro elementos com aplicação de argamassa. Já em [20], apenas um bloco de concreto é analisado, sem argamassa.

O aumento da resistência térmica das paredes externas do edifício é uma abordagem tradicional para redução das perdas de calor, porém deve-se também analisar o comportamento dinâmico do envoltório de uma edificação, pois, a massa térmica de uma edificação e as variações do clima não permitem o estabelecimento de regime permanente, sendo, portanto, fundamental a análise em regime transiente. O comportamento real envolve diferenças de inércia térmica, diferenças de difusividade térmica no interior dos elementos ao atravessar cavidades e os efeitos da variação de temperaturas nos fenômenos de convecção e radiação no interior das cavidades.

Com este pensamento, Arendt *et al.* [9], em 2011, realizaram um trabalho de aprimoramento de um modelo de tijolo de argila com cavidades losangulares variando-se a quantidade de cavidades. Na sua metodologia, avaliam diferentes configurações de tijolos para obterem o aumento da resistência térmica do tijolo sob análise em regime permanente, bem como realizam avaliações da dinâmica de edifícios analisando-se parâmetros como a inércia térmica e a difusividade térmica.

Tratando-se de trabalhos que realizaram análises dinâmicas de alterações propostas nas paredes, destacam-se dois, primeiramente o trabalho de Asan [10], em 2000, também o trabalho de Aste *et al.* [11], em 2009.

Asan [10] investiga o melhor posicionamento de camadas de isolante em uma parede de alvenaria levando-se em conta o máximo atraso térmico e mínimo fator de decréscimo da amplitude térmica do ambiente interno. Analisam 6 diferentes posicionamentos de duas camadas de isolantes e encontram grande variação dos parâmetros avaliados para os 6 casos estudados.

Aste *et al.* [11] em 2009 analisam dinamicamente uma edificação teste onde além de efeitos das diferenças de transmitância térmica, os efeitos da inércia térmica são avaliados através das demandas de consumo elétrico de equipamentos de HVAC. Foram analisadas 6 configurações de paredes onde alteraram-se as propriedades que afetam a inércia térmica e o fator de decréscimo da amplitude térmica. Os resultados mostram diferenças de até 21% de demanda de consumo de energia mas apontam que os efeitos da diferença de inércia térmica em uma parede podem ser desprezíveis em alguns casos. Vale ressaltar que nos seus 6 casos a capacidade térmica da parede foi variada de 53 a 482kg/m².

Entretanto, o presente trabalho visa contribuir por meio de um método de análise detalhada onde o domínio da parede está integrado à edificação através

do acoplamento entre um software de BES – *Building Energy Simulation* e um software de CFD. Este tipo de análise não foi encontrada na literatura e pode demonstrar quão importante pode ser a inclusão da dinâmica do interior da parede quando se aplica uma simulação energética e dinâmica de um edifício.

Para tanto, utiliza-se o software de CFD para o detalhamento do interior da parede, com o interior das cavidades do bloco de concreto (ou do tijolo) modeladas, ou seja, com o campo de velocidades e as trocas de calor no interior das cavidades sendo calculadas e atualizadas durante toda a trajetória transiente de uma análise dinâmica. Como mencionado, aparentemente não há trabalhos publicados com este tema, mas encontram-se trabalhos de desenvolvimento e validação experimental de metodologia de acoplamento entre esses dois tipos de modelagem desde 1998, como o trabalho de Negrão [24] e com o passar dos anos destacam-se Zhai e Chen [25, 26, 27 e 28], Bartak *et al.* [29], Djunaedy *et al.* [30] e Wang e Wong [31]. A integração entre estes dois tipos de software mostra-se interessante, pois, se completam. Para [30], os softwares de CFD, se utilizados para simulação de edificações, possuem limitações nas condições de contorno, como por exemplo, na falta de climas externos e por não possuírem rotinas para aplicação dos sistemas de serviços de um edifício. Já os softwares de BES consideram o ar interno e o ar externo como meios homogêneos para definição das temperaturas e dos coeficientes de convecção do ar, não representando a dinâmica do fluxo de ar próximo às superfícies.

Djunaedy *et al.* apontam dois caminhos para realizar o acoplamento entre as rotinas, a integração interna e a integração externa. O primeiro refere-se à implementação de um módulo dentro do programa de BES para modelar e resolver as equações de governantes de quantidade de movimento, continuidade e transporte de escalares a fim de alcançar a simulação de CFD dentro do ambiente interno. Este é o método utilizado por [24] quando implementa um

módulo no software de BES, chamado ESP-r e que após alguns anos, é aprimorado por [29]. O segundo caminho, chamado de integração externa, estudado e recomendado pelos demais trabalhos, sugere o uso de dois programas já desenvolvidos, tendo-se a necessidade de uma metodologia para haver a comunicação e troca de dados entre eles. Os dois programas seguem com simulações em paralelo, trocando dados, onde as informações de saída de um são variáveis de entrada do outro.

Para estudo das potencialidades do acoplamento, estudos de casos são configurados indo de um modelo de 2 blocos superpostos a um modelo de parede ventilada com assimetria de radiação de onda curta.

A seguir, no Capítulo 3, descrevem-se a metodologia utilizada para o trabalho de aprimoramento do desempenho térmico do bloco de concreto (Seção 3.2) e também para o trabalho de acoplamento, bem como os casos estudados com o acoplamento (Seção 3.3). O Capítulo 4 mostra e discute os resultados do aprimoramento do bloco de concreto e o Capítulo 5, os resultados do trabalho realizado com o método de simulação acoplada. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões finais do trabalho.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo apresenta-se a metodologia dos estudos desenvolvidos. Primeiramente, a Seção 3.1 expõe detalhes teóricos do Domus para introduzir conceitos que auxiliam a escolha o demais pontos da metodologia. A Seção 3.2, é dedicada ao objetivo de redução drástica da condutividade térmica do bloco de concreto por meio do estudo de diferentes configurações geométricas e simulação em regime permanente por meio do software CFD. Essa modelagem em regime permanente é verificada por meio de comparação com dados experimentais. A Seção 3.3, detalha o trabalho de acoplamento entre os softwares de BES e CFD, que tem como objetivo duas descobertas: i) estudar os ganhos em precisão de resultados com a simulação transiente adicionando-se o detalhamento do interior da parede; e ii) investigar a melhoria de desempenho que o bloco de concreto aprimorado proporciona, com o uso de uma análise dinâmica de uma edificação sob influência de condições climáticas variáveis dentro de 24 horas.

3.1 Domus

O programa de *Building Energy Simulation* utilizado no presente trabalho é o Domus [12], desenvolvido no Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR. O Domus é um software habilitado para realizar análise termoenergética de edificações, oferecendo aos profissionais da área e a alunos pesquisadores uma

ferramenta de grande importância para o projeto de edificações. Oferece aos usuários recursos para o desenho da edificação projetada, escolha dos materiais a serem aplicados em todo o envoltório e paredes interiores, configuração de equipamentos de climatização, das atividades dos ocupantes e do clima da cidade de construção. Possui ainda robustez de modelos físicos e métodos numéricos para então simular termo energeticamente todas as zonas do edifício ao longo de todas as estações do ano durante o uso do edifícios pelos ocupantes. O Domus ainda pode ser utilizado para análise do edifício quanto ao atendimento aos requisitos de classificação energética com a inclusão de equipamentos de HVAC.

No entanto, o modelo das paredes é 1-D e puramente difusivo o que o limita para casos mais complexos como o de elementos vazados, sobretudo quando o fenômeno multidimensional de transferência de calor em seus 3 modos fazem-se presentes. A Figura 3.1 ilustra a simplificação utilizada no Domus onde três propriedades termofísicas identificam o material: calor específico, massa específica e condutividade térmica equivalente. Adicionalmente, a largura, L , de cada camada, deve ser especificada. No caso dos elementos construtivos que contém cavidades, as propriedades equivalentes representam o elemento construtivo tornando-os homogêneos e contínuos. As propriedades equivalentes de cada elemento a serem introduzidas em programas como o Domus, se obtidas de modo correto, são determinadas por três diferentes métodos: i) ensaios normalizados em laboratório, como realizado em [32] ii) cálculos normalizados que utilizam o método de seções proporcionais, como sugere a norma [5]; e iii) simulações numéricas em softwares de CFD como utilizado em [19 e 22].

Neste momento pretende-se introduzir o conceito de três classes de usuários deste tipo de programa:

- i) Usuário Básico: este usuário utiliza os dados da biblioteca do software ou fontes na internet e literatura para escolher as propriedades termofísicas equivalentes de cada material ou elemento, por exemplo, a condutividade equivalente do bloco de concreto;
- ii) Usuário Profissional: este indivíduo calcula as propriedades equivalentes dos elementos que compõe seu projeto de acordo com as normas vigentes, por exemplo, a NBR 15220 [5].
- iii) Usuário Avançado: utiliza métodos mais avançados e verificados, mas um tanto longe do comportamento real, como os softwares de CFD para modelar e calcular as propriedades equivalentes dos elementos ou conjuntos mais complexos que utiliza em seu projeto.

Cada classe de usuário acima irá obter resultados diferentes devido aos cuidados que tiveram na obtenção das propriedades. Alguns resultados apresentados no Capítulo 5 estão relacionados a uma classe de usuário acima.

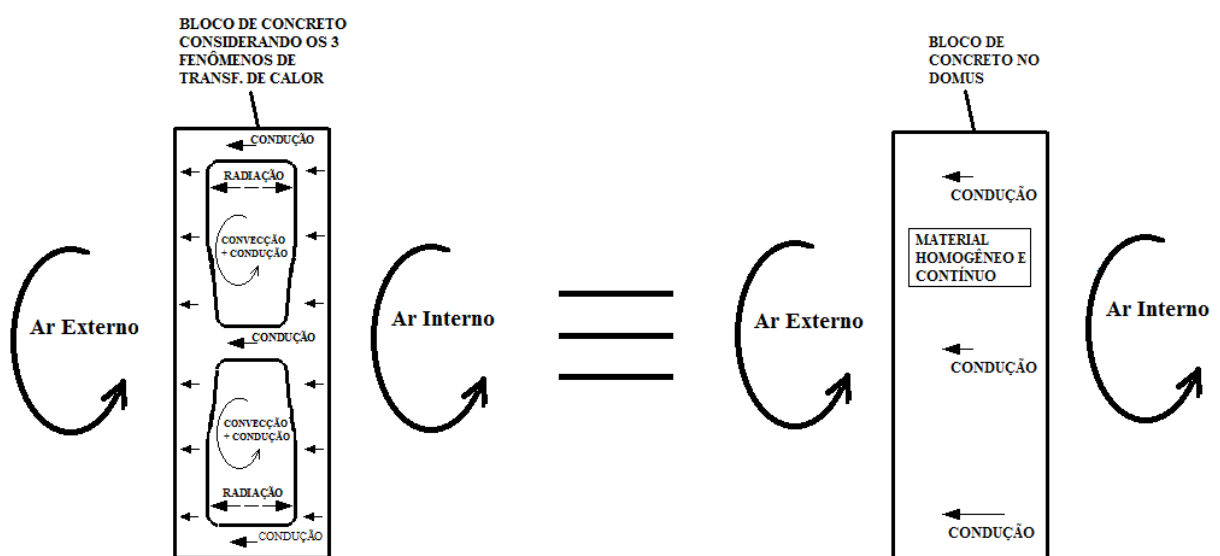


Figura 3.1 – Modelagem tradicional de elementos com cavidades.

A Tabela 3.1 apresenta os valores de propriedades utilizadas na configuração, por cada usuário citado, no programa Domus:

Tabela 3.1 – Propriedades equivalentes para configuração dos blocos no BES.

PROPRIEDADE	ρ_{eq} [kg m ⁻³]	λ_{eq} [W(mK) ⁻¹]	c_{eq} [J(kgK) ⁻¹]
Bloco de mercado – Usuário Avançado	1348,1	0,906	873,1
Bloco de mercado – Usuário Básico	1063,1	0,461	741,5
Bloco Aprimorado P#27 – Usuário Avançado	1348,1	0,498	873,1
Bloco Aprimorado P#27 – Us. Profissional *	1348,1	0,304	873,1

Ainda no Domus, para cálculo da temperatura interna dos ambientes em cada instante, é considerada uma formulação global em cada zona modelada da construção. A Equação 3.1 descreve o balanço de energia para uma zona submetida a cargas térmicas por condução, convecção, radiação de onda curta, radiação de onda longa entre superfícies, mudança de fase, infiltração, ventilação, de sistemas de climatização e de cargas geradas internamente pelas pessoas ou por atividades por elas exercidas.

$$\dot{E}_t + \dot{E}_g = \rho_a c_{pa} V_a \frac{dT_{int}}{dt} \quad (3.1)$$

onde:

\dot{E}_t fluxo de energia que atravessa o volume de controle, em W

\dot{E}_g taxa de geração de energia interna, em W

ρ_a densidade do ar, em kg/m³

c_{pa}	calor específico do ar, em J/(kg K)
V_a	volume de ar interno da sala, em m ³
ρ_a	densidade do ar, em kg/m ³
T_{int}	Temperatura do ar da sala, em °C

O termo \dot{E}_t na equação da conservação de energia inclui cargas térmicas associadas às transferências de calor através das paredes da construção, abrangendo insolação, ventilação por aberturas, infiltração de ar através de frestas. O termo \dot{E}_g abrange o calor gerado por ocupantes, equipamentos e eletrodomésticos. O fluxo total de calor por condução que atravessa a superfície de controle de cada zona está descrito por Mendes *et al.* [12]. Através da Equação 3.1 determina-se a temperatura da sala ao final de cada passo de tempo, descrevendo o comportamento do ambiente na trajetória transiente sob estudo.

O Domus está capacitado a resolver problemas de transferência combinada de calor e umidade através das paredes porosas de cada zona. Mendes *et al.* [33], em 2002, discretizaram as equações de conservação utilizando o método de formulação de volume de controle com um esquema de diferenças centradas e a diferença de concentração de vapor foi linearizada nas superfícies em termos de diferença de concentração de umidade. As equações algébricas resultantes foram resolvidas utilizando o algoritmo MTDMA (MultiTriDiagonal-Matrix Algorithm) como descrito por [33]. Mas as análises realizadas neste trabalho consideram apenas transferência de calor através das paredes dos ambientes estudados, tornando-se importantes somente os balanços de energia.

O programa oferece ao usuário um ambiente de desenho com visualização tridimensional onde se deve desenhar a edificação que se pretende modelar. A

Figura 3.2 mostra ambientes do Domus com edificações modeladas. Condições climáticas externas ao edifício e internas de cada zona devem ser configuradas. Equipamentos de climatização podem ser instalados nas zonas, há uma biblioteca de condicionadores de ar. A integração do modelo do condicionador de ar com o ambiente construído é feita inserindo-se a capacidade de refrigeração total (C_S) no segundo termo do lado esquerdo da equação da conservação de energia ao volume de controle da sala da Equação 3.1. As capacidades de refrigeração sensível e latente do condicionador de ar, bem como seu consumo de energia, são calculados por modelos, alguns deles desenvolvidos em [34], sendo funções das temperaturas e umidades ambientes e, portanto, resultando em valores próximos aos reais.

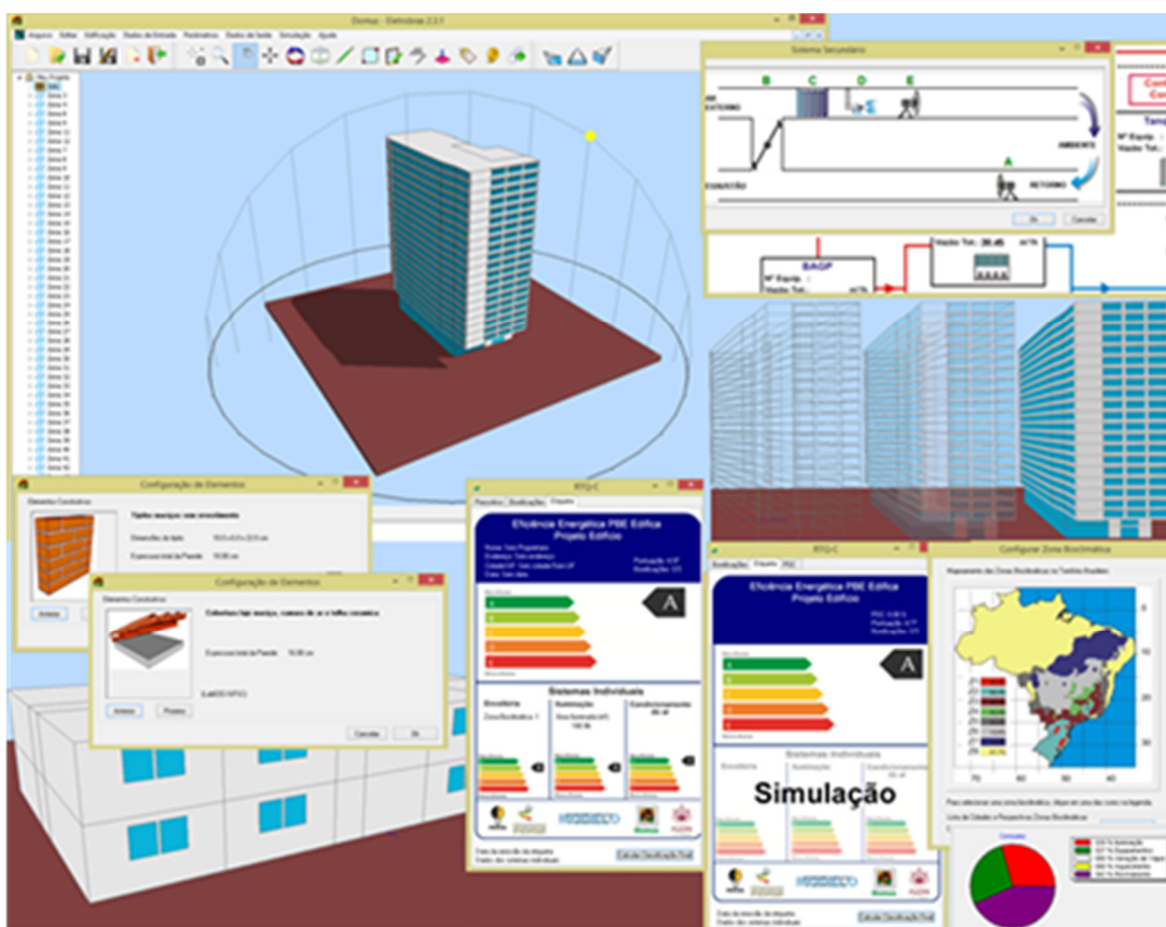


Figura 3.2 – Ambiente do Domus.

A Figura 3.3 mostra a janela de seleção de materiais de uma parede no Domus onde o usuário seleciona as camadas que compõem a parede da superfície externa à interna. No caso exposto tem-se o reboco, o bloco de concreto e reboco novamente.

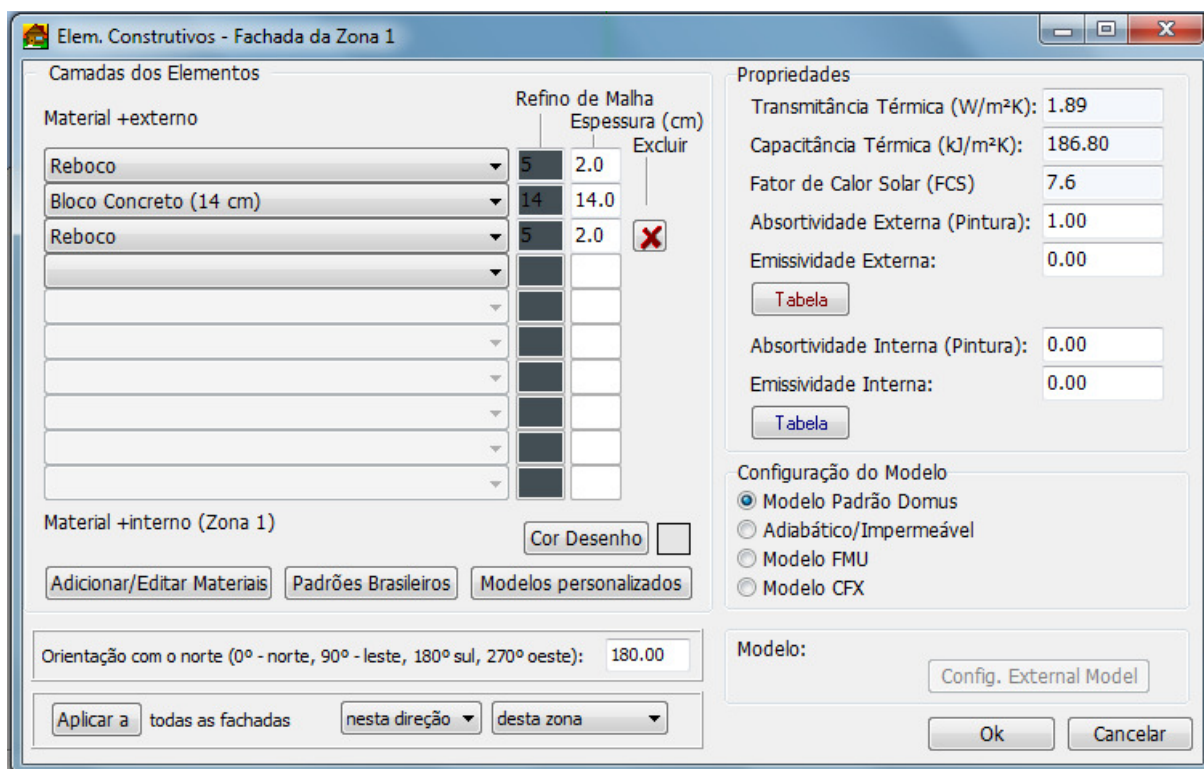


Figura 3.3 – Seleção de materiais da parede no Domus.

O Domus, portanto, foi utilizado no trabalho que será exposto a seguir, na seção 3.3, para análises na escala da edificação.

3.2 Aperfeiçoamento do desempenho térmico do Bloco de Concreto

Busca-se o aprimoramento do bloco de concreto mais comum no mercado brasileiro através da investigação da condutividade térmica equivalente de 18 configurações diferentes. A ETC é uma propriedade que deve representar a todos os fenômenos de transferência de calor que ocorrem internamente ao elemento de construção e que retrata o bloco como se fosse homogêneo em todo seu volume interno.

3.2.1 Geometria e propriedades dos materiais

A geometria do bloco de mercado está apresentada na Figura 3.4a. Nota-se que possui duas grandes cavidades e suas dimensões externas são 390 x 140 x 190mm. O modelo computacional construído contempla um conjunto de dois blocos sobrepostos com a aplicação de argamassa, formando uma amostra da parede sem revestimentos internos ou externos, como mostrado pela Figura 3.4b. Uma análise comparativa do efeito do número de blocos posicionados um sobre o outro é realizado conforme apresentado na Seção 4.3. A espessura da argamassa que separa dois blocos é de 10mm em acordo com a espessura de argamassa normalizada [35]. As novas propostas mantêm as dimensões externas fixas, todas com dois blocos e argamassa aplicada. As propriedades do concreto, da argamassa e do ar também são mantidas constantes e iguais aos valores apresentados na Tabela 3.2. Somente a densidade do ar é assumida como

variável dependente da sua temperatura de acordo com o modelo de Boussinesq [36], para representar as forças de empuxo.

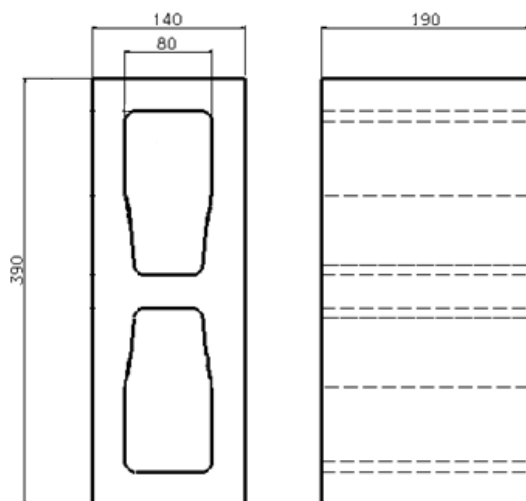


Figura 3.4a – Dimensões.

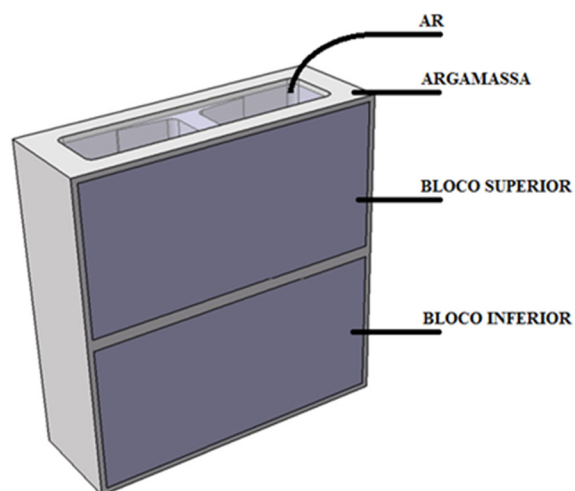


Figura 3.4b – Domínios modelados.

Figura 3.4 – Dimensões do bloco de mercado e domínios modelados [5].

Tabela 3.2 – Propriedades termofísicas.

PROPRIEDADE	AR	CONCRETO	ARGAMASSA
Emissividade (ϵ)	-	0,85	0,94
Absortividade (α)	0,01	0,75	0,75
Massa específica (ρ) [kg m^{-3}]	1185	2300	1860
Condutividade térmica (λ) [W(mK)^{-1}]	2,61e-2	1,67	0,72
Calor específico (c_p) [J(kg K)^{-1}]	1004,4	880	780
Coef. volum. de expans. térmica (β) [K^{-1}]	0,003356	-	-
Viscosidade [kg (m s)^{-1}]	1,831e-5	-	-

3.2.2 Modelagem física e matemática

Este estudo faz uso do programa Ansys-CFX® para o alcance dos objetivos. Este software de CFD provê recursos para criação de malha para a técnica de volumes finitos, discretização das equações de transferência de calor e mecânica dos fluidos, recursos para uma resolução robusta do sistema de equações, e fácil pós-processamento. O Apêndice A apresenta o método de volumes finitos e de discretização das equações governantes utilizadas no Ansys-CFX.

Desta forma, com o uso do CFD, a parede é modelada de uma maneira mais detalhada, levando-se em conta o detalhamento do interior de seus elementos que possuem cavidades. Considera-se a condução de calor nos materiais sólidos e no interior das cavidades o campo de velocidades do ar é calculado, levando-se em conta os fenômenos de condução e convecção no ar e a troca de calor por radiação por onda longa entre superfícies, como ilustrado na Figura 3.1.

A modelagem tridimensional é realizada, pois a tridimensionalidade do problema pode ser evidenciada nos resultados. As seguintes hipóteses são consideradas:

- i) A transferência de calor ocorre por condução na argamassa e no concreto. No ar interno às cavidades, a transferência de calor ocorre pelos fenômenos de condução, convecção e radiação;
- ii) Regime permanente;
- iii) Ar no interior das cavidades é incompressível;
- iv) As propriedades dos materiais e do ar são consideradas constantes a 25°C, exceto a densidade, que é utilizada a aproximação de Boussinesq;

- v) Transferências de calor convectivas nas faces quente e fria;
- vi) Não há radiação incidindo nas faces quente e fria;
- vii) Os coeficientes de convecção utilizados são de 23,26W/(m²K) para o ambiente externo e 8,72W/(m²K) para o ambiente interno, estão de acordo com a prática de análises estudadas no assunto. São muito próximos aos valores indicados pela norma NBR 15520 – Parte 2, que indica valores de Resistência térmica superficiais interna e externa de 0,13(m²K)/W e 0,04(m²K)/W para superfícies verticais, o que resulta em coeficientes com valores próximos de 8,0W/(m²K) e 25,0W/(m²K). Também próximos aos recomendados pela ISO 6946 [13].
- viii) O modelo de turbulência escolhido foi o *k-ômega* devido sua indicação a baixos números de Reynolds e suas vantagens em escoamentos próximos a paredes [37, 38, 39 e 40].
- ix) A radiação é considerada internamente às cavidades e o ar é um meio não participante. As superfícies internas das cavidades são cinza e difusivas, a emissividade do concreto tem valor assumido para trocas radiativas entre superfícies internas às cavidades.
- x) A condutividade térmica equivalente pode ser calculada após alcançado o regime permanente, utilizando-se a Equação 3.2.

$$\lambda_{eq} = \frac{L}{\frac{A \Delta T}{\dot{q}} - \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}} \right)} \quad (3.2)$$

Onde:

A - corresponde à área frontal de dois blocos somadas à área frontal da argamassa;

\dot{q} - é o valor médio dos fluxos de calor nas superfícies internas e externas;

ΔT - diferença de temperatura do ar dos ambientes interno e externo;

h_{int} – coeficiente de convecção do ar do lado interno;

h_{ext} - coeficiente de convecção do ar do lado externo;

L – profundidade da parede que é igual à do bloco de concreto.

Importante esclarecer a coerência da Equação 3.2, portanto mostra-se a seguir como esta equação foi definida. O fluxo de calor, \dot{q} , através da amostra de parede apresentada na Figura 3.4b é dado pela Equação 3.3:

$$\dot{q} = U A (T_{ext} - T_{int}) \quad (3.3)$$

sendo que:

- U é o coeficiente global de transferência de calor e pode ser definido como o inverso da resistência térmica equivalente R_{eq} , expressa pela Equação 3.4;

- A é a área frontal total, somando-se as áreas frontais de dois blocos e a área frontal da argamassa, que possui 5mm de espessura em todo o contorno e 10mm de espessura entre os blocos;

- T_{ext} e T_{int} são as temperaturas dos ambientes das faces opostas, os quais denominados de ambientes interno e externo, referindo-se ao interior e ao exterior de uma edificação.

Portanto a Equação 3.4 define o coeficiente global de transferência de calor e a Equação 3.5 define a resistência térmica equivalente, R_{eq} , da área de parede sob análise.

$$U = \frac{1}{R_{eq}} \quad (3.4)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{h_{int}} + \frac{L}{\lambda_{eq}} + \frac{1}{h_{ext}} \quad (3.5)$$

Substituindo-se U na Equação 3.3 e já substituindo a resistência equivalente pela Equação 3.5, chega-se à Equação 3.6:

$$\dot{q} = \frac{A(T_{ext}-T_{int})}{\left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{L}{\lambda_{eq}} + \frac{1}{h_{ext}}\right)} \quad (3.6)$$

Rearranjando a Equação 3.6 tem-se:

$$\frac{\dot{q}}{A(T_{ext}-T_{int})} \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}}\right) + \frac{\dot{q}}{A(T_{ext}-T_{int})} \left(\frac{L}{\lambda_{eq}}\right) = 1 \quad (3.7)$$

Passando o primeiro termo para o outro lado e dividindo-se todos os termos por $\frac{\dot{q}}{A(T_{ext}-T_{int})}$, encontra-se a Equação 3.8:

$$\left(\frac{L}{\lambda_{eq}}\right) = \frac{1}{\left(\frac{\dot{q}}{A(T_{ext}-T_{int})}\right)} - \left(\frac{1}{h_{int}} + \frac{1}{h_{ext}}\right) \quad (3.8)$$

Portanto, isolando-se a condutividade térmica equivalente, chega-se à Equação 3.2 que será utilizada para cálculo da ETC em todos os casos a serem simulados. Importante lembrar que a ETC engloba todos os fenômenos de transferência de calor que ocorrem entre as faces interna e externa, mostrados na Figura 3.1.

A taxa de transferência de calor, \dot{q} , em W, é resultado de integração dos fluxos de todos os elementos de malha das faces interna ou externa dos blocos e da argamassa. A Figura 3.5 ilustra as três superfícies do ambiente externo e as faces de seus elementos de malha.

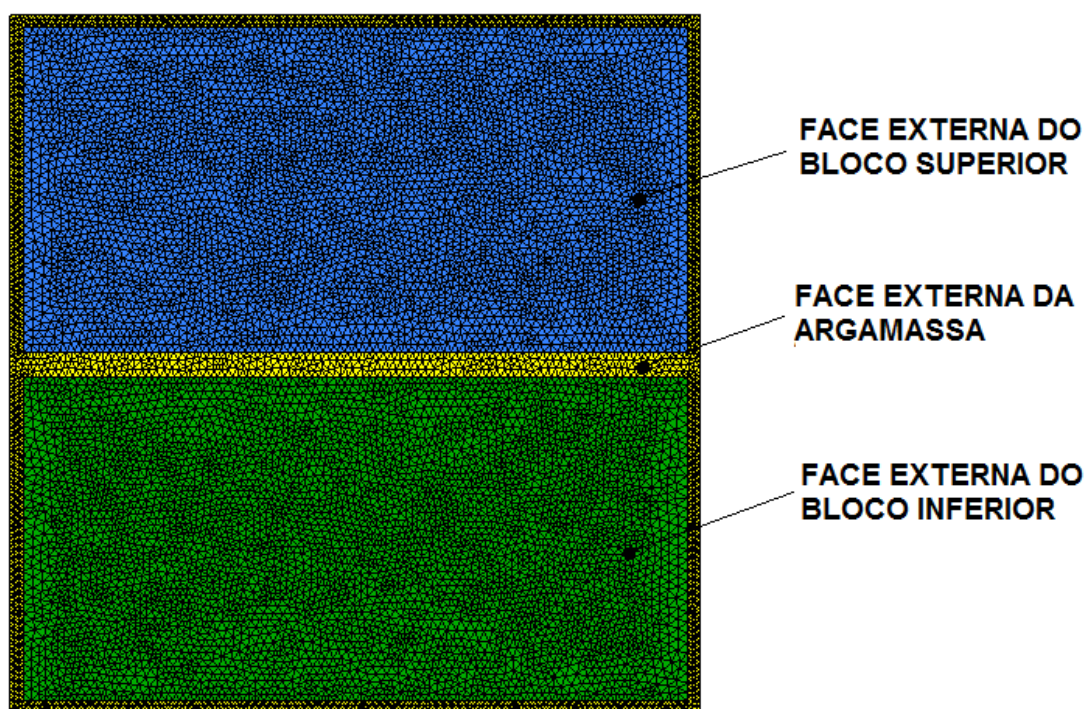


Figura 3.5 – Elementos das faces.

As equações governantes presentes no software utilizado foram preservadas conforme apresentadas abaixo. Para as regiões sólidas, a equação da condução é aplicada:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) + S \quad (3.9)$$

No domínio de ar, as equações governantes para o balanço de massa, quantidade de movimento e de energia são, respectivamente:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho U) = 0 \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U) = \nabla(\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla \tau + S \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho T) + \nabla(\rho UT) = \nabla \left(\frac{\lambda}{c_p} \nabla T \right) + S_T \quad (3.12)$$

O Apêndice A apresenta novamente as equações governantes nos formatos que o Ansys-CFX utiliza e também apresenta os modos de construção dos volumes de controle e de discretização das equações empregados no software.

3.2.3 Novas geometrias para o bloco de concreto

Novas geometrias com cavidades retangulares são estudadas. As configurações propostas mantêm a fração de vazio do bloco de concreto de mercado, calculada em 40%. Deste modo, mantém-se a massa e o custo de matéria prima para fabricação. A manutenção da fração de vazio no mesmo patamar tem também o objetivo de manter a resistência à compressão dos blocos propostos em valores próximos à do bloco original de mercado, mantendo-se a área transversal e a tensão, em MPa, que é definida pela força de compressão dividida pela área da seção transversal. Isto é importante para manter-se a função de um bloco estrutural. Analisando-se a norma NBR 6136 [35] e estudando as medidas dos blocos 15 x 40 x 20 com função estrutural, observa-se que a Fração de Vazio varia entre 40% e 46%. Já para blocos sem função estrutural os valores chegam a 64%.

A fração de vazio, F_v , é definida pela Equação 3.13.

$$F_v = \frac{\text{Volume Interno das Cavidades}}{\text{Volume Total do Bloco}} \times 100 \quad (3.13)$$

As análises dos resultados levam em conta os valores obtidos de ETC para as diferentes configurações.

3.2.4 Critérios de convergência nas simulações

A convergência é assumida através de dois critérios:

- i) Resíduo inferior a $5E-6$ para garantir elevada precisão; e
- ii) Alcançando-se o balanço de energia entre as taxas de transferências de calor, em W , das faces quente e fria, onde o critério é de convergência com resíduo inferior a $1E-3$.

3.3 Análise transiente na escala da edificação

Esta seção apresenta a metodologia de acoplamento entre um *software* de simulação energética de edificações (BES - *Building Simulation software*) e outro *software* especializado em análise numérica de transferência de calor através de sólidos e fluidos (*software* de CFD – *Computational Fluid Dynamics*), proporcionando uma abordagem mais profunda aos fenômenos envolvidos no interior das paredes em simulações termoenergéticas de edificações, através da modelagem do interior das cavidades de ar dos elementos construtivos como os blocos de concreto. As simulações ocorrem em regime transiente, levando-se em conta os fenômenos de condução nos materiais sólidos e os fenômenos de radiação e convecção no interior das cavidades.

A modelagem desenvolvida é então utilizada para a realização de quatro análises, são elas: i) verificação de ganhos de precisão em resultados do método de simulação integrada desenvolvido através de simulações de um ambiente de teste; ii) comparação do desempenho dos blocos aprimorados frente aos originais de mercado; e iii) verificação das potencialidades de ganho de precisão em análises termoenergéticas de edificações com o uso do método desenvolvido através de dois estudos de casos adicionais.

Portanto, além da metodologia de integração entre *softwares*, as seções a seguir apresentam a metodologia empregada nestas quatro análises.

3.3.1 Metodologia de acoplamento BES - CFD

A integração externa torna-se mais indicada, pois as duas ferramentas estão independentemente em contínuo desenvolvimento por décadas, tornando-se robustas e versáteis. Nos trabalhos de co-simulação encontrados, a simulação de CFD limita-se a determinação do campo de velocidades e temperatura do volume de ar do ambiente interno. Também, nestes trabalhos o CFD realiza simulações em regime permanente a cada passo de tempo para determinação dos campos de velocidade, determinar os coeficientes convectivos de transferência de calor de cada superfície interna e então as trocas convectivas de calor entre o ar interno e às paredes. O modelo de turbulência mais utilizado para o volume de ar da sala é o zero-equation pelo fato de não utilizar funções de parede para determinar a distribuição de velocidades próximas às paredes e a transferência de calor. Deste modo é possível determinar a expressão de cálculo do coeficiente de convecção em função análoga a de Reynolds, função da viscosidade do fluido, do calor específico do fluido, do número de Prandtl e da distância do primeiro nó adjacente à parede [26 e 30]. Utiliza-se o modelo *k-epsilon* em alguns trabalhos.

Portanto, buscando analisar as potencialidades do acoplamento, este trabalho apresenta uma metodologia de integração externa entre softwares de BES e CFD, buscando investigar de modo inovador a modelagem dos domínios internos às paredes através de simulações transientes em ambos os softwares. Os

ganhos em precisão de resultados, se confirmados, se somam aos encontrados nos trabalhos de acoplamento citados na revisão bibliográfica.

Simulações transientes em ambos os *softwares* ocorrem simultaneamente sob o mesmo período de tempo para transcorrerem as transferências de calor através da parede. O BES (Domus) possui um modelo dinâmico para análise do comportamento termoenergético da edificação. Nele, a transferência de calor em cada parede é calculada por diferenças finitas em análise 1-D, mas no método acoplado, os campos tridimensionais de velocidades e de temperaturas serão calculados a cada passo de tempo pelo CFD (Ansys-CFX).

Dadas às condições de contorno, o BES inicia a trajetória transiente informando-as ao CFD a cada passo de tempo. Entende-se aqui “passo de tempo” como sendo o passo de tempo definido no BES, onde geralmente usa-se de 5 a 30 minutos. O CFD por sua vez inicia o primeiro trajeto transiente dentro do período selecionado que coincide com o passo de tempo do BES. Determinados os campos de velocidade nas cavidades e os perfis finais de temperatura ao final do período na parede pelo BES, estas informações são repassadas ao BES que realiza um balanço de energia no ambiente. Portanto, ao final de cada passo de tempo, após receber os dados do perfil de temperatura da parede, o BES realiza o balanço de energia, atualiza a temperatura do ambiente simulado e retorna as novas condições de contorno interna e externa ao CFD para o novo transiente. A Figura 3.6 apresenta o Fluxograma do método de integração aplicado e a Tabela 3.3 mostra as propriedades informadas por cada programa a cada passo de tempo, desconsiderando na tabela as dimensões dos elementos que compõem a parede, como os blocos e as camadas de reboco.

Nas simulações realizadas neste trabalho, em sua maioria, o passo de tempo do BES será de 20 minutos. Já o passo de tempo escolhido no CFD para o transiente no interior da parede é de 1 minuto. Ao final do primeiro transiente de

20 minutos simulado no CFD, o arquivo de saída apresenta como resultado a temperatura média da superfície interna do reboco interno, $\bar{T}_{\text{sup,int}}$, utilizada então pelo BES para realizar um novo balanço de energia no ambiente, alterando sua temperatura caso não esteja fixada. O BES, por sua vez, atualiza o arquivo *CCL* do *Setup* do CFD com a atualização das condições de contorno interna e externa e um novo período transiente de 20 minutos se inicia. O ciclo se repete até o fim de 5 ou 6 dias, número de dias suficiente para a convergência segundo análises realizadas. A verificação da convergência no quinto ou no sexto dia foi realizada comprando-se os resultados em cada passo de tempo com o dia anterior e considera-se alcançada casos os resultados se mantêm inalterados, resíduo menor que $1\text{E-}3$. Antes de cada trajetória transiente de 20 min, uma simulação em regime permanente é realizada no CFD para atualizar o campo de velocidades do ar interno às cavidades, portanto, o campo de velocidades é atualizado e congelado para a simulação transiente de 20 minutos que atualizará os perfis de temperatura. Este procedimento de congelamento do campo de velocidades do ar, a cada 20 minutos no interior das cavidades, minimiza o tempo de processamento e mantém a precisão dos resultados conforme estudo apresentado na seção 5.3.4. O resíduo utilizado para convergência da simulação transiente no CFD é de no mínimo $1\text{E-}3$, determinado sob estudo apresentado na seção 5.3.5.

Tabela 3.3 – Dados de transferência entre programas.

<u>BES informa:</u>	
t_p	Tempo de duração da próxima simulação que é o passo de tempo do BES, em s.
t_{p-CFD}	Passo de tempo do transiente no CFD.
T	Temperatura inicial da parede, em K.
$\dot{q}_{rad,ext}$	Fluxo de calor por radiação, em W/m^2 , que chega ou deixa a superfície externa. (condição de contorno)
T_{int}	Temperatura Interna do ambiente simulado durante o passo de tempo, em K. (condição de contorno)
T_{ext}	Temperatura Externa durante o passo de tempo, em K. (condição de contorno)
h_{int}	Coefficiente de convecção interno, em W/m^2K . (condição de contorno)
h_{ext}	Coefficiente de convecção externo, em W/m^2K . (condição de contorno)
ρ_{bloco}	Densidade do material do bloco, em kg/m^3 .
c_{bloco}	Calor específico do material do bloco, em J/kgK .
λ_{bloco}	Condutividade térmica do material do bloco, em W/mK .
ρ_{arg}	Densidade do material da argamassa, em kg/m^3 .
c_{arg}	Calor específico do material da argamassa, em J/kgK .
λ_{arg}	Condutividade térmica do material da argamassa, em W/mK .
ρ_{reb}	Densidade do material do reboco, em kg/m^3 .
c_{reb}	Calor específico do material do reboco, em J/kgK .
λ_{reb}	Condutividade térmica do material do reboco, em W/mK .
<u>CFD retorna a cada passo de tempo:</u>	
$\bar{T}_{sup,int}$	Temperatura média da superfície interna da parede após finalizado o transiente no passo de tempo do BES, em K.

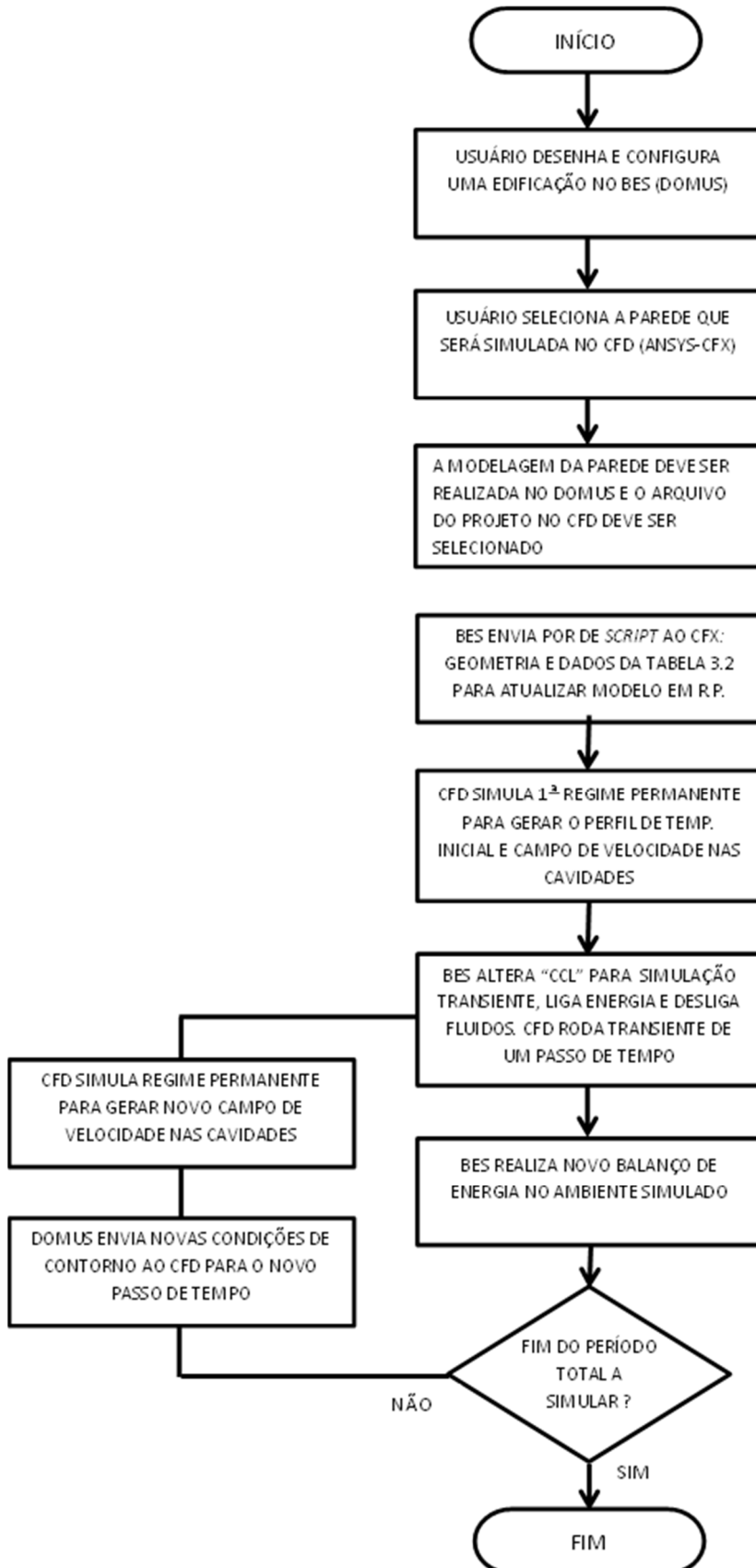


Figura 3.6 – Fluxograma do modelo de co-simulação entre Domus e Ansys.

3.3.2 Estudos de Caso para simulação integrada BES-CFD

Primeiramente é realizada a verificação do método desenvolvido simulando-se o mesmo caso no BES e no método acoplado BES-CFD, onde o ambiente da Figura 3.7 foi simulado sob mesmas condições climáticas descritas nesta seção e sob ambos os métodos, atual do Domus e método integrado. No CFD se considerou que os blocos são homogêneos com propriedades equivalentes, da mesma forma que é feito no Domus.

Em seguida, quatro casos de estudo são elaborados para o alcance dos objetivos, são eles:

- i) Caso 1: Avaliação de ganhos com a simulação acoplada BES-CFD através de simulações com paredes construídas com os blocos de concreto estudados;
- ii) Caso 2: Utilização da simulação acoplada BES-CFD para avaliação do desempenho térmico do bloco da configuração escolhida como a melhor proposta, frente ao desempenho dos blocos originais de mercado;
- iii) Caso 3: Avaliação de ganhos com a simulação acoplada BES-CFD com a inclusão de assimetria provocada pela cinemática solar; e
- iv) Caso 4: Avaliação de ganhos com a simulação acoplada BES-CFD com a inclusão de uma camada de ar ventilada à parede e assimetria provocada pela cinemática solar.

No Caso 1, uma análise comparativa da dinâmica de uma edificação tendo sua parede construída com blocos de concreto de mercado e com blocos de concreto aprimorados avaliam as mudanças nos resultados quando se detalha o

interior da parede ao realizar-se uma análise dinâmica de uma edificação. O segundo caso avalia os ganhos do aprimoramento térmico do bloco de concreto. O terceiro e o quarto caso têm condições de contorno e detalhes construtivos diferenciados para verificação da importância do detalhamento do interior da parede em determinadas situações em simulações termoenergéticas de edificações.

Todos os casos utilizam o ambiente padrão de teste apresentado na Figura 3.7, que mostra uma vista superior do ambiente onde as paredes preenchidas na cor preta são adiabáticas, portanto não se consideram suas inércias. A parede representada por blocos é a parede em análise. O ambiente de teste tem suas paredes, piso e teto adiabáticos, com exceção de uma parede, a parede em análise apontada na Figura 3.7. Este ambiente tem suas dimensões internas idênticas ao ambiente do BESTEST – ambiente de procedimento de teste que permite que os desenvolvedores de software avaliem o desempenho de suas ferramentas de simulação termoenergética de edificações [41]. O seu pé direito é de 2,7 metros, internamente à edificação. Para os 3 primeiros casos, a parede sob análise foi configurada com três camadas: reboco interno de espessura igual a 20 milímetros, camada de blocos de concreto com argamassa de assentamento e reboco externo também com espessura de 20mm, conforme Figura 3.10. No Caso 4, foi adicionada uma camada de ar ventilada do lado externo, revestida com placas cerâmicas.

Um padrão de clima é utilizado nos casos 1 e 2, onde a temperatura externa varia senoidalmente com período de 1 dia, alcançando um pico de máximo de temperatura às 18h e um pico de mínimo à 6h. A função senoidal escolhida representa um dia de inverno da região sul brasileira, apresentada na Figura 3.8. A superfície externa da parede sob análise recebe radiação, q_r , que engloba as parcelas de radiação direta e difusa. A radiação tem magnitude variável partindo de 0W a partir das 7:00 horas da manhã, alcançando pico de

498W ao meio dia e retornando a 0W às 18:00 horas da tarde, conforme ilustra a Figura 3.9. Desta forma o método de simulação padroniza as condições de contorno e assemelha-se ao comportamento natural de um dia com sol. Assim tem-se uma noite fria e um dia ensolarado, causando tendência de fluxos de calor em ambos os sentidos.

Nas próximas seções cada caso tem sua metodologia detalhada.

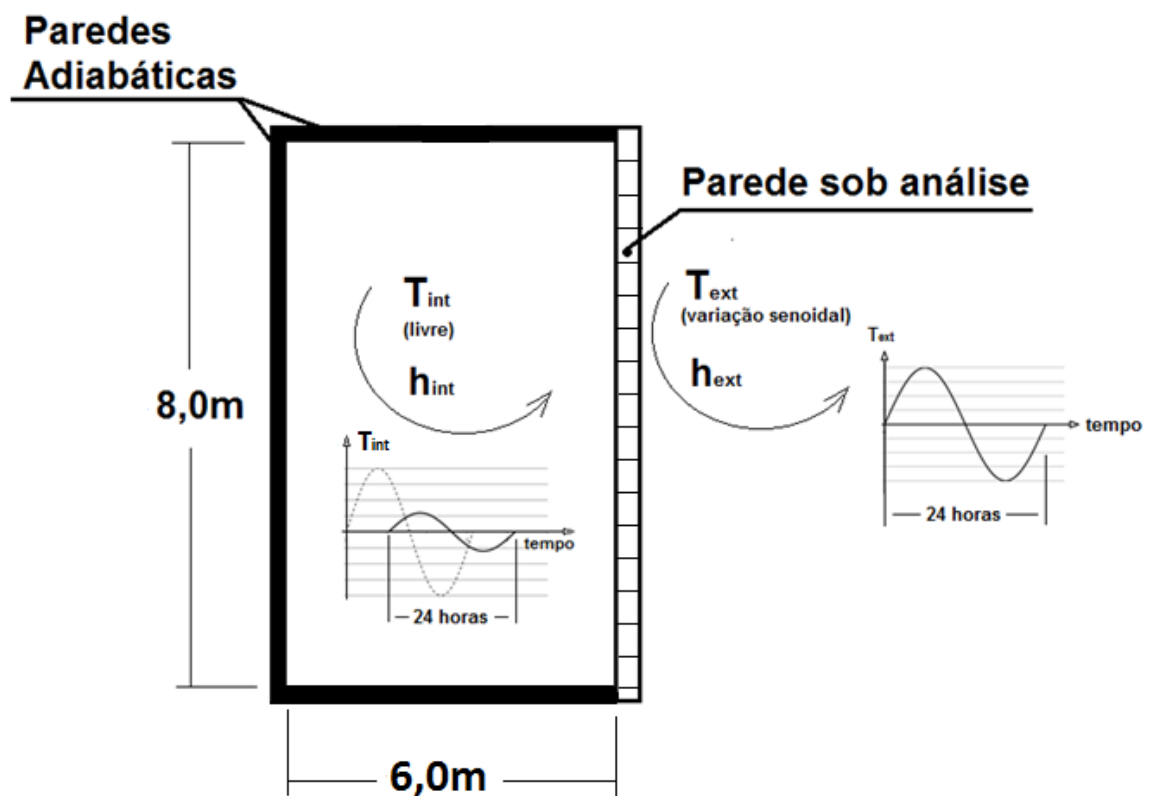


Figura 3.7 – Ambiente de teste.

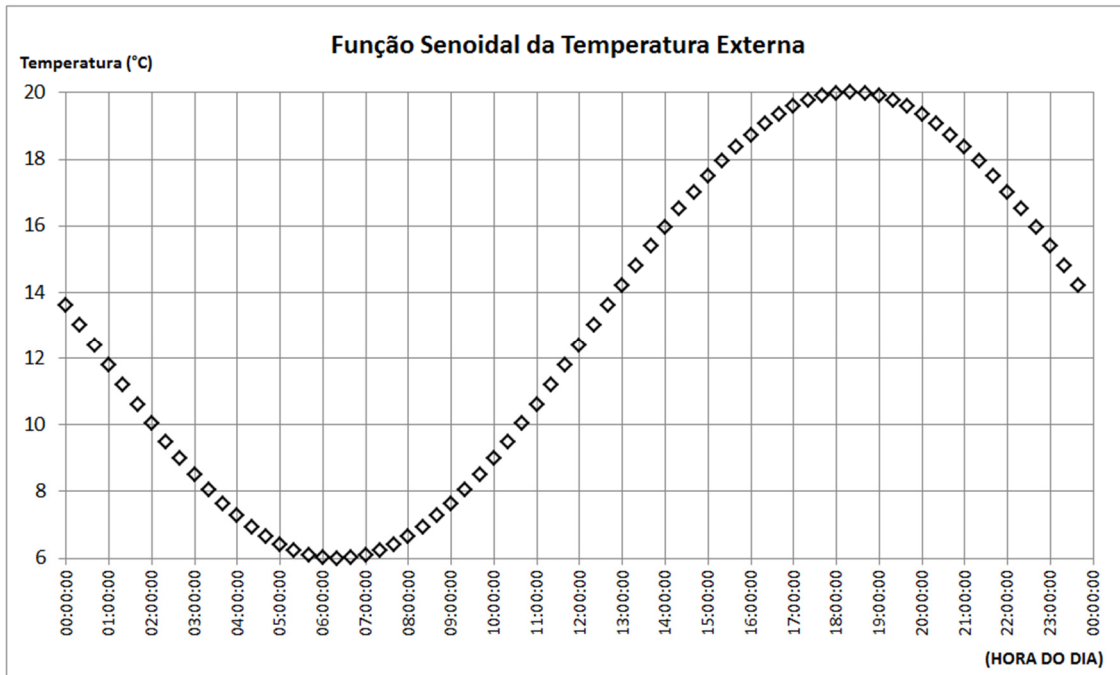


Figura 3.8 – Função senoidal de variação de temperaturas externas.

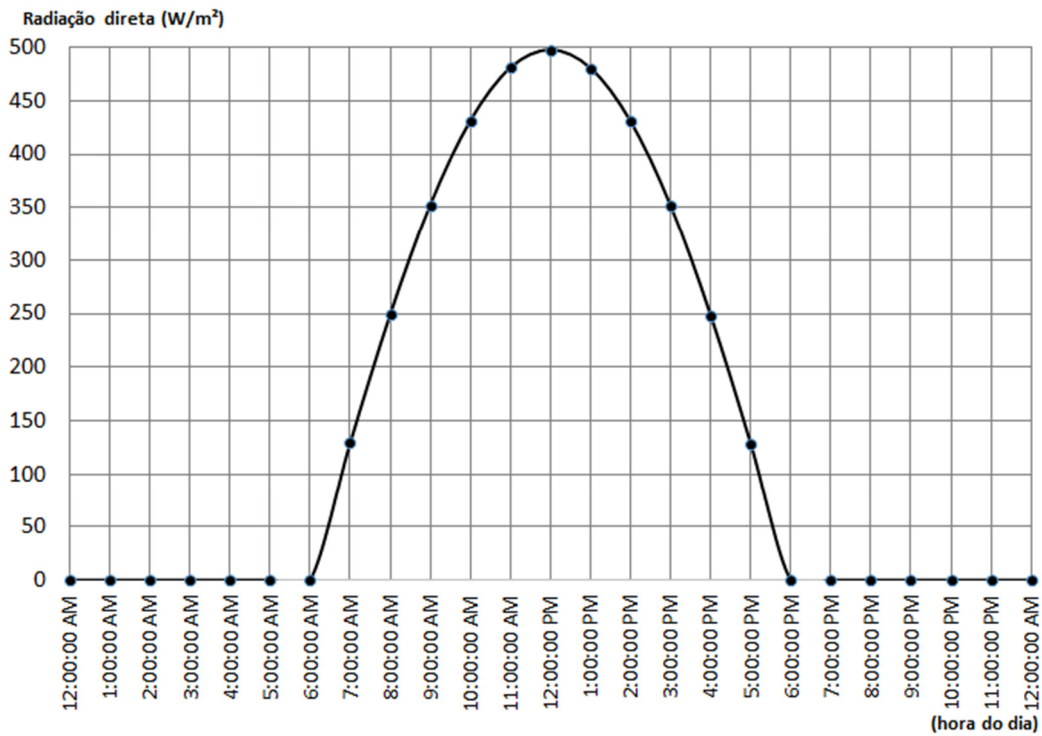


Figura 3.9 – Função de variação da radiação direta.

No casos 3 e 4, essas condições são substituídas por condições de contorno oriundas de arquivo climático da cidade de Curitiba-PR, Brasil.

Em grande parte das figuras apresentam resultados de temperaturas, no Capítulo 5, apresentam o erro *rms* –*root mean square*, das simulações realizadas no Domus frente às simulações feitas com o acoplamento, onde seus resultados são considerados estarem mais próximos do valores reais.

3.3.2.1 Caso 1: Avaliação da simulação acoplada BES – CFD.

Nesta seção comparam-se simulações realizadas no programa de *Building Energy Simulation*, que utiliza propriedades equivalentes do bloco para representá-lo contra simulações através do método acoplado onde o bloco é detalhado internamente no software de CFD sob análise 3-D. O objetivo é avaliar quão diferentes são os resultados quando se utiliza a modelagem 3-D do interior dos blocos com o detalhamento das cavidades e do movimento convectivo do ar nos seus interiores.

Na modelagem do CFD, dois blocos são construídos sob metodologia idêntica à descrita na Seção 3.2, mas com adição de uma camada de reboco em ambos os lados interno e externo da parede, como mostra a Figura 3.10. Portanto a montagem possui os domínios dos Blocos, do Ar, da Argamassa e dos Rebocos interno e externo. A influência do número deste tipo de blocos nos resultados foi investigada em termos da condutividade térmica equivalente em simulações em regime permanente, conforme apresentado na Seção 4.3, onde se observa que dois blocos representam bem o desempenho e evitam maior esforço computacional. As malhas de volumes finitos que preenchem os volumes dos

blocos, do ar de seus interiores da argamassa e do reboco foram construídas respeitando-se os critérios estabelecidos na Seção 4.2. A modelagem matemática também considera as hipóteses e modelos apresentados na Seção 3.2 com exceção do item *ii*, pois neste momento a simulação é transiente no CFD, de acordo com o fluxograma do método integrado.

Os resultados obtidos através dos dois métodos de simulação são avaliados sob duas metodologias:

- i) Com a temperatura interna do ambiente livre, avalia-se sua variação ao longo do dia simulado para as condições externas do dia de inverno. Comparam-se também os valores de fluxos de calor trocados entre a superfície interna da parede com o ambiente interno;
- ii) Fixa-se a temperatura interna, simulando-se climatização ideal e analisa-se o desempenho da parede através da variação da temperatura média da superfície interna da parede e dos valores de fluxo de calor transferido entre a superfície interna e o ambiente.

Ambos os blocos original e aprimorado são simulados para a avaliação comparativa entre métodos.

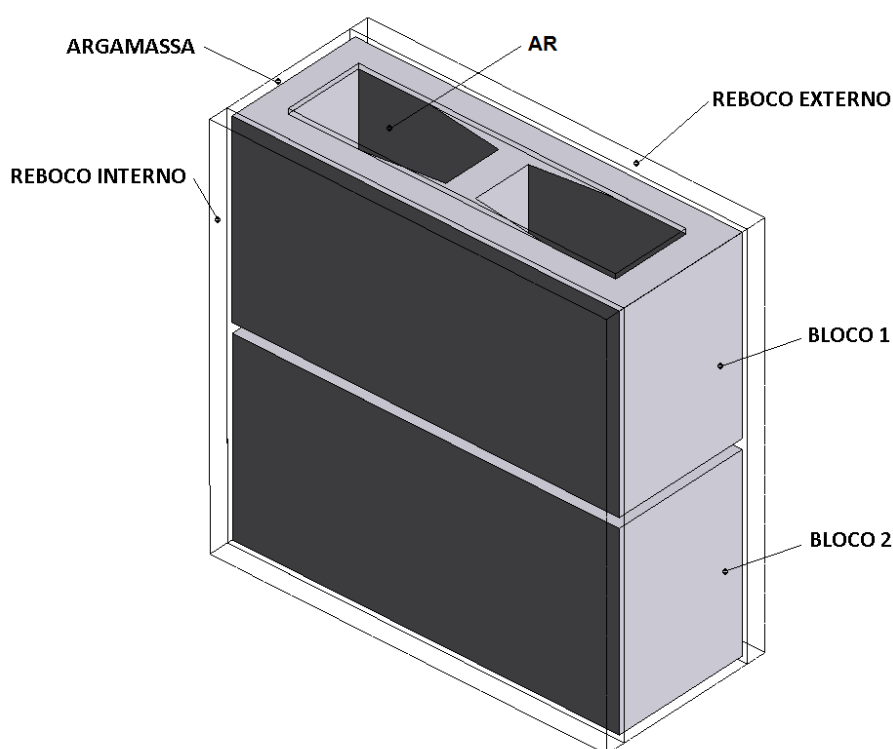


Figura 3.10 – Modelo representativo de parede para a co-simulação Domus e Ansys-CFX.

3.3.2.2 Caso 2: Bloco Original de Mercado vs Bloco Aprimorado da proposta #27.

Neste caso os desempenhos do bloco original de mercado e do bloco aprimorado da Proposta #27 são comparados através dos três parâmetros listados abaixo e sob o método de simulação acoplada, com metodologia idêntica à descrita na Seção 3.3.2.1. As simulações são realizadas com a função senoidal de temperatura externa do dia de inverno apresentada na Figura 3.8 e com temperatura interna fixa em 24°C. Os resultados obtidos com os dois tipos de blocos de concreto são avaliados com o uso dos seguintes parâmetros:

i) Análise do fator de decréscimo da amplitude térmica interna (*decrement factor*) – nas simulações com blocos originais e com blocos aprimorados, onde o fator d_f , adimensional, é definido pela divisão da amplitude térmica observada no interior do ambiente de teste pela amplitude observada no exterior da edificação - Equação 3.14. A redução da amplitude cíclica de temperatura do ar interno e da superfície interna mostra o aumento de resistividade térmica da parede. Uma parede com fator de decréscimo de 0,5 que sofre variação de temperatura externa de 20°C iria observar somente uma variação de temperatura interna de 10°C.

$$d_f = \frac{(T_{int}^{max} - T_{int}^{min})}{(T_{ext}^{max} - T_{ext}^{min})} \quad (3.14)$$

ii) Análise do atraso térmico no ambiente, definido pela diferença de tempo entre os picos de temperaturas, máxima e mínima, dos ambientes externo e interno, sendo, portanto, o tempo que o pico de calor do ambiente externo leva para alcançar e formar o pico de temperatura no ambiente interno. Também se analisa o atraso térmico na escala da parede, que representa a diferença de tempo entre os picos de máximo e mínimo valor, de temperaturas médias das superfícies, interna e externa, da parede. Esta análise também reforça os ganhos do aprimoramento realizado no bloco de concreto.

iii) Taxa de transferência de calor através da parede sob análise, integrada no tempo – no método de simulação acoplada com os blocos original e aprimorado. São calculados de modo separado, as

taxas que entram e saem do ambiente, integrados nas 24 horas do dia, $\dot{E}_{T_entrada}$ e $\dot{E}_{T_saída}$. Para obtenção destas taxas integradas no dia simulado, em kJ/dia, calcula-se primeiramente a taxa instantânea, em W, no final de cada passo de tempo de 20 minutos no BES, sendo este calculado pela Equação 3.15.

$$\dot{E}_T = h_{int} A_{parede} \left(\frac{\bar{T}_{sup_int} + \bar{T}_{sup_int}^0}{2} - \frac{T_{int} + T_{int}^0}{2} \right) \quad (3.15)$$

A taxa, \dot{E}_T , é tido como constante ao longo do transiente de 20 minutos no cálculo do fluxo de calor integrado e, portanto é multiplicado por 1200 segundos. Dois somatórios são realizados, um para todos os fluxos com valores positivos, resultando em $\dot{E}_{T_entrada}$. Outro somatório é realizado para os fluxos com valores negativos, resultando em $\dot{E}_{T_saída}$. Os resultados dos fluxos integrados mostram a redução de energia transferida pela parede sob análise com o aprimoramento do bloco de concreto.

3.3.2.3 Caso 3: Inclusão de assimetria provocada pela cinemática solar

Neste caso, a parede tem todo o seu pé direito modelado no CFD, com 14 blocos de concreto. Na largura, o domínio é representado por um único bloco de concreto com a aplicação de argamassa de assentamento e revestimentos de reboco em ambos os ambientes interno e externo, como nos casos 1 e 2. Na extremidade superior da parede, na altura do teto, uma marquise (*breeze soleil*) é

instalada, de modo que a radiação solar, de acordo com a hora do dia, incide totalmente, parcialmente ou não incide na parede. O objetivo é evidenciar a importância da modelagem detalhada do interior da parede, pois, o sol, quando incidir parcialmente, aquece a porção inferior na parede. O ar que preenche as cavidades será aquecido na porção inferior na parede e seu movimento convectivo torna possível o pré-aquecimento dos blocos acima ainda sob sombra. A Figura 3.11 ilustra o caso, mostrando o ambiente em vista lateral e em corte, onde a parede em análise tem incidência de radiação solar. O movimento do sol é descendente em todas as simulações devido à orientação da parede à oeste, aquecendo primeiramente a região inferior da parede.

Este procedimento se torna possível no acoplamento porque o modelo de cinemática solar [42] implementado no Domus calcula a altura ensolarada. Esta altura será informada ao CFD que possui recursos para que todos os elementos de malha da superfície externa que estão abaixo da altura informada recebam a radiação solar.

O mesmo caso é simulado somente no programa de BES. Os resultados são analisados e comparados, buscando-se visualizar o ganho de detalhes e precisão com a simulação acoplada BES-CFD. Os resultados obtidos através das duas metodologias são analisados comparando-se as variações da temperatura da superfície interna da parede ao longo do dia simulado para as condições externas de um dia quente de verão, ensolarado, o dia 1 de janeiro na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. Os dados são obtidos de arquivo climático. Comparam-se também os valores de fluxos de calor trocados entre a superfície interna da parede com o ambiente interno sob o fenômeno de convecção e sob ambos os métodos de simulação a cada passo de tempo, bem como as energias totais transferidas ao longo do dia.

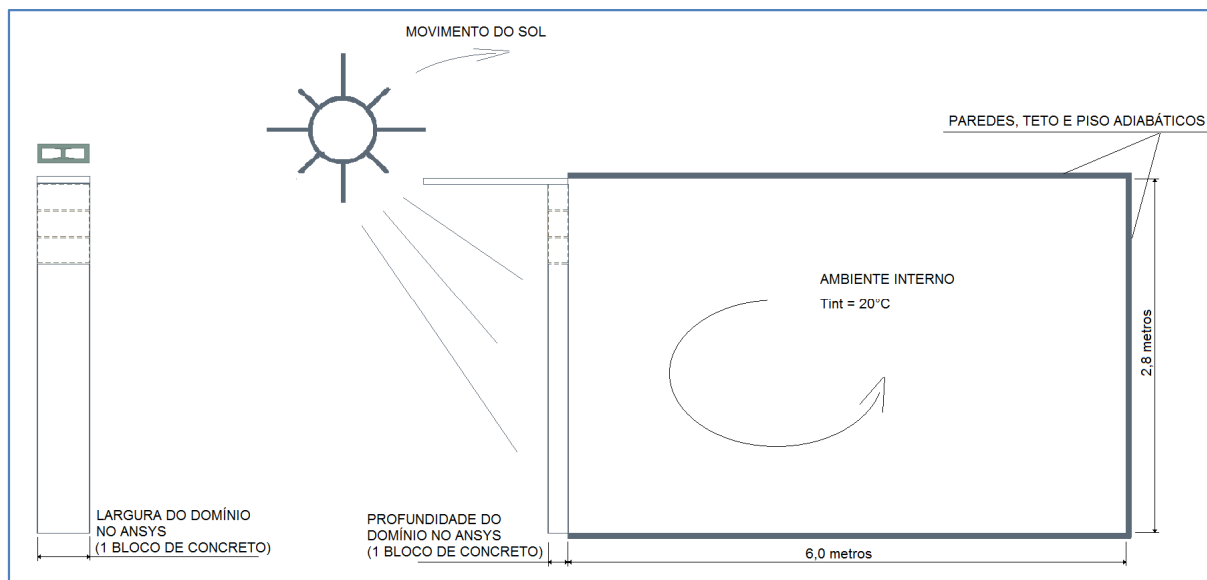


Figura 3.11 – Domínio de simulação do Caso 3.

3.3.2.4 Caso 4: Adição de uma Camada de Ar Ventilada

A parede sob análise ganha uma camada de ar ventilada, construída com placas de cerâmica, na face externa da parede. A Figura 3.12 ilustra a instalação das placas sobre a parede, deixando um espaço vazio entre as placas e a parede. No presente caso de estudo as estruturas metálicas que fixam as placas cerâmicas não estão consideradas no modelo. A parede tem todo o seu pé direito modelado no CFD, com 14 blocos de concreto, semelhante ao caso 3. Na largura, o domínio também é representado por um único bloco de concreto com a aplicação de argamassa de assentamento e revestimentos de reboco em ambos os ambientes interno e externo, como nos casos 1, 2 e 3. As aberturas inferior e superior da camada de ar ventilada têm 10cm de altura e oferecem liberdade para que o ar da camada ventilada saia ao ambiente externo ou o ar do ambiente

externo entre. Pois, neste caso, a pressão relativa entre o domínio interno à camada de ar ventilada e o ar externo é 0Pa. Deste modo se considera que o vento não está interferindo na ventilação da camada de ar. Em uma futura análise pode-se criar uma malha de volumes finitos no ambiente externo com condições de contorno de vetores de velocidade do ar simulando vento com variação de velocidade e direção para análise da influência no desempenho da camada de ar e ainda simular com mais detalhes a troca de calor entre ambiente externo e placas cerâmicas.

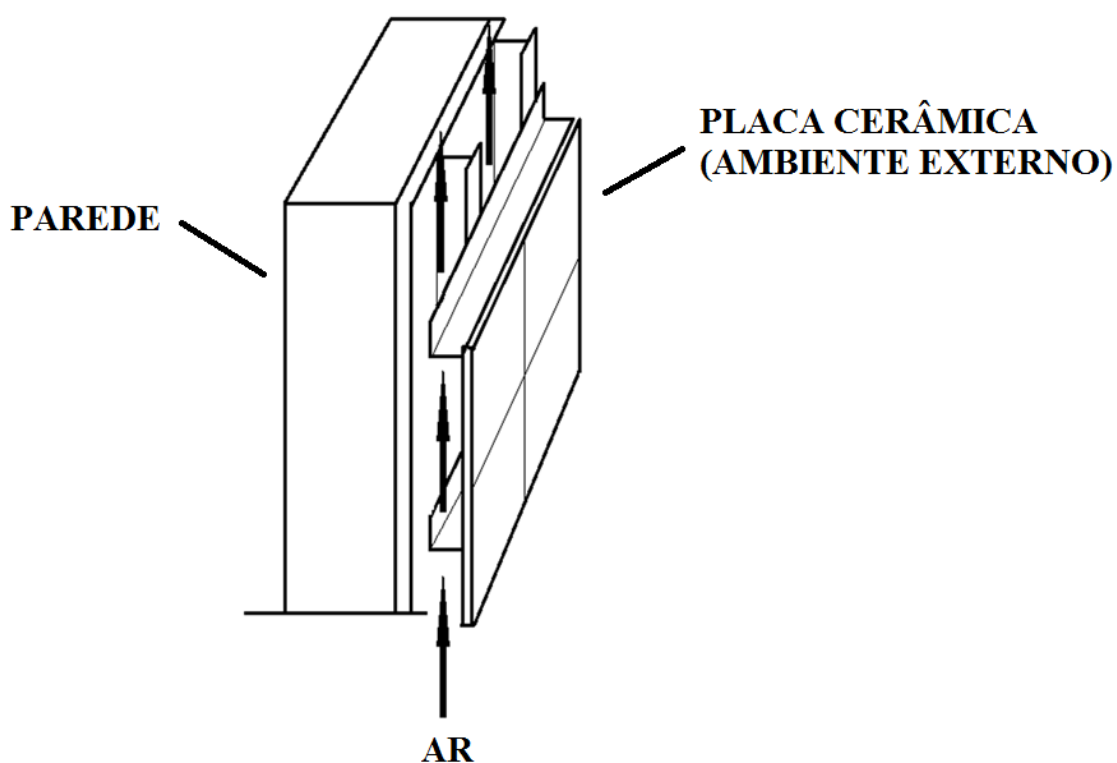


Figura 3.12 – Montagem da camada de ar ventilada.’

Portanto, neste caso, as potencialidades da integração BES – CFD é explorada em maior profundidade com enriquecimento de detalhes no modelo. Novamente, o mesmo caso será configurado no Domus. Os resultados serão analisados e comparados sob mesma metodologia descrita no caso 3.

Também, está instalada a marquise na extremidade superior da parede, na altura do teto, mantendo-se o modelo de cinemática solar, com o sol incidindo da mesma forma, como mostra a Figura 3.13. As placas de cerâmica serão aquecidas pela radiação solar com início às 14h da tarde na sua porção inferior. Às 18h, a radiação solar índice em 100% da área da parede. A Figura 3.14 ilustra o caso, mostrando o ambiente em vista lateral e em corte. Novamente, o movimento do sol é descendente devido à orientação da parede à oeste.

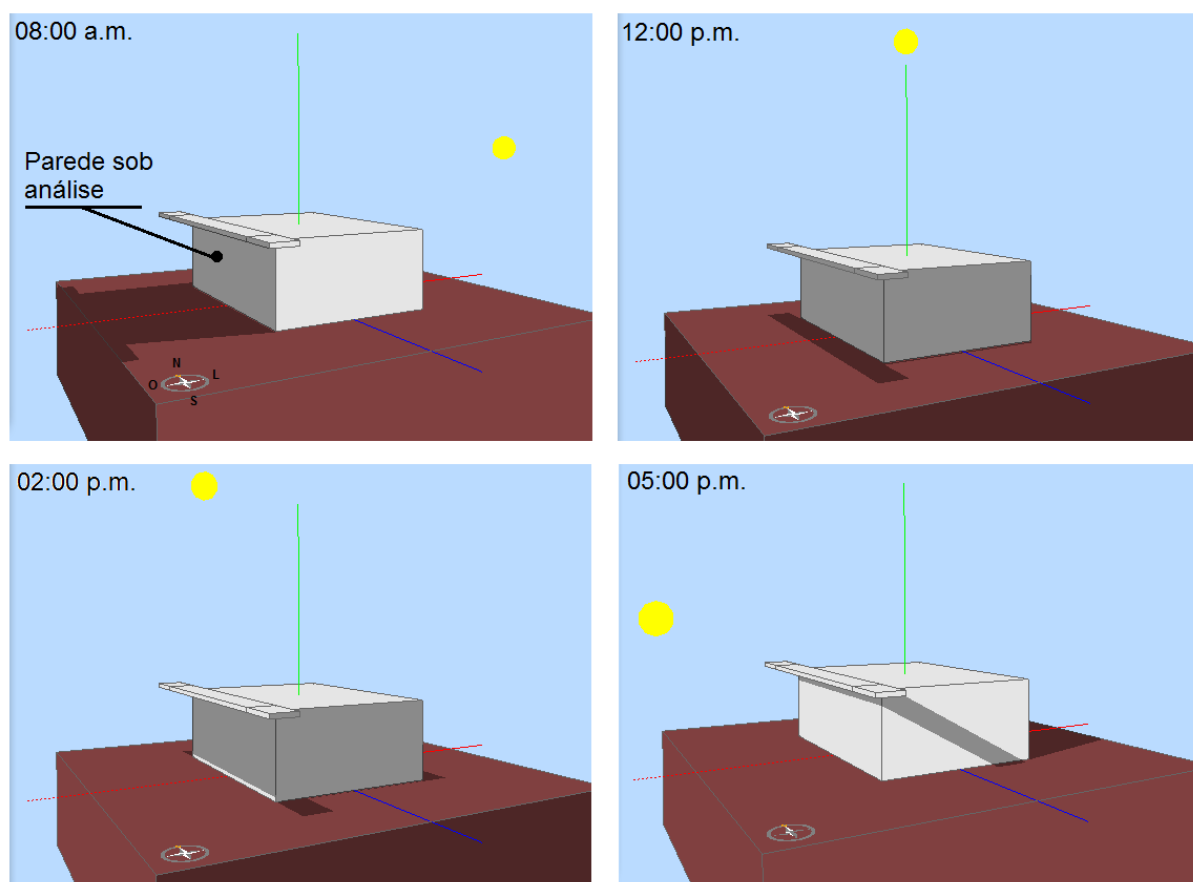


Figura 3.13 – Ilustração da cinemática solar.’

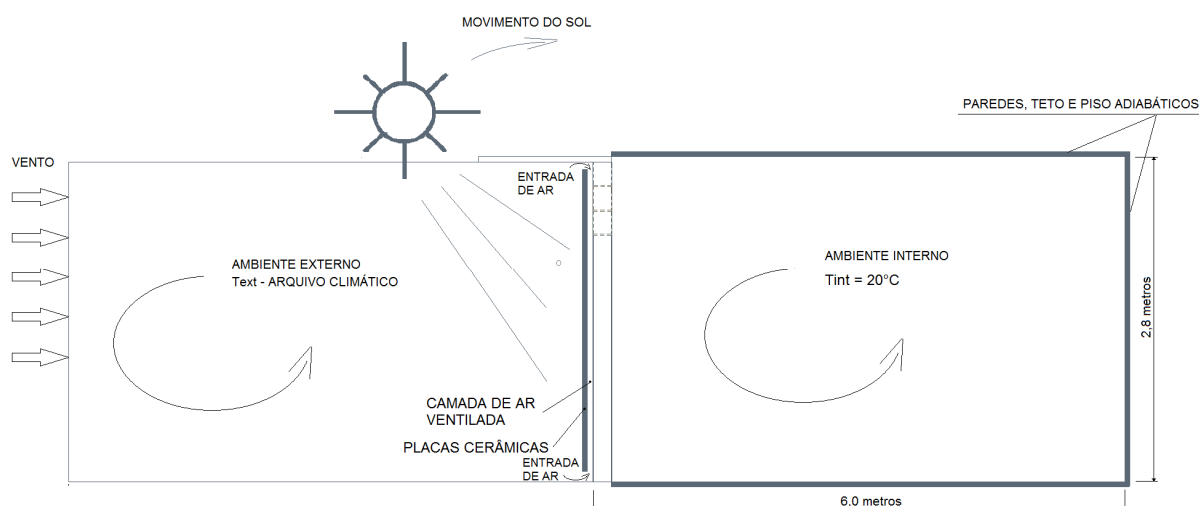


Figura 3.14 – Domínios de simulação do Caso 4.’

A fachada ventilada é um sistema construtivo industrializado em que são usados perfis e cliques especiais para a fixação das placas de revestimento. Sua função é de criar uma proteção contra a umidade e mofo, contra os agentes atmosféricos e promove isolamento térmico. Durante períodos de sol é criada uma barreira térmica ao calor. É muito eficaz para proteger a edificação da umidade e dos agentes atmosféricos e também auxilia como barreira à radiação externa e isolamento acústico [43].

4 RESULTADOS DO APRIMORAMENTO DO DESEMPENHO TÉRMICO DO BLOCO DE CONCRETO

Seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 3, Seção 3.2, o bloco de concreto original de mercado é simulado para obtenção das taxas de transferência de calor nas faces quente e fria para que então a sua condutividade térmica equivalente seja calculada pela Equação 3.2. O resultado encontrado foi de $0,889\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para $\Delta T=20^\circ\text{C}$ e de $0,906\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ para $\Delta T=25^\circ\text{C}$, sendo 4,3% acima do valor medido em laboratório. Considera-se um ótimo resultado, observando-se as incertezas de medição do método experimental da Caixa Quente Protegida em torno de 10% [32] e as incertezas da simulação, gerada por erros de truncamento, erros de discretizações, erros de iteração, erros de arredondamento e erros de programação. A modelagem dos fenômenos físicos de dinâmica dos fluidos e de transferência de calor aplicada no Ansys emprega equações de Navier-Stokes simplificadas para solução numérica, outro exemplo de simplificação são os métodos de simplificações empregados no modelo de turbulência. Essas simplificações geram erros de truncamento [44]. Acredita-se que estes erros somados aos erros de discretizações são os erros mais significativos no estudo deste capítulo, visto que os resíduos escolhidos são baixos e o número de iterações é livre até encontrada a solução. Também acredita-se que não haja erros de programação.

O valor medido em laboratório foi de $0,86\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$. O trabalho de construção e medição da amostra está apresentado em Turco [32]. O Apêndice B descreve brevemente o trabalho de medição realizado nas amostras.

A Figura 4.1 apresenta a distribuição de temperatura no plano central das cavidades, notando-se que a região superior está em torno de $6,0^{\circ}\text{C}$ mais quente que a região inferior, mostrando bi dimensionalidade do problema na seção, pois o bloco superior está com o ar das cavidades mais aquecido que o bloco inferior. Indicando ainda que a comunicação entre as cavidades de blocos diferentes influencia no comportamento do movimento do ar interno, que pode ser observado na Figura 4.2. Observa-se na figura um padrão de fluxo circular dominado por forças de empuxo. As magnitudes das velocidades representadas pelos vetores estão na faixa entre 0 e $0,10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, sendo que na região central aproxima-se de zero e nas regiões próximas às paredes, visualiza-se convecção mais ativa com velocidades do ar próximas a $0,10\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nota-se também que o padrão é uma recirculação que abrange as dimensões dos dois blocos de concreto onde há o fluxo dominante ascendente no interior das cavidades ao lado da superfície aquecida e descendente do lado oposto.

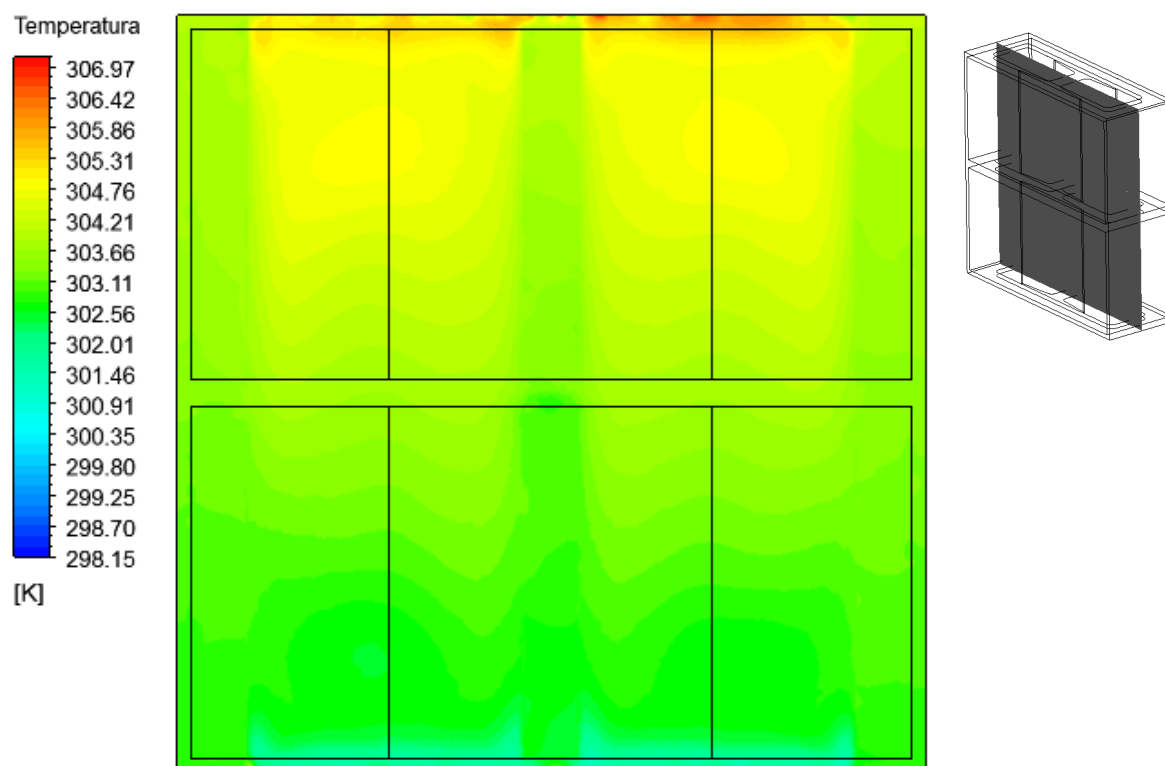


Figura 4.1 – Perfil de temperatura no plano central.

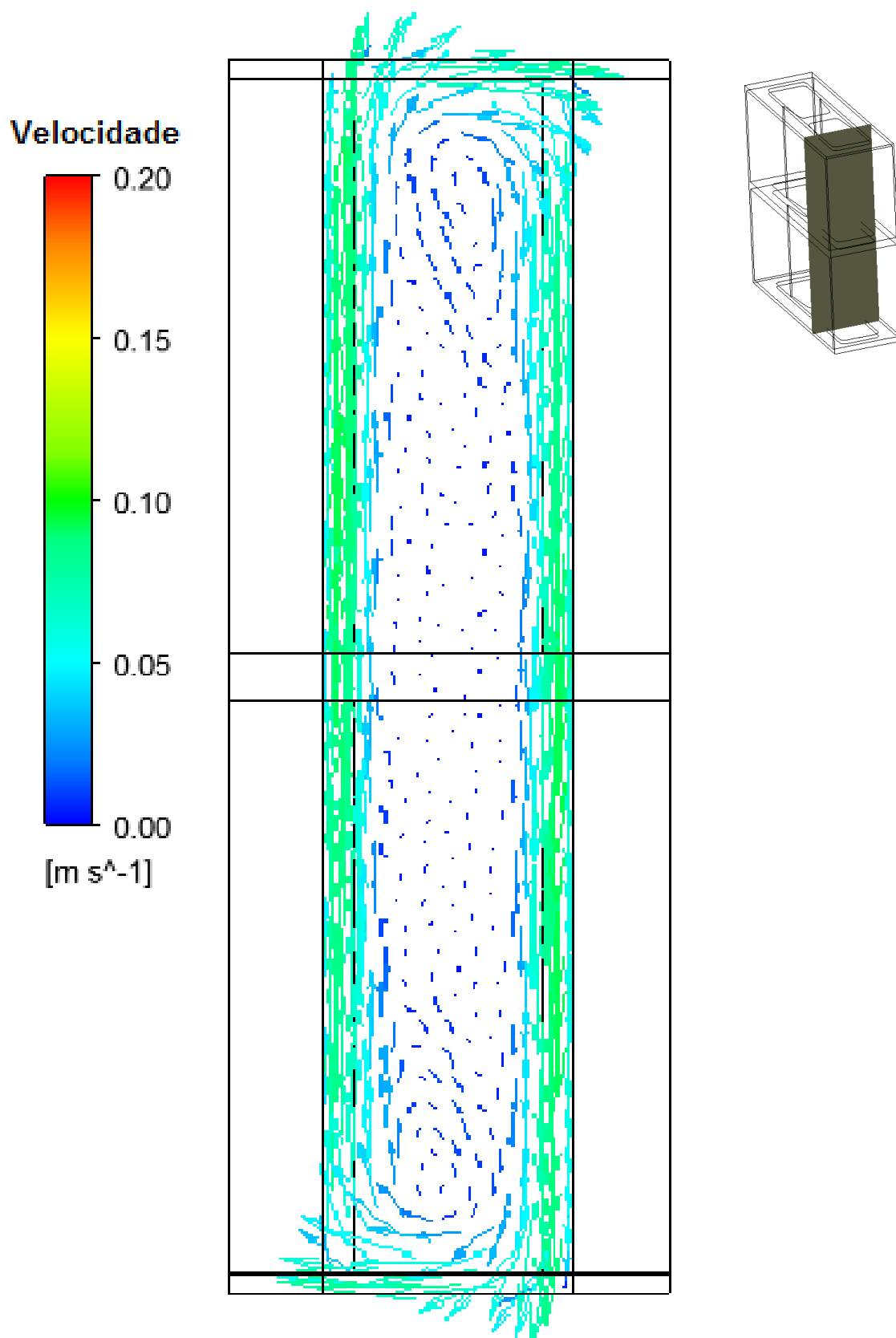


Figura 4.2 – Perfil de velocidade em plano transversal da cavidade direita.

O movimento do ar internamente às cavidades se origina devido às diferenças de temperaturas que causam forças de empuxo, onde os fluxos mais quentes, mais leves, se deslocam para cima, ocupando espaços de fluidos frios e mais pesados. Esses movimentos podem gerar instabilidades ou perturbações no escoamento que, se amplificadas, podem causar transição do escoamento laminar para o turbulento.

Na convecção livre é usual utilizar o número de Rayleigh para relacionar a natureza laminar ou turbulenta de um escoamento, analogamente ao número de Reynolds para a convecção forçada. O número de Rayleigh é o produto dos números de Grashof e Prandtl, representando a relação entre as forças de empuxo e as forças viscosas. Portanto, pode-se utilizar o número de Rayleigh médio, bem como o coeficiente convectivo de transferência de calor médio para analisar-se o escoamento e a atividade de convecção internamente às cavidades entre as propostas e simulações realizadas. A transição entre os fluxos laminares e turbulentos ocorre para Rayleigh em torno de 10^9 .

Para determinar estas grandezas, os fluxos convectivos de calor médio nas superfícies de cavidades foram calculados pelo CFD. Com a transferência convectiva, em $W\ m^{-2}$, calcula-se o coeficiente convectivo de transferência de calor com a Equação 4.1 e o número de Rayleigh com a Equação 4.3 [45]:

$$Nu = \frac{\bar{h} L}{k_a} = \frac{4}{3} \left(\frac{Gr}{4} \right)^{\frac{1}{4}} g(Pr) \quad (4.1)$$

onde

$$g(Pr) = \frac{0,75 Pr^{\frac{1}{2}}}{(0,609 + 1,221 Pr^{\frac{1}{2}} + 1,238 Pr)^{\frac{1}{4}}} \quad (4.2)$$

e então:

$$Ra = Gr Pr \quad (4.3)$$

O valor calculado para o coeficiente convectivo de transferência de calor internamente às cavidades do bloco de mercado foi de $3,9 \text{W(m}^2 \text{ K)}^{-1}$. O número de Rayleigh calculado é de $7,45 \cdot 10^5$, caracterizando um escoamento laminar.

Na Figura 4.3, pode-se observar a variação da intensidade da taxa de transferência de calor, em W m^{-2} , nas faces quente e fria da amostra modelada. Maiores fluxos de calor ocorrem nas bordas e no centro dos blocos, onde há condução de calor nas paredes sólidas dos blocos e da argamassa. Nas regiões que estão logo a frente das paredes sólidas, que ligam as faces quente e fria, notam-se fluxos acima de $45,0 \text{W m}^{-2}$. Já nas regiões logo a frente das cavidades, são da ordem de 40 a 45W m^{-2} , indicando significativa troca de calor através das cavidades, pois os fluxos são relativamente próximos.

Na Figura 4.3a, que apresenta a face quente, tem-se uma diferença elevada de fluxo de calor entre os blocos inferior e superior, sendo que o bloco superior apresenta fluxo de calor menor devido ao ar estar mais aquecido no interior das cavidades. O inverso se observa na Figura 4.3b, onde o fluxo de calor é reduzido no bloco inferior (notar a diferença de escala devido ao fluxo ser computado com valores negativos nesta face).

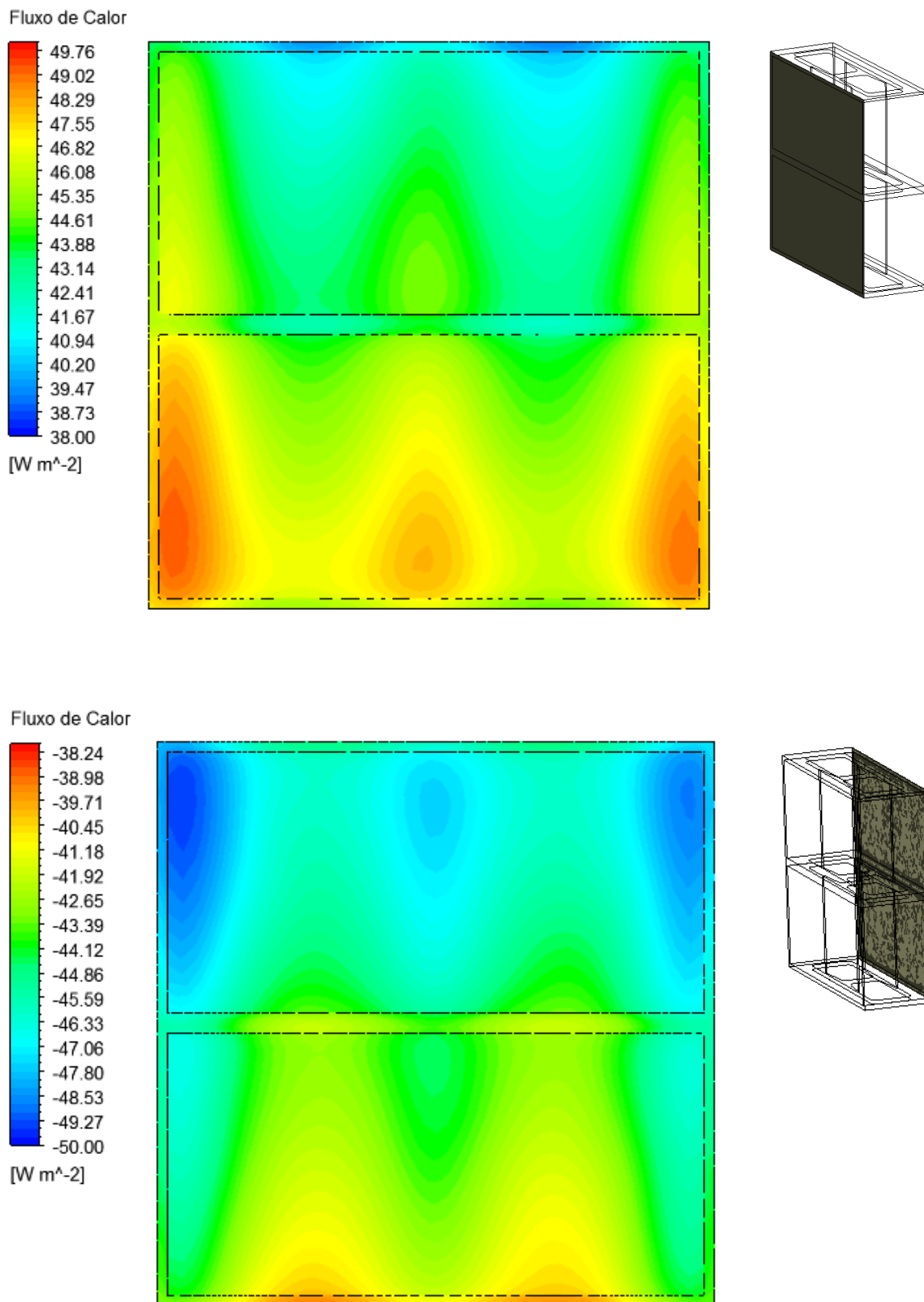


Figura 4.3 – Distribuição da intensidade de fluxo de calor, em $W m^{-2}$, nas faces quente (a) e fria (b).

O trabalho de aprimoramento iniciou-se com o planejamento de execução de simulações das configurações apresentadas na Tabela 4.1. As propostas da tabela são formadas de cavidades retangulares e foram definidas, primeiramente, baseando-se nas observações dos trabalhos de aprimoramento da revisão bibliográfica e em seguida, nos resultados das primeiras propostas avaliadas. Consideram os limites práticos dos processos de fabricação atuais [46] e ainda mantém a fração de vazio em torno de 40% conforme exposto na Seção 3.2.

As primeiras propostas utilizam espessuras de paredes maiores. Espessuras maiores dificultam a inclusão de um número maior de cavidades e sabe-se que paredes transversais espessas originam uma ponte térmica importante entre as superfícies interna e externa dos blocos, o que aumenta a condução de calor, dificultando o objetivo do trabalho. Contudo, as propostas seguintes utilizam paredes menores. Ao todo se apresentam 18 configurações diferentes na Tabela 4.1.

Para simplificar a citação de cada configuração no presente texto elas estão numeradas na primeira coluna e ainda estabeleceu-se um padrão para nomeá-las. Por exemplo, para um bloco com 3 (três) cavidades no comprimento e 2 (duas) cavidades na profundidade, nomeia-se de C3P2. O bloco C3P2 possui 6 (seis) cavidades.

A Tabela 4.2 ilustra os valores da Fração de Vazio para todas as propostas. Os termos $Ee.c$ e $Ee.l$ abreviam a espessura equivalente no comprimento e na largura do bloco, respectivamente. Seus valores somam as espessuras de todas as paredes no sentido do comprimento e da largura. Ajudam na análise da mudança de conceitos entre as diferentes propostas.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Tabela 4.1 – Configurações propostas para cavidades retangulares.

Conf.	Número de Cavidades no Comprimento	Número de Cavidades na Largura	Dimensões da Cavidade (mm) (C x P)	Alinhamento das Fileiras	Espessura de Paredes Externas/Internas (mm)
Original	2	1	150,0 x 80,0	Alinhado	30 / 30
#1	1	2	330,0 x 32,5	Alinhado	30 / 15
#2	1	2	330,0 x 25,0	Alinhado	30 / 30
#3	2	2	156,0 x 31,0	Alinhado	30 / 18
#4	2	2	156,0 x 31,0	Intercalado	30 / 18*
#5	3	2	100,0 x 32,5	Alinhado	30 / 15
#6	3	2	100,0 x 32,5	Intercalado	30 / 15
#7	5	2	60,0 x 47,5	Alinhado	15 / 15
#8	7	2	38,57 x 47,5	Alinhado	15 / 15
#9	5	3	60,0 x 26,67	Alinhado	15 / 15
#10	7	3	38,57 x 26,67	Alinhado	15 / 15
#11	5	2	60,0 x 47,5	Intercalado	15 / 15
#12	7	2	38,57 x 47,5	Intercalado	15 / 15
#13	5	3	60,0 x 26,67	Intercalado	15 / 15
#14	7	3	38,57 x 26,67	Intercalado	15 / 15
#15	4	2	78,75 x 47,5	Intercalado	15 / 15
#16	8	4	37,5 x 22,5	Não definido	10 / 10
#17	7	4	44,285 x 22,5	Não definido	10 / 10
#18	8	3	37,5 x 33,33	Não definido	10 / 10

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Tabela 4.2 – Fração de Vazio.

Proposta	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)	Proposta	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)
Original	40,0	90	60	#10	39,6	120	60
#1	39,3	60	75	#11	52,2	90	45
#2	30,2	60	90	#12	47,0	105	45
#3	35,4	78	78	#13	44,0	90	60
#4	35,4	78	78	#14	39,6	120	60
#5	35,7	90	75	#15	54,8	75	45
#6	35,7	90	75	#16	49,5	90	50
#7	52,2	90	45	#17	51,1	80	50
#8	47,0	105	45	#18	54,9	90	40
#9	44,0	90	60				

Além da configuração original, as propostas #1, #2, #3, #4, #9, #10, #13 e #14 foram modeladas e avaliadas. A Figura 4.4 apresenta os croquis destas oito propostas avaliadas.

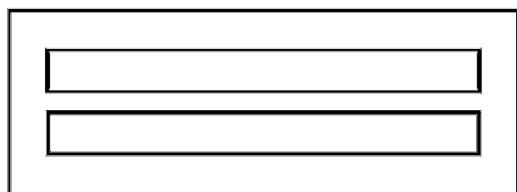


Figura 4.4a – Proposta #1.

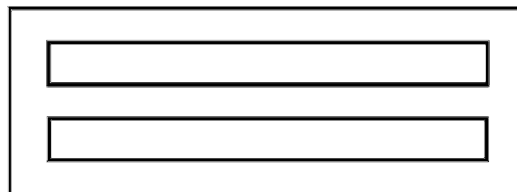


Figura 4.4b – Proposta #2.

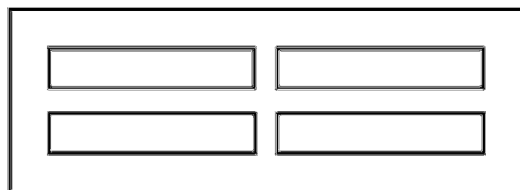


Figura 4.4c – Proposta #3.

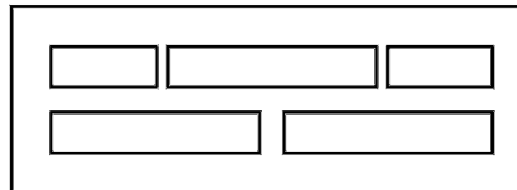


Figura 4.4d – Proposta #4.

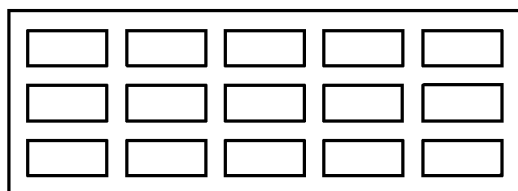


Figura 4.4e – Proposta #9.

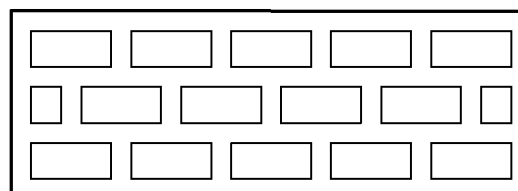


Figura 4.4f – Proposta #13.

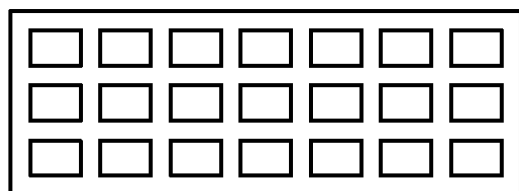


Figura 4.4g – Proposta #10.

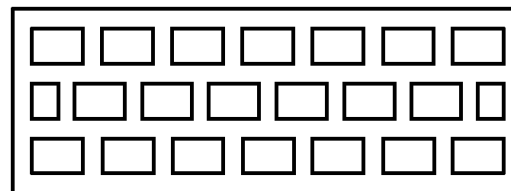


Figura 4.4h – Proposta #14.

Figura 4.4 – Seção das propostas #1 a #4, #9, #10, #13 e #14.

A Tabela 4.3 expõe os resultados obtidos para a condutividades térmica equivalente nas simulações destas propostas e compara-as com a configuração original de mercado. Os resultados foram obtidos com ΔT de 25°C para três situações:

- i) considerando-se os fenômenos da radiação e convecção internamente às cavidades, obtendo-se λ_{eq} , ou seja, a condutividade térmica equivalente considerando-se os 3 fenômenos de transferência de calor.
- ii) sem considerar a radiação internamente às cavidades, obtendo-se $\lambda_{eq-conv}$. Além desta coluna simular a hipotética aplicação de barreira radiante que levaria a emissividade do concreto a zero internamente às cavidades, também nos proporciona a análise do quanto importante está sendo a parcela de transferência de calor por radiação.
- iii) considerando-se somente condução através dos blocos e da argamassa, obtendo-se $\lambda_{eq-cond}$. Esta coluna nos proporciona a investigação da importância da redução alcançada em transferência de calor através do concreto com as modificações impostas em cada proposta.

A Tabela 4.4 expõe os mesmos resultados, mas compara as três primeiras colunas linha a linha.

Nota-se que as propostas reduzem o coeficiente de condutividade térmica equivalente do bloco de concreto. Para as propostas #1, #2 e #3 ainda mais significativamente, alcançando reduções acima de vinte por cento, chegando a quase vinte e nove por cento para a proposta #1. As propostas #1 e #2, conforme nomenclatura adotada são C1L2, e foram idealizadas eliminando-se a ligação central (ponte térmica) existente na configuração original entre as faces interna e externa do bloco e substituindo-a por uma ligação transversal, entre as faces laterais. Importante notar que as configurações #1 e #2 alcançaram desempenho similar sendo que possuem significativa diferença de espessura da parede

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

central, o que sugere possibilidade para melhorar o desempenho deste tipo de configuração C1L2, mantendo reforçada a parede central e reduzindo as espessuras das paredes laterais já que a fração de vazio está inferior à configuração original e portanto há espaço para isso.

Tabela 4.3 – Resultados das propostas #1 a #4, #9 e #13.

Proposta	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)
	Equivalente λ_{eq} (W/m.K)	Equivalente $\lambda_{eq-conv}$ (W/m.K)	Equiv. $\lambda_{eq-cond}$ (W/m.K)			
Original	0,906 (100%)	0,644 (100%)	0,436 (100%)	40,0	90	60
#1	0,645 (71,2%)	0,443 (68,8%)	0,214 (49,1%)	39,3	60	75
#2	0,650 (71,7%)	0,444 (68,9%)	0,219 (50,2%)	30,2	60	90
#3	0,707 (78,0%)	0,539 (83,7%)	0,348 (79,8%)	35,4	78	78
#4	0,750 (82,8%)	0,557 (86,5%)	0,347 (79,6%)	35,4	78	78
#9	0,793(87,5%)	0,629 (97,7%)	0,424 (97,2%)	44,0	90	60
#10	0,826 (91,2%)	0,738 (114%)	0,542 (124%)	39,7	120	60
#13	0,735(81,1%)	0,611 (94,8%)	0,389 (89,2%)	44,0	90	60
#14	0,818 (90,3%)	0,719 (112%)	0,512 (117%)	39,7	120	60

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Tabela 4.4 – Resultados das propostas #1 a #4, #9 e #13 – Alterando-se a análise comparativa de percentuais.

Proposta	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)
	Equivalente λ_{eq} (W/m.K)	Equivalente $\lambda_{eq-conv}$ (W/m.K)	Equiv. $\lambda_{eq-cond}$ (W/m.K)			
Original	0,906 (100%)	0,644 (71,1%)	0,436 (48,1%)	40,0	90	60
#1	0,645 (100%)	0,443 (68,7%)	0,214 (33,2%)	39,3	60	75
#2	0,650 (100%)	0,444 (68,3%)	0,219 (33,7%)	30,2	60	90
#3	0,707 (100%)	0,539 (76,2%)	0,348 (49,2%)	35,4	78	78
#4	0,750 (100%)	0,557 (74,3%)	0,347 (46,3%)	35,4	78	78
#9	0,793(100%)	0,629 (79,3%)	0,424 (53,5%)	44,0	90	60
#10	0,826 (100%)	0,738 (89,3%)	0,542 (65,6%)	39,7	120	60
#13	0,735(100%)	0,611 (83,1%)	0,389 (52,9%)	44,0	90	60
#14	0,818 (100%)	0,719 (87,9%)	0,512 (62,6%)	39,7	120	60

Para as propostas #1 e #2, percebe-se que a radiação é responsável por mais de 30% do calor transferido. Diferentemente das propostas #9 a #13 que possuem uma fileira a mais de cavidades, o que sugere a modificação destas propostas com a inserção de mais cavidades no sentido da profundidade do bloco. Ainda percebe-se uma redução drástica quando compara-se $\lambda_{eq-cond}$ entre as propostas #1 e #2 com o bloco original de mercado, alcançando-se 50% de redução. Nas demais propostas a redução de $\lambda_{eq-cond}$ é mais tímida. Olhando-se este ponto nas propostas #9 e #14, que possuem mesmo valor de *Ee.c.*, a redução de $\lambda_{eq-cond}$ é de 2,8 e 10,8%, respectivamente. Sendo mais expressiva na proposta #14, que possui cavidades intercaladas. Os números sugerem que esta redução de calor transferido por condução nas propostas #13 e #14 é o fator preponderante para a redução de λ_{eq} .

Como citado na revisão bibliográfica, Sun e Fang [20] concluíram que o desalinhamento de cavidades, propostas #4, #13 e #14, melhora o desempenho do bloco. Isto se confirma quando se comparam as propostas #9 com #13 e #10 com #14, mas tem-se efeito contrário quando comparam-se os resultados das propostas #3 e #4, possivelmente pelo fato de terem poucas cavidades e por criar mais uma ponte térmica na proposta #4, pois nota-se que ao desalinhar as cavidades, cria-se uma ligação ou ponte térmica a mais em uma das fileiras, causando perda de resistência térmica.

Nota-se também, através da Tabela 4.4, que as parcelas de calor transferido pelos fenômenos de radiação e de convecção são expressivos em todas as propostas. Em proporção maior ainda nas propostas #1 e #2, onde se minimizou a transferência por condução.

A Figura 4.5 apresenta o comportamento convectivo do ar internamente às cavidades da proposta #1. Encontrou-se uma pequena redução das velocidades do ar em relação às velocidades encontradas no bloco de mercado. Nota-se ainda que o ar quente das cavidades do lado aquecido passa para as cavidades opostas pela região vazia entre blocos que tem a altura de um centímetro, formando uma recirculação que envolve os dois blocos e as 4 cavidades, o que sugere um estudo da influência na condutividade térmica equivalente e no campo de velocidades caso evite-se essa passagem de ar de uma cavidade à outra.

Os resultados obtidos com as propostas #4, #9, #10, #13 e #14 foram determinantes para a desistência de seguir com estudos e propostas com diversas cavidades retangulares ou losangulares. Portanto as propostas #5 a #8, #10 a #12 e #14 a #19 da Tabela 3.2 não foram realizadas, também porque a manufacturabilidade de propostas com muitas cavidades tornam-se prejudicadas pela dificuldade de remoção das peças dos moldes. Então, as novas

configurações propostas, todas com uma única cavidade no comprimento, indicam o caminho correto para redução da ETC.

Contudo, outras nove configurações estão apresentadas na Tabela 4.5, todas com uma única cavidade no comprimento. Serão chamadas de propostas #20 a #28, tais propostas apresentam uma nova ideia de concepção, ou seja, todas possuem Fração de Vazio de 40%, desta forma mantem-se todas com a mesma quantidade de massa e mesma área de seção, o que indica um nível aproximado de resistência à compressão a que os blocos são exigidos. As primeiras quatro propostas, ou seja, propostas #20 a #23 e #28 possuem todas as paredes com a mesma espessura. Para as propostas #24 a #27 deixam-se as laterais dos blocos com espessura de 10mm e calcula-se a espessura das demais paredes para manter-se a Fração de Vazio em 40%. Entende-se que 10mm esteja próximo a um valor mínimo para manter-se a desejada resistência estrutural desta parede que une as demais e para continuar resistente a impactos comuns encontrados em obras. A proposta #28 foi concebida para analisar o caso de tendência ao número máximo de cavidades, portanto a proposta será configurada com 15 cavidades.

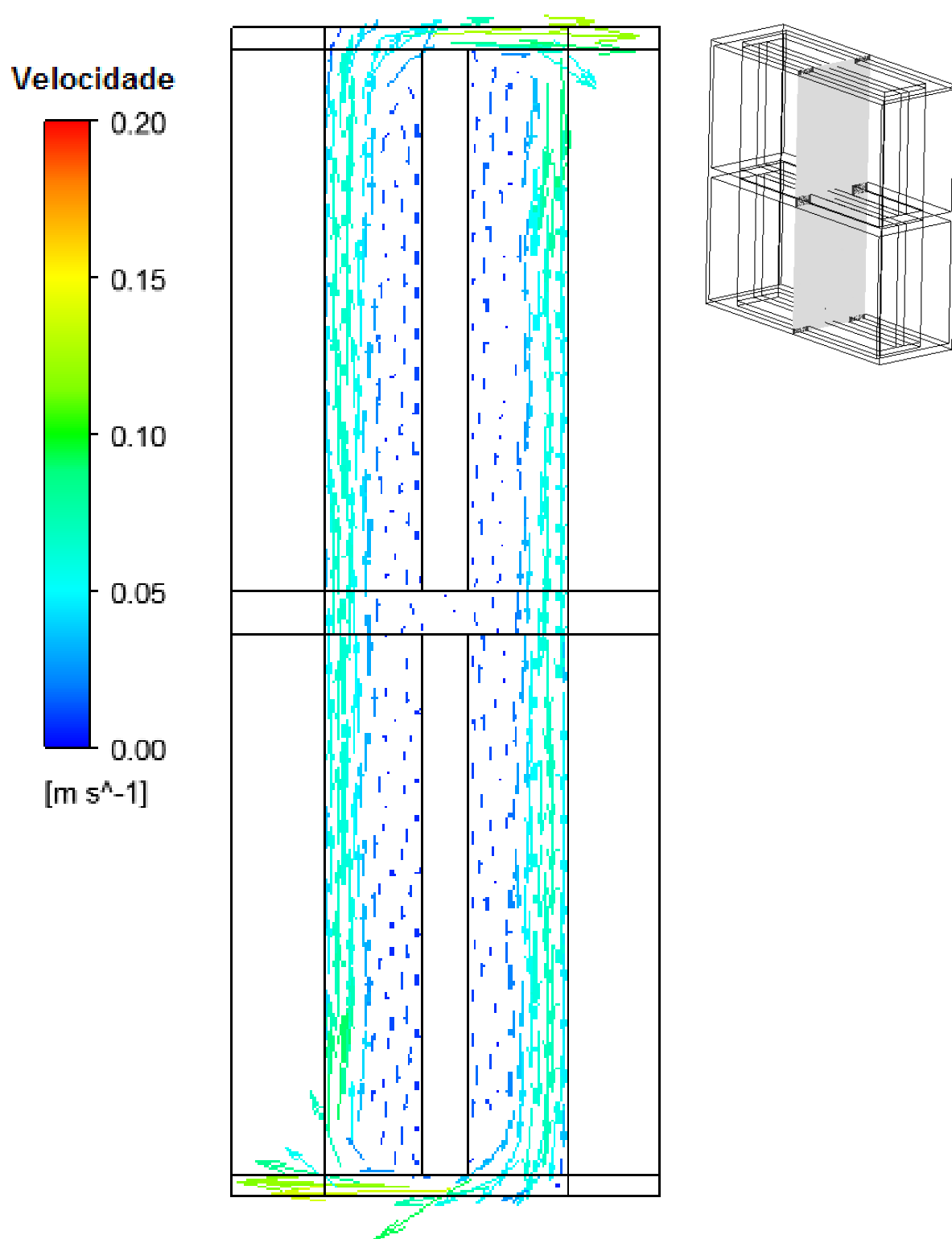


Figura 4.5 – Campo de velocidades no plano central da cavidade da proposta #1.

Importante esclarecer a metodologia utilizada para geração das propostas da Tabela 4.5. A Equação 3.13 define a fração de vazio que para estas propostas foi fixada em 40% e a Equação 4.4 define o volume vazio, V_{vazio} . Como incógnita, pretende-se calcular uma espessura única de parede, chamada de b . Considerando-se que todas as propostas têm uma única cavidade no sentido do comprimento do bloco, o comprimento da cavidade, C_{cav} , de uma nova proposta é definido pela Equação 4.5:

$$V_{vazio} = 190 (n_{cav} C_{cav} L_{cav}) \quad (4.4)$$

$$C_{cav} = 390 - 2b \quad (4.5)$$

Já a largura da cavidade é definida pela Equação 4.6:

$$L_{cav} = \frac{(140 - (n_{cav} + 1)b)}{n_{cav}} \quad (4.6)$$

Desta forma são três equações e três incógnitas e então se calcula as dimensões das cavidades e a espessura de parede b .

Já para as propostas #24 a #27, fixou-se a espessura de paredes laterais em 10 mm, portanto o comprimento da cavidade é conhecido e igual 370mm, portanto calculam-se as outras duas incógnitas.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Tabela 4.5 – Configurações propostas para cavidades retangulares.

Conf.	Número de Cavidades no Comprimento	Número de Cavidades na Largura	Dimensões das Cavidades (mm) (C x P)	Espessura das Paredes Laterais (mm)	Espessura de Paredes Longitudinais (mm)
#20	1	2	339,6 x 32,2	25,2	25,2
#21	1	3	351,0 x 20,6	19,50	19,50
#22	1	4	358,4 x 15,25	15,8	15,8
#23	1	5	363,4 x 12,0	12,0	12,0
#24	1	2	370,0 x 29,5	10,0	27,0
#25	1	3	370,0 x 19,7	10,0	20,2
#26	1	4	370,0 x 14,75	10,0	16,2
#27	1	5	370,0 x 11,8	10,0	13,50
#28	1	15	379,7 x 3,84	5,15	5,15

Os resultados estão apresentados na Tabela 4.6. Nota-se que a estratégia do uso de apenas uma cavidade no comprimento do bloco tem alcançado resultados interessantes, chegando-se com a proposta #27, uma ETC de $0,498\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$, sendo 55,0% da condutividade na condição original utilizada no mercado. A Figura 4.6 ilustra as configurações #20 a #27. A Tabela 4.7 mostra os mesmos resultados que a Tabela 4.6, mas faz os cálculos comparativos linha a linha. Zerando-se a emissividade do concreto no interior das cavidades, os resultados decrescem de 27,4 a 37,2%. Sendo que a parcela relativa à radiação decresce com o aumento do número de cavidades, fato que é também observado na análise paramétrica da Seção 4.1.

A razão de $\lambda_{eq-cond}$ sobre λ_{eq} mostra valores bastante reduzidos, variam de 18,7 a 30,8%, sendo que os valores menores são encontrados nos blocos com maior número de cavidades e, especialmente menores, nas propostas #24 a #27 que possuem paredes laterais com menores espessuras, 10 mm.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Tabela 4.6 – Resultados das propostas #20 a #28.

Proposta	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)
	Equivalente	Equivalente	Equiv.			
	λ_{eq} (W/m.K)	$\lambda_{eq-conv}$ (W/m.K)	$\lambda_{eq-cond}$ (W/m.K)			
Original	0,906 (100%)	0,644 (100%)	0,436 (100%)	40,0	90	60
#20	0,629 (69,4%)	0,426 (66,2%)	0,194 (44,5%)	40,0	50,4	75,6
#21	0,565 (58,9%)	0,393 (61,0%)	0,152 (34,9%)	40,0	39,0	78,0
#22	0,533 (58,8%)	0,378 (58,7%)	0,126 (28,8%)	40,0	31,6	79,0
#23	0,512 (56,5%)	0,372 (57,8%)	0,108 (24,8%)	40,0	24,0	72,0
#24	0,564 (62,3%)	0,354 (55,0%)	0,116 (26,6%)	40,0	20,0	81,0
#25	0,524 (57,8%)	0,351 (54,5%)	0,104 (23,9%)	40,0	20,0	80,8
#26	0,510 (56,3%)	0,354 (55,0%)	0,098 (22,5%)	40,0	20,0	81,0
#27	0,498 (55,0%)	0,358 (55,6%)	0,093 (21,3%)	40,0	20,0	81,0
#28	0,204 (22,5%)	0,165 (25,6%)	0,054 (12,4%)	40,0	10,31	82,48

Tabela 4.7 – Resultados das propostas #20 a #28 – Alterando-se a análise comparativa .

Proposta	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Cond. Térmica	Fração de Vazio (%)	Ee.c. (mm)	Ee.l. (mm)
	Equivalente	Equivalente	Equiv.			
	λ_{eq} (W/m.K)	$\lambda_{eq-conv}$ (W/m.K)	$\lambda_{eq-cond}$ (W/m.K)			
Original	0,906 (100%)	0,644 (71,1%)	0,436 (48,1%)	40,0	90	60
#20	0,629 (100%)	0,426 (67,7%)	0,194 (30,8%)	40,0	50,4	75,6
#21	0,565 (100%)	0,393 (69,6%)	0,152 (26,9%)	40,0	39,0	78,0
#22	0,533 (100%)	0,378 (70,9%)	0,126 (23,6%)	40,0	31,6	79,0
#23	0,512 (100%)	0,372 (72,6%)	0,108 (21,1%)	40,0	24,0	72,0
#24	0,564 (100%)	0,354 (62,8%)	0,116 (20,6%)	40,0	20,0	81,0
#25	0,524 (100%)	0,351 (67,0%)	0,104 (19,8%)	40,0	20,0	80,8
#26	0,510 (100%)	0,354 (69,4%)	0,098 (19,2%)	40,0	20,0	81,0
#27	0,498 (100%)	0,358 (71,9%)	0,093 (18,7%)	40,0	20,0	81,0
#28	0,204 (100%)	0,165 (80,9%)	0,054 (26,5%)	40,0	10,31	82,48

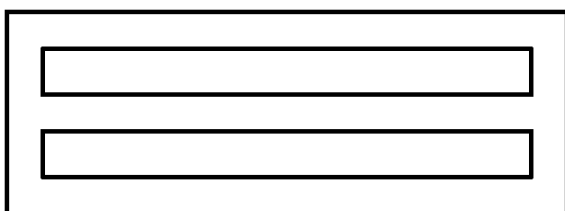


Figura 4.6a – Proposta #20.

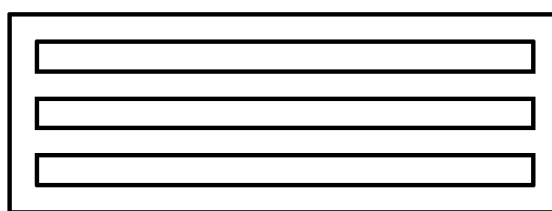


Figura 4.6b – Proposta #21.

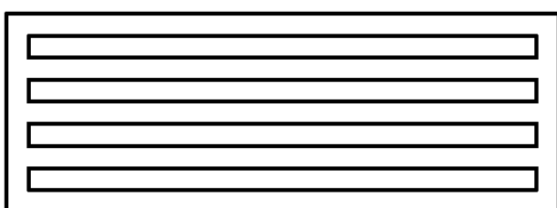


Figura 4.6c – Proposta #22.

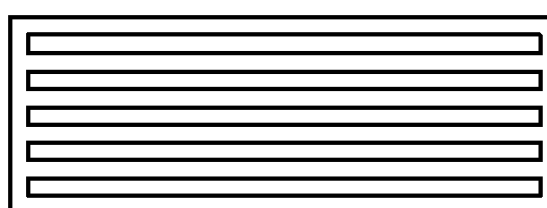


Figura 4.6d – Proposta #23.

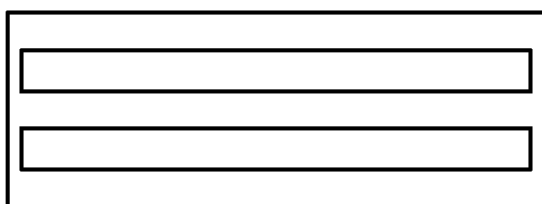


Figura 4.7e – Proposta #24.



Figura 4.6f – Proposta #25.

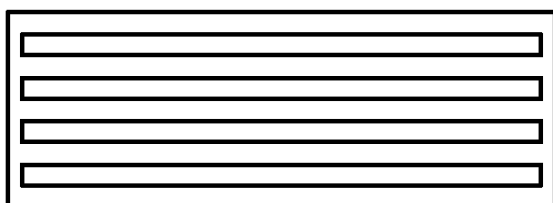


Figura 4.6g – Proposta #26.

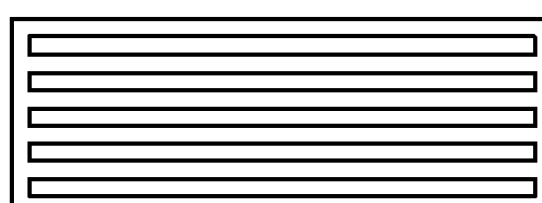


Figura 4.6h – Proposta #27.

Figura 4.6 – Configurações das Propostas #20 a #27.

A Figura 4.7 apresenta o campo de velocidade internamente às cavidades da Proposta#27, no plano de corte central. Observa-se que o ar interno às três cavidades centrais está praticamente estagnado. Existe um movimento circular do ar que abrange as cavidades mais externas, passando pelo espaço de ar superior e inferior, tornando o fenômeno de transferência de calor por convecção mais ativo nestas cavidades. As cavidades, na figura, estão numeradas de 1 a 5. A cavidade 1 é a mais externa, próxima a superfície externa na parede que encontra-se a 43°C. Olhando-se as cavidades 1, nota-se que no bloco inferior, a velocidade do ar está próximo de 0,10m s⁻¹. O mesmo acontece na cavidade 5 do bloco superior. Nas cavidades centrais, de 3 e 4, o ar permanece com pequenas velocidades, próximas a 0,015m/s. Na cavidade 2, velocidades ligeiramente superiores às cavidades 3 e 4.

Utilizando-se das Equações 4.1 a 4.3, o coeficiente convectivo de transferência de calor e o número de Rayleigh foram calculados internamente às cavidades da proposta #27. O ponto de maior atividade encontrado é a cavidade 5 do bloco superior, com coeficiente convectivo de 11,6W(m² K)⁻¹ e Rayleigh igual 5,05 10⁸, que é muito próximo ao valor de transição a um regime turbulento, sendo bastante superior ao encontrado no bloco de mercado. As cavidades centrais apresentam coeficiente convectivo de aproximadamente 2,5W(m² K)⁻¹ e Rayleigh de 8,9 10⁵, bastante laminar.

O elevado coeficiente convectivo da cavidade 5 no bloco superior é alcançado devido ao ar aquecido que sobe pela cavidade 1 e passa à cavidade 5 pelo espaço entre blocos. Interessante sugestão de trabalho futuro seria estudar uma maneira de bloquear esta passagem, sem criação de ponte térmica.

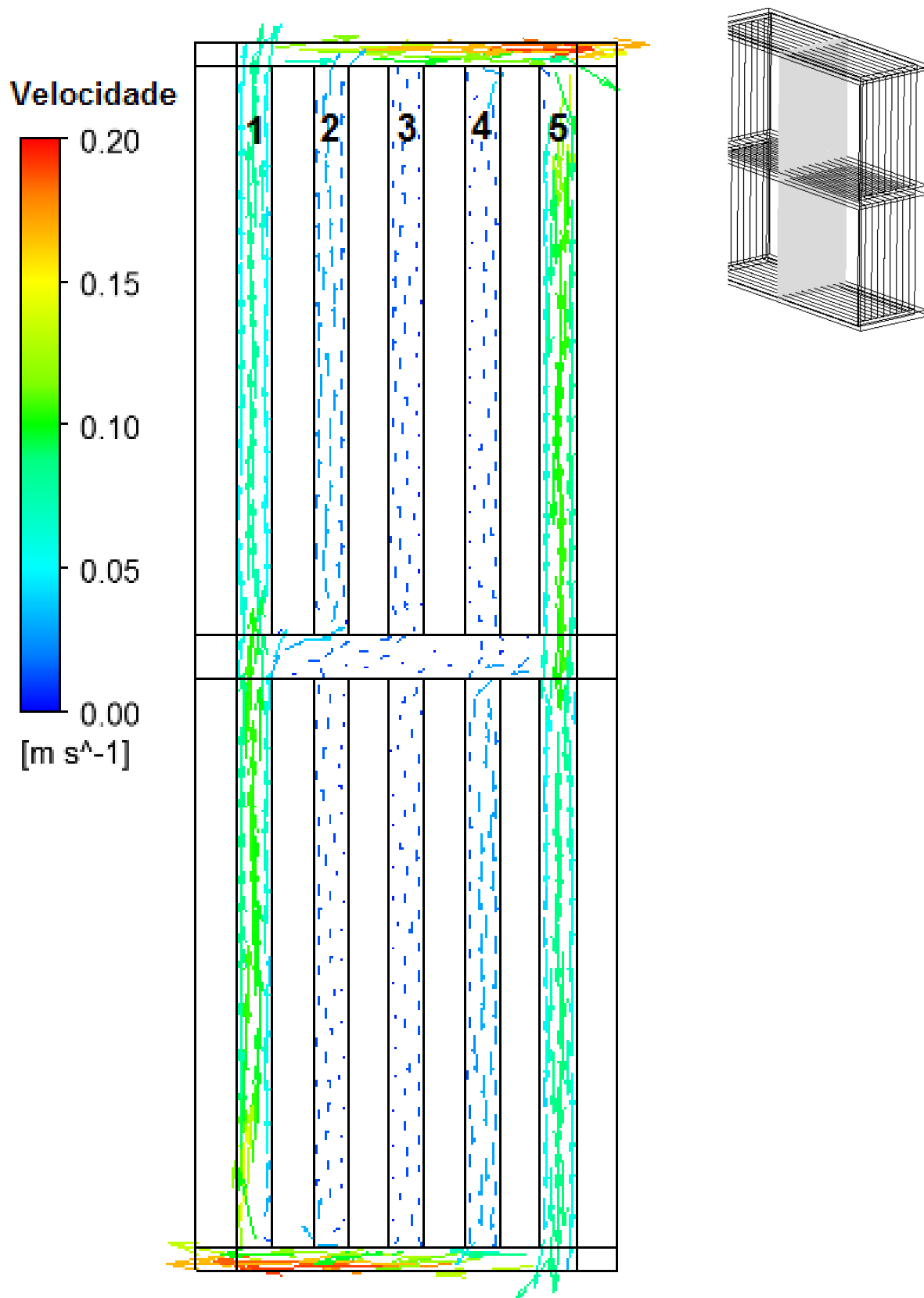


Figura 4.7 – Campo de velocidades no plano central da cavidade da proposta #27.

4.1 Estudo Paramétrico da Condutividade Térmica Equivalente

A modelagem matemática e numérica do CFD utilizada torna possível o estudo da influência de parâmetros utilizados como dados de entrada do modelo, nos dados de saída. Essa análise de sensibilidade ajuda a prever quais e como as características físicas podem ser modificadas para melhorar o desempenho do elemento de edificação modelado.

As Figuras 4.8 a 4.12 apresentam a variação absoluta da condutividade térmica equivalente para os dois modelos de bloco, original de mercado e aprimorado da proposta #27, frente a variação de somente uma característica. Os valores de referência são os calculados nas condições estabelecidas no Capítulo 3 para o estudo de aprimoramento térmico do bloco de concreto, em regime permanente: $T_{\text{int}}=18,0^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{ext}}=43,0^{\circ}\text{C}$, $h_{\text{int}}=8,72\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$, $h_{\text{ext}}=23,26\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$, $\varepsilon=0,85$, $\lambda_{\text{conc}}=1,67\text{W}(\text{mk})^{-1}$.

A Figura 4.8 mostra a variação da condutividade térmica equivalente em função da variação da emissividade do concreto no interior das cavidades. Primeiramente o gráfico mostra os valores da condutividade com emissividade igual a 0, ou seja sem radiação interna às cavidades. Como se espera, os valores das condutividades térmicas equivalentes aumentam com o aumento da emissividade do concreto. Para ambos os modelos de blocos, os resultados para emissividade de 0,85 são superiores em 22,6% e 24,6% aos resultados com emissividade iguais a 0. O número maior refere-se ao bloco de mercado que possui apenas uma cavidade na profundidade e por conseguinte a diferença de temperaturas é maior entre as superfícies quente e fria que trocam radiação, influenciando no resultado já que as diferenças das quartas potências de temperaturas de superfícies são diretamente proporcionais ao fluxo de calor radiativo.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Os resultados com emissividade nula são interessantes, pois apresentam o máximo potencial de redução da condutividade, o que poderia ser alcançado com a pintura metálica das superfícies internas, caso exista viabilidade técnica e econômica.

Os resultados de condutividades térmicas equivalentes com emissividades iguais a 0,50 são aproximadamente 15% menores que as encontradas com emissividades de 0,85, indicando importante redução na transferência de calor como, por exemplo, poderia ser alcançada com a pintura em cor “alumínio”.

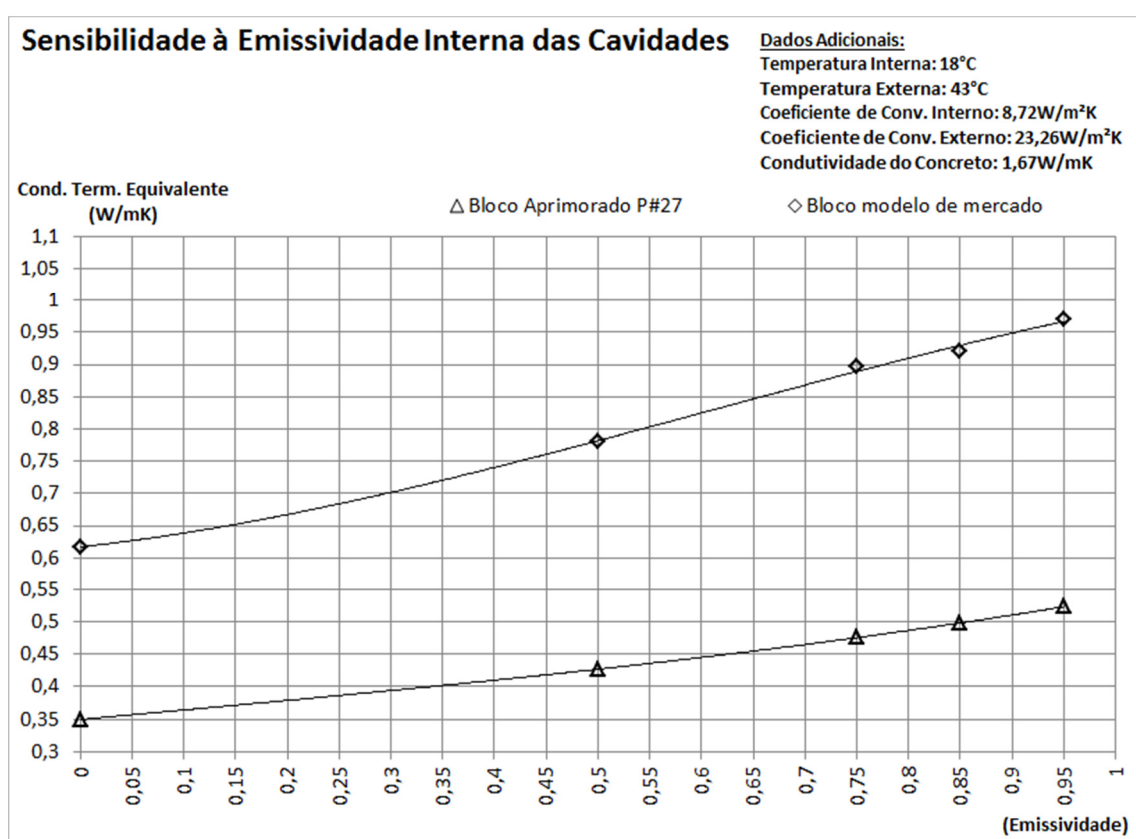


Figura 4.8 – Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função da Emissividade do concreto no interior das cavidades.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam a variação da condutividade térmica equivalente em função dos coeficientes de convecção do ar dos ambientes externo e interno, respectivamente. Na primeira, Figura 4.9, diminui-se o

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

coeficiente de convecção externo de $23,26$ a $5,00\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$, mantendo-se o interno em $8,72\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$. Na segunda, Figura 4.10, mantém-se o coeficiente de convecção externo em $5,00\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ e diminui-se o coeficiente interno até $2,00\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$. Desta forma avalia-se o coeficiente de condutividade térmica com uma grande variação de coeficientes de convecção. Os resultados mostram que diferentes coeficientes de convecção alteram ligeiramente os resultados da condutividade térmica equivalente dos blocos de concreto, de forma que menores coeficientes de convecção resultam em menores condutividades. Os coeficientes não são características físicas do bloco de concreto, apenas influenciam ligeiramente o campo de temperaturas e a quantidade de calor trocada com os ambientes, alterando a magnitude do fluxo de calor.

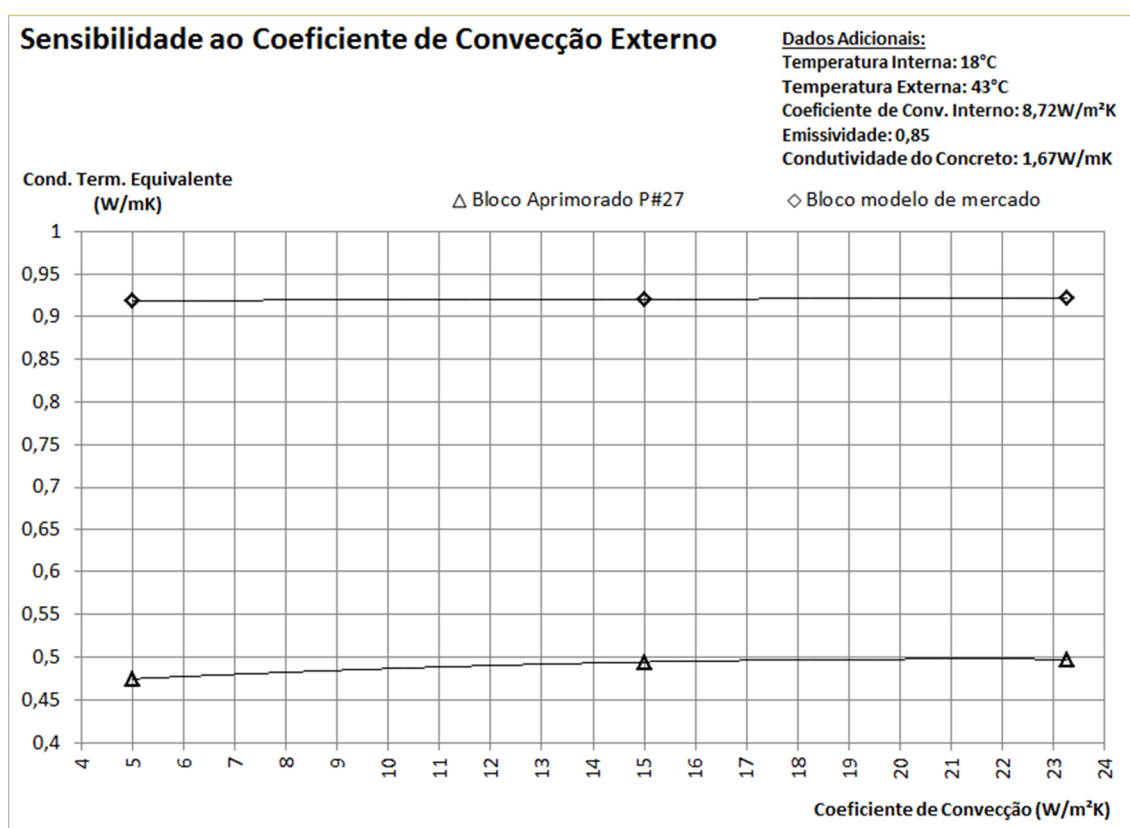


Figura 4.9 – Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do Coeficiente de Convecção Externo.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Ainda observando-se as Figuras 4.9 e 4.10, notam-se maiores variações da condutividade térmica com pequenos coeficientes de convecção, essas variações são reflexo da perda de precisão de resultados frente a baixos coeficientes, pois pequenas variações nos valores de fluxo de calor retirados do CFD causam grandes variações no cálculo da condutividade térmica equivalente. Portanto, para maximizar a precisão deste tipo de análise, torna-se importante o uso de coeficientes de convecção maiores de $5,00\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$.

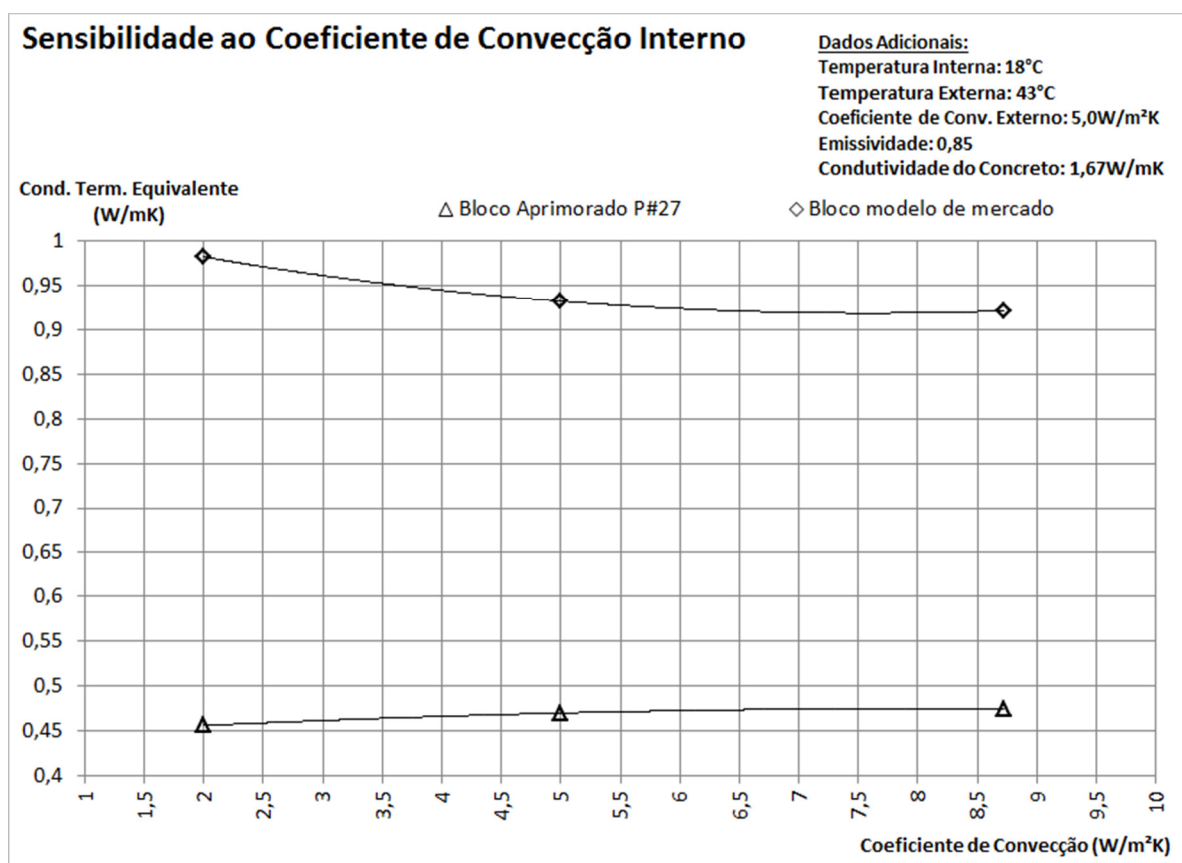


Figura 4.10 – Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do Coeficiente de Convecção Interno.

A Figura 4.11 apresenta a sensibilidade da ETC frente à variação do valor da condutividade térmica do concreto. O gráfico mostra uma importante diferença no coeficiente angular das linhas de tendências comparando-se os resultados para os dois blocos onde os resultados têm comportamento linear, diretamente proporcional devido à dependência direta da taxa de transferência de calor por condução à condutividade térmica do material. O bloco de modelo atual de mercado possui três consistentes pontes térmicas entre os ambientes interno e externo, oferecendo uma grande parcela condutiva de calor em relação ao total do calor trocado. Já o bloco que tem seu desempenho aprimorado, elimina as excessivas pontes térmicas e a parcela condutiva de calor é bastante reduzida. Isto pode ser visto comparando-se $\lambda_{eq-cond}$ com λ_{eq} na Tabela 4.3 para ambos os blocos.

Para o modelo de mercado, uma redução da condutividade térmica do material do bloco de concreto de $1,67 \text{ W(mK)}^{-1}$ para $0,90 \text{ W(mK)}^{-1}$, reduziria a condutividade equivalente do bloco em 27,9%. Um ótimo indicativo para os pesquisadores que pesquisam novos materiais ou a mistura de outros materiais na construção de blocos. Por outro lado, são dados que mostram a importância ao trabalho de aprimoramento térmico desenvolvido no presente trabalho, pois, uma redução de 50% na condutividade térmica do material do bloco não alcança o mesmo nível de condutividade térmica equivalente alcançada com a mudança de geometria.

Já para o bloco aprimorado, a redução da condutividade térmica do material do bloco de concreto de $1,67 \text{ W(mK)}^{-1}$ para $0,90 \text{ W(mK)}^{-1}$ reduz a condutividade térmica equivalente do bloco em 9,9%. Mostrando que para o bloco aprimorado da Proposta #27 a redução da condutividade do material não causaria tão grandes reduções de taxas de transferências de calor entre ambientes interno e externo.

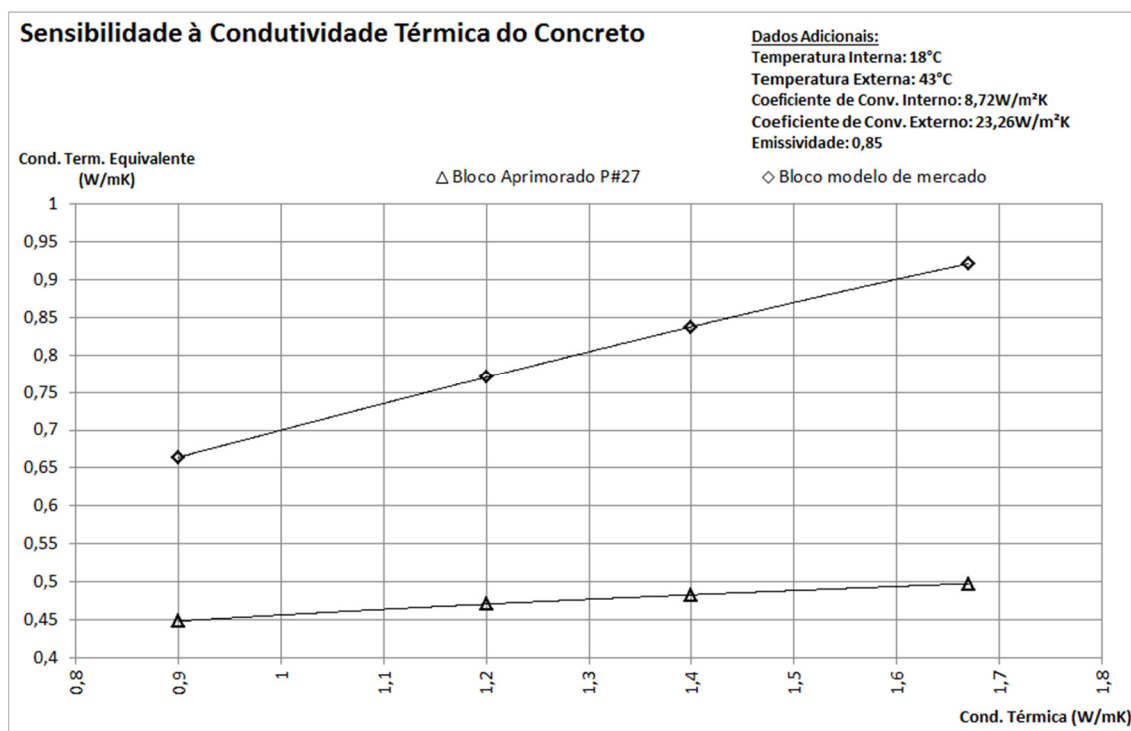


Figura 4.11 – Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função da condutividade térmica do concreto.

A sensibilidade da condutividade térmica equivalente, frente às variações das diferenças de temperaturas dos ambientes interno e externo, pode ser vista na Figura 4.12. A diminuição da temperatura reduz a condutividade térmica equivalente do concreto, sendo, portanto, diretamente proporcional. A diminuição do ΔT se deu com a progressiva redução da temperatura externa de 43,0°C para 35,0°C e em seguida para 27,0°C e então para 22,0°C. A temperatura interna foi mantida a 18°C. A redução da temperatura média do concreto aumenta a condutividade térmica do material [47], mas em escala muito pequena para a variação observada no gráfico. A diminuição do ΔT diminui os gradientes de temperatura internamente ao bloco de concreto, o que prevalece para o encontro da maior queda dos resultados de condutividade equivalente quando comparam-se os resultados encontrados com a variação dos

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

coeficientes de convecção. Nos dois casos o fluxo de calor é minimizado mas somente a diminuição do ΔT reduz os gradientes de temperatura internos.

Sabe-se que o fenômeno físico da condução está associado à transferência de energia de moléculas mais energéticas a outras menos energéticas devido a colisões entre as moléculas da substância. Maiores gradientes favorecem a colisão entre partículas vizinhas e conseqüentemente a transferência de calor.

Também, a atividade de convecção do ar internamente às cavidades é aumentada com maiores gradientes de temperatura, aumentando a parcela convectiva nas cavidades. Esses fenômenos embasam os resultados apresentados.

Para os blocos de mercado, a condutividade térmica equivalente varia de $0,91 \text{ W(mK)}^{-1}$ para 25°C de ΔT a $0,83 \text{ W(mK)}^{-1}$ para 4°C de ΔT . Já para os blocos aprimorados da Proposta #27, a condutividade térmica equivalente varia de $0,50 \text{ W(mK)}^{-1}$ para 25°C de ΔT a $0,29 \text{ W(mK)}^{-1}$ para 4°C de ΔT . A variação é maior para os blocos aprimorados que possuem maiores resistências térmicas, reduzindo muito os fluxos de calor e as atividades de convecção e radiação internamente às cavidades.

Tamanhas alterações da ETC em função do ΔT reforça a importância do trabalho do Capítulo 5 que investigará a influência de se detalhar o interior da parede durante análises dinâmicas e transientes de edificações.

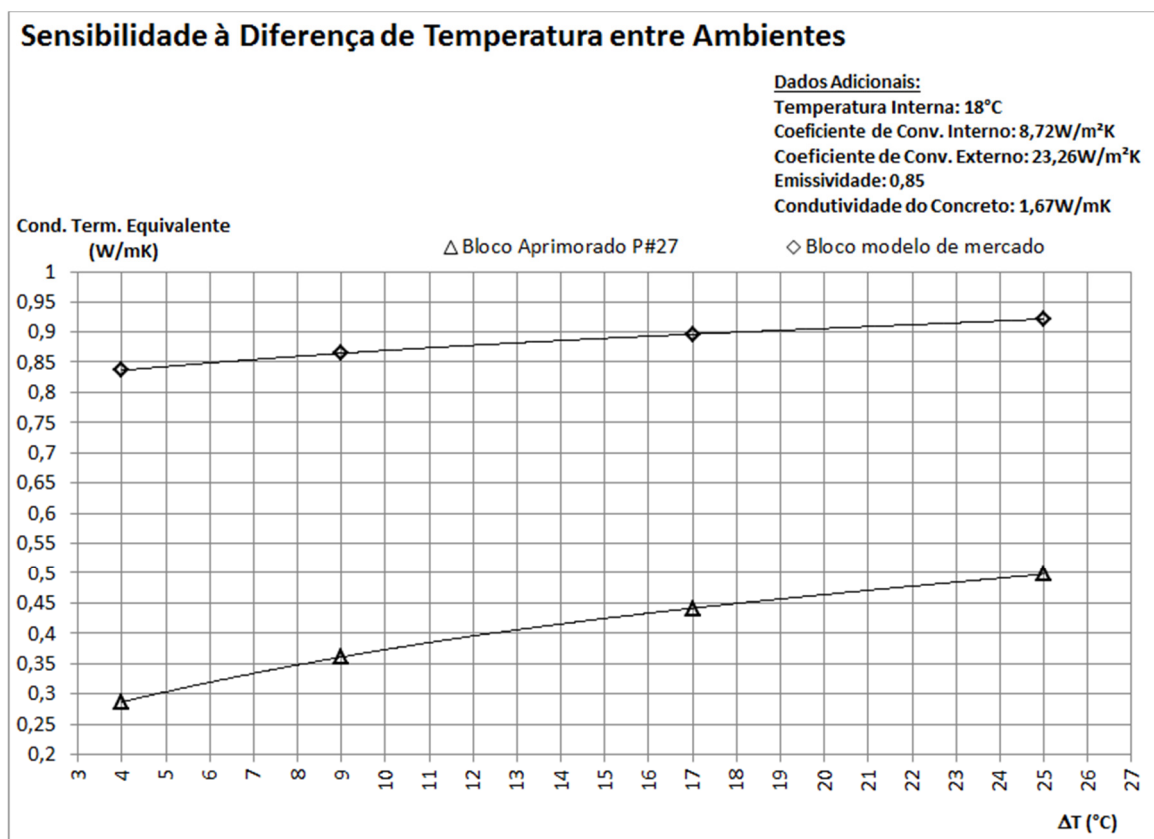


Figura 4.12 – Variação da Condutividade Térmica Equivalente em função do ΔT .

4.2 Estudos de Refino de Malha

Visto que as cavidades de ar internamente aos blocos são espaços relativamente pequenos onde se encontra ar em movimento em baixas velocidades, tornam-se necessárias malhas refinadas para obtenção de resultados precisos [17, 20, 37]. Portanto, importante verificar a dependência dos resultados ao refinamento da malha. Mostra-se abaixo os resultados do estudo realizado utilizando-se a Proposta #27.

No método de modelagem utilizado têm-se quatro domínios: Bloco Inferior, Bloco Superior, Ar e Argamassa. A malha é construída de modo independente, portanto o estudo avalia separadamente a interferência da malha de domínios de materiais diferentes: ar, blocos de concreto e argamassa.

A Figura 4.13 apresenta os resultados obtidos mantendo-se fixos os números de volumes finitos das malhas dos blocos e da argamassa e variando-se somente o número de volumes finitos da malha do ar. As malhas dos blocos e da argamassa estão refinadas, sendo que cada bloco contém 620 mil elementos e a malha da argamassa contém 650 mil elementos.

Analizando-se os resultados da condutividade térmica equivalente, onde a escala está no eixo vertical esquerdo, nota-se que com malhas abaixo de um milhão de elementos no domínio do ar, os resultados apresentam maiores oscilações, perdendo-se precisão nos resultados.

Observando-se os valores de fluxos radiativos e convectivos transmitidos na superfície quente do interior da primeira cavidade do bloco superior, também se vê que os resultados se mantêm estáveis com malhas a partir de 1 milhão de elementos. A Figura 4.14 mostra a superfície em questão, colorida em vermelho. Além do refino, foram aplicadas seis camadas de prismas triangulares ocupando quatro milímetros de espessura partindo das superfícies internas das cavidades, refinando as malhas próximas às paredes.

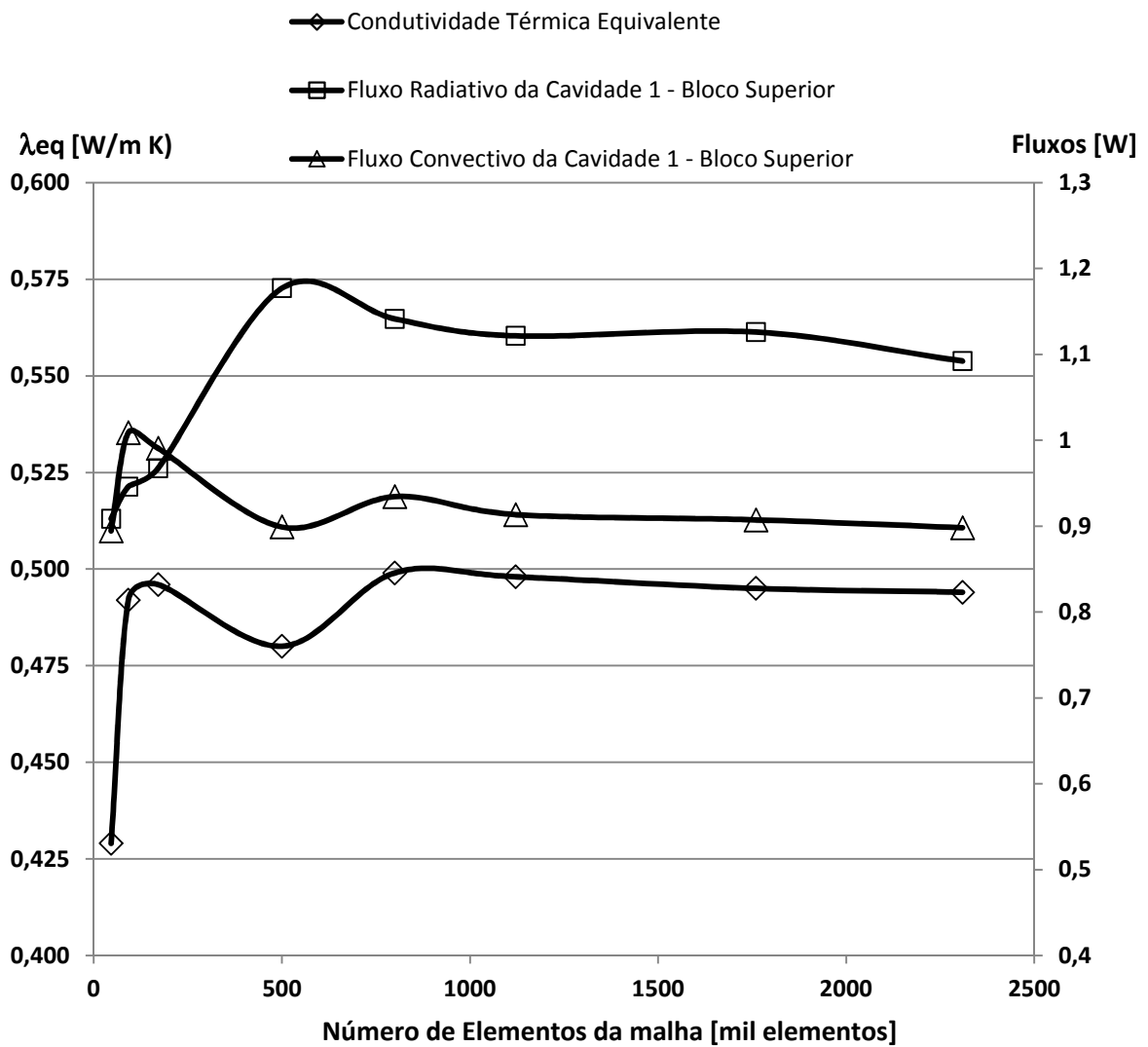


Figura 4.13 – Influência do número de elementos da malha no domínio do ar.

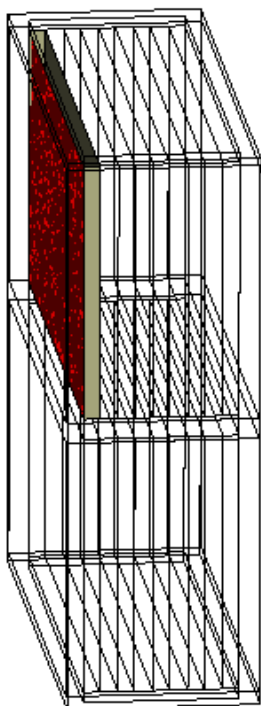


Figura 4.14– Superfície frontal da primeira cavidade do bloco superior.

A Figura 4.15 apresenta o estudo de malha para os domínios dos dois blocos de concreto. Os resultados de condutividade e de fluxos calculados se mantêm estáveis para malhas acima de oitenta mil elementos.

Para o domínio da argamassa, detectou-se que os resultados mantêm-se estáveis com malha a partir de vinte mil elementos.

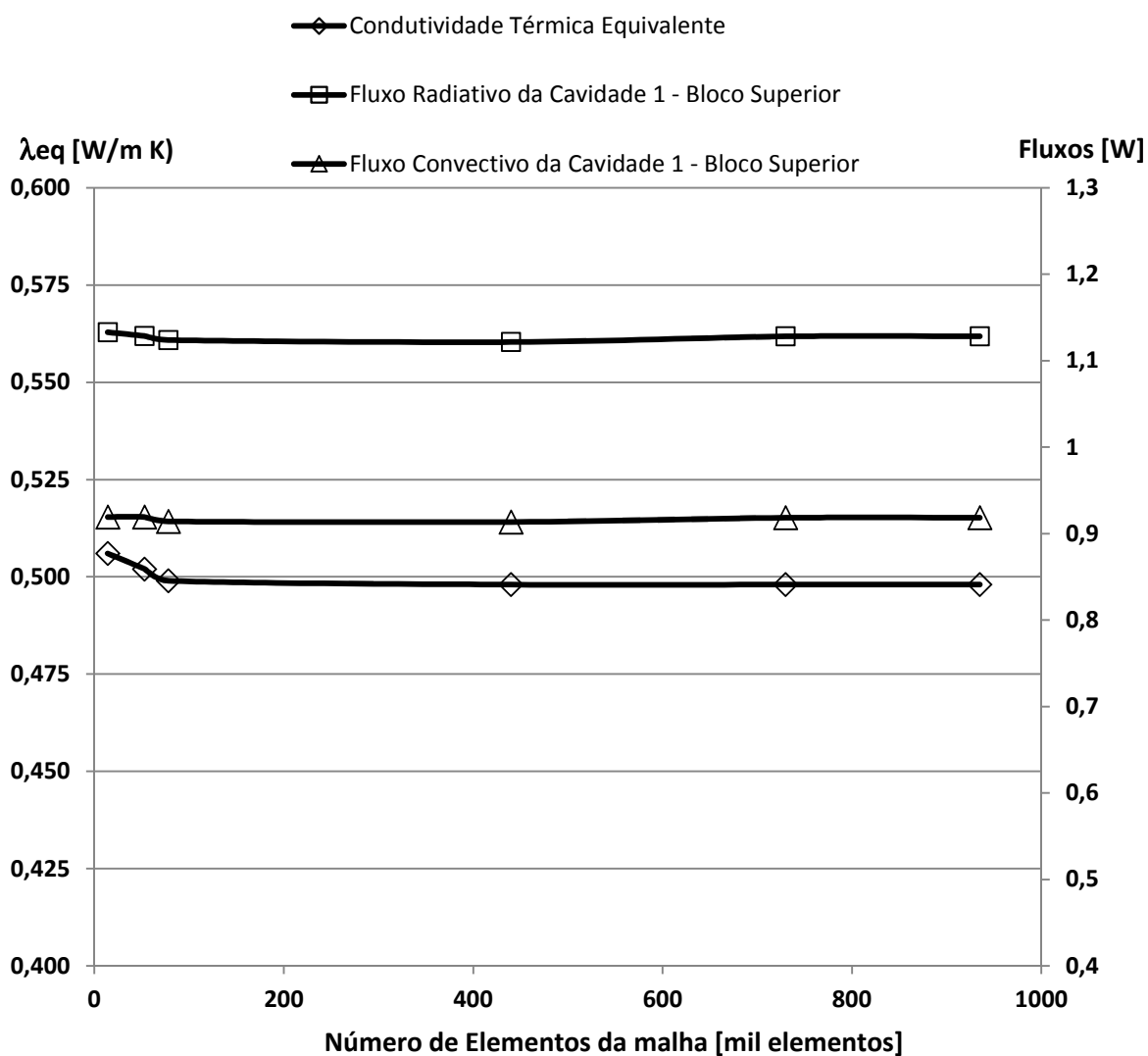


Figura 4.15 – Influência do número de elementos da malha nos domínios do bloco superior e do bloco inferior.

4.3 Influências do número de blocos sobrepostos

Como mencionado na seção de metodologia, o domínio utilizado no trabalho de aprimoramento do bloco de concreto é compreendido por dois blocos de concreto com aplicação de argamassa. A Figura 4.17 apresenta a relação da condutividade térmica com o número de blocos na altura, como ilustrado na Figura 4.16, com quatro blocos de mercado unidos com argamassa. Resultados mostram que dois blocos já são representativos para garantir uma boa precisão na presente análise em regime permanente, pois aumentando-se o número de blocos de 2 para 4, a condutividade foi reduzida em 0,8%. Já para um único bloco a condutividade aumenta em 1,9%. O uso de 2 blocos ao invés de 4 blocos reduz o tempo computacional para o alcance de resultados.

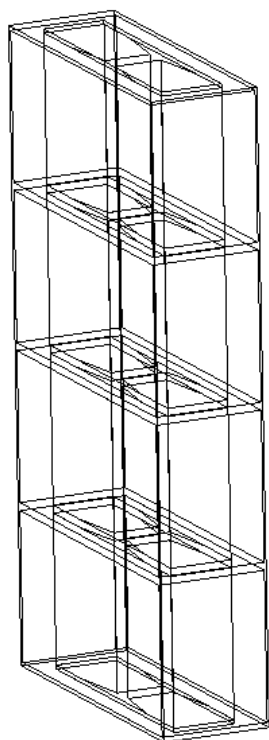


Figura 4.16 – Ilustração do número de blocos sobrepostos.

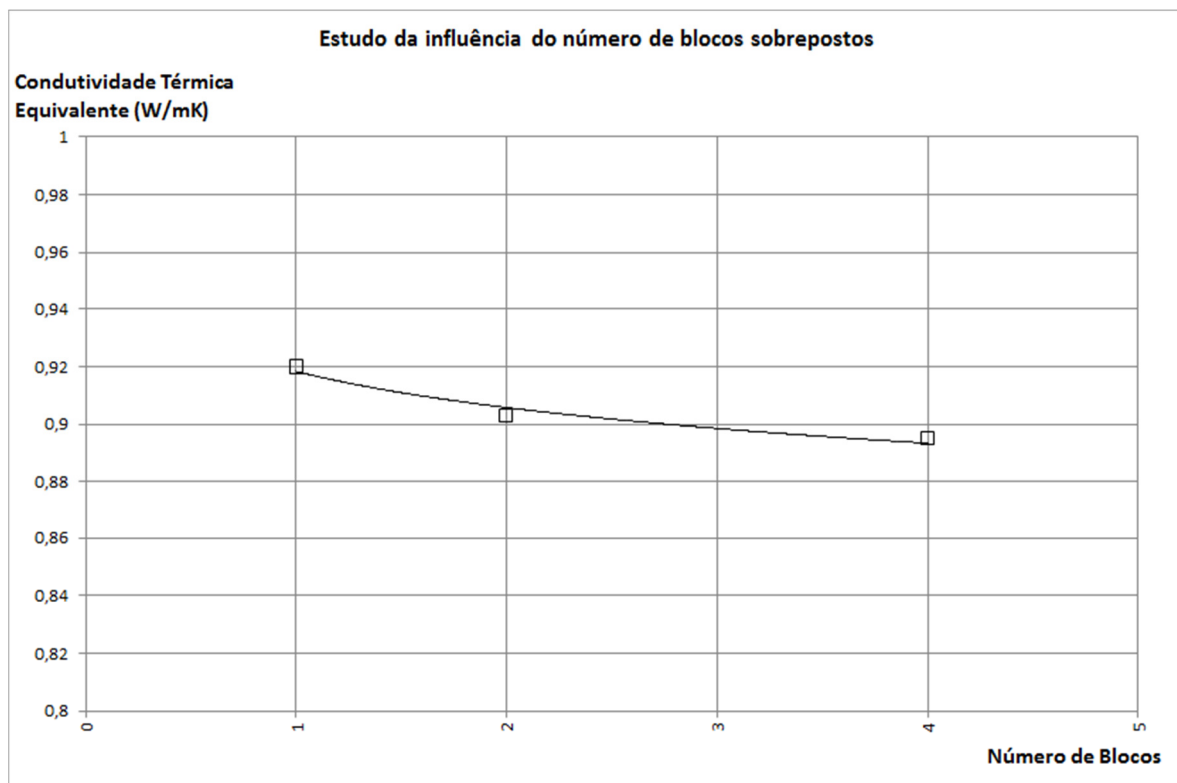


Figura 4.17 – Condutividade térmica equivalente em função do número de blocos sobrepostos.

4.4 Análise crítica do método de cálculo da norma NBR 15220

A norma brasileira NBR 15220 [5] – Desempenho Térmico de Edificações – define métodos de cálculos de transmitâncias térmicas de elementos e componentes de edificações, como por exemplo, tijolos e blocos de concreto, bem como de montagens de paredes. O método de cálculo é semelhante ao método proposto pela ISO 6946:1996 [13], mas com simplificações. A norma brasileira apresenta a Equação 4.7 para cálculo da resistência térmica da superfície interna à superfície externa de um componente ou de uma parede (R_t) constituído de seções homogêneas e não homogêneas como são os blocos de concreto e os tijolos com argamassa e revestidos de reboco, ver Figura 4.18.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (4.7)$$

Onde:

- A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas frontais de cada seção;
- R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas desde a superfície interna até a superfície externa de cada seção, em ($\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$), determinadas pela Equação 4.8:

$$R_n = R_1 + R_2 + \dots + R_N + R_{A1} + R_{A2} + \dots + R_{AN} \quad (4.8)$$

Onde:

- R_1, R_2, \dots, R_N são as resistências térmicas de cada camada dentro de uma mesma seção, em ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$); e

- $R_{A1}, R_{A2}, \dots, R_{AN}$ são as resistências térmicas de cada camada de ar dentro de uma mesma seção, em ($\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$).

As resistências de cada camada dentro de uma mesma seção (R_1, R_2, \dots, R_N) são calculadas em função das condutividades térmicas de cada material e a sua dimensão em profundidade, Equação 4.9.

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (4.9)$$

Para as cavidades de ar, nomeadas de câmaras não ventiladas pela norma, deve-se selecionar o valor de resistência térmica na tabela apresentada na Figura 4.19 (Tabela B1 da norma [5]).

Com o resultado da resistência térmica da parede de superfície à superfície, R_t , pode-se calcular o coeficiente global da parede, de ambiente à ambiente, R_T , dada pela Equação 4.10, onde R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna. A norma apresenta tabela de valores para estas resistências térmicas superficiais, mostrada na Figura 4.20. Os valores recomendados consideram efeitos de radiações, velocidade de ar sobre a superfície, temperaturas da superfície e do ar.

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (4.10)$$

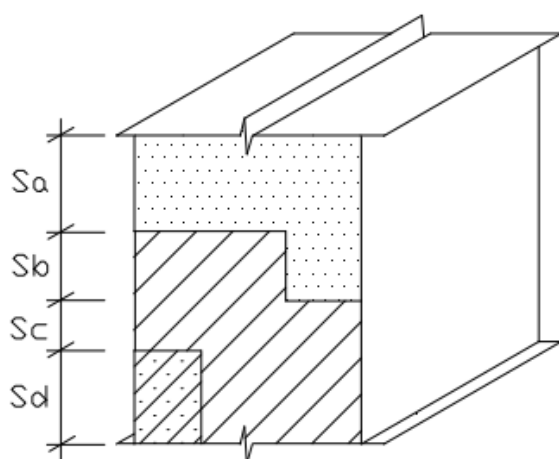


Figura 4.18 – Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas [5].

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2 \cdot K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		⇔	⇑	⇓
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Figura 4.19 – Tabela B.1 da norma - Resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas, com largura muito maior que a espessura [5].

$R_{si} (m^2 \cdot K)/W$			$R_{se} (m^2 \cdot K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇔	⇑	⇓	⇔	⇑	⇓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Figura 4.20 – Tabela A.1 da norma - Resistência térmica superficial interna e externa [5].

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

A norma brasileira define ainda limites máximos de coeficientes globais de transferência de calor para paredes externas a serem respeitados dentro do país, apresentados na Tabela 4.8. Tais valores limitam o uso dos blocos de concreto atuais, fato que motivou o trabalho de aprimoramento térmico apresentado nos Capítulos 3 e 4, pois, utilizando-se o método de cálculo da norma para obtenção do coeficiente global de transferência de calor de uma parede construída com os blocos de concreto de mercado estudados, chega-se a um valor de $2,77 \text{ W(mK)}^{-1}$. Foram utilizados os dados abaixo no cálculo:

- Parede construída com blocos de concreto 390 x 140 x 190 mm;
- Reboco em ambos os lados de espessura igual a 10mm;
- $\lambda_{\text{reboco}} = 0,72 \text{ W/(mK)}$;
- $\lambda_{\text{eq-bloco+argamassa}} = 0,86 \text{ W/(mK)}$, valor medido em laboratório;
- R_{si} (Resistência superficial interna) = $0.13 \text{ (m}^2\text{K)/W}$;
- R_{se} (Resistência superficial externa) = $0.04 \text{ (m}^2\text{K)/W}$.

A transmitância térmica da parede (U) calcula-se pela Equação 4.11:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_{\text{Si}} + \frac{L_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{L_{\text{bloco}}}{\lambda_{\text{eq-bloco}}} + \frac{L_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + R_{\text{Se}}} \quad (4.11)$$

O valor de $2,77 \text{ W(mK)}^{-1}$ excede o máximo recomendado para paredes externas de edificações construídas nas zonas climáticas 1 e 2. Adicionalmente, seria um valor adequado segundo a norma, para as demais zonas climáticas somente em caso de pintura de fachada em cores claras, como o branco, amarelo claro, “alumínio” e verde claro. Lembra-se que a norma classifica e divide todas

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

as regiões do mapa do Brasil em 8 zonas climáticas de acordo com o clima local de cada região. A Figura 4.21 mostra o mapa brasileiro de acordo com esta classificação. Observa-se que grande parte do sul do país e regiões do sudeste brasileiro encontram-se nas zonas 1 e 2. Contudo, reforça-se o entendimento da importância do aprimoramento do desempenho térmico do bloco de concreto.

Tabela 4.8 – Transmitâncias térmicas de paredes externas segundo norma NBR 15575.

Transmitância Térmica de paredes externas - $W (m^2K)^{-1}$		
ZONAS 1 e 2	ZONAS 3,4,5,6,7,8	
$U \leq 2,5$	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

*As normas NBR 15220 [5] e NBR 15575 [6] apresentam os requisitos mínimos que as edificações brasileiras devem atender quanto ao seu desempenho térmico visando o alcance de conforto térmico ao menor custo ou necessidade de equipamentos de climatização.

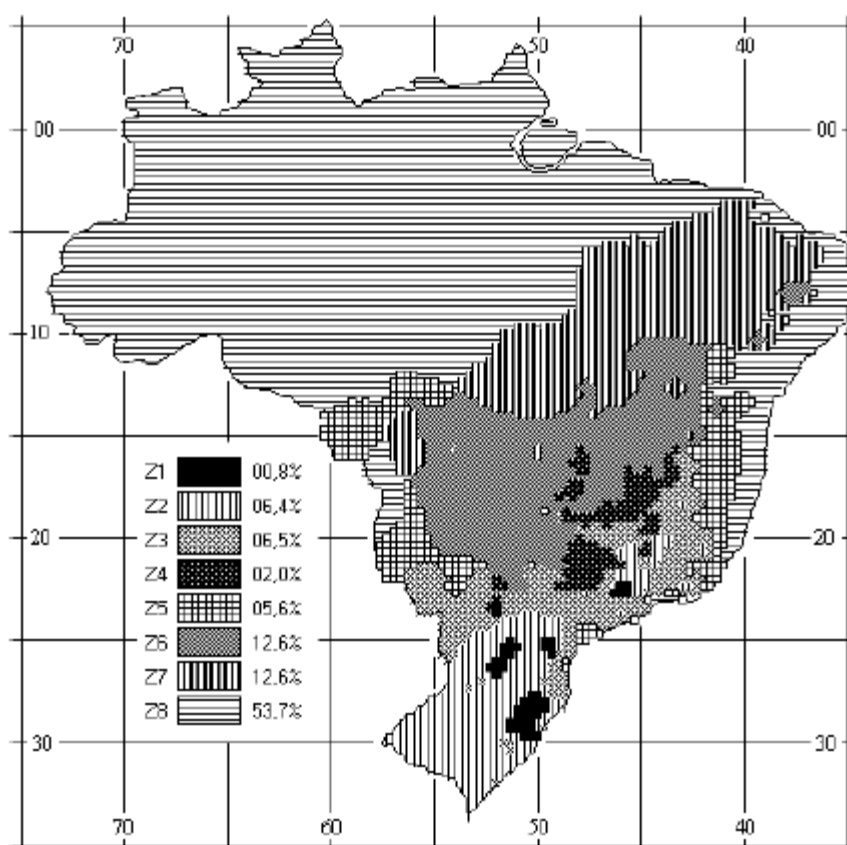


Figura 4.21 – Zoneamento bioclimático brasileiro [5].

4.4.1 Avaliação da Condutividade Equivalente pelo método da norma

Quatro blocos modelados no trabalho de aprimoramento tiveram suas condutividades térmicas equivalentes avaliadas segundo a norma, o bloco original de mercado e as Propostas #3, #24 e #27:

4.4.1.1 Bloco original (C2P1)

Para cálculo da resistência térmica de superfície à superfície da montagem do bloco original de mercado com argamassa, divide-se o bloco em diferentes seções, nomeadas de *A* até *E* na Figura 4.22. Para este cálculo considerou-se que as cavidades são retangulares e de canto vivo. Importante ressaltar que a espessura da argamassa é de 5mm em todo o contorno do bloco e as espessuras das paredes, nomeadas com a letra *D*, são de 30mm.

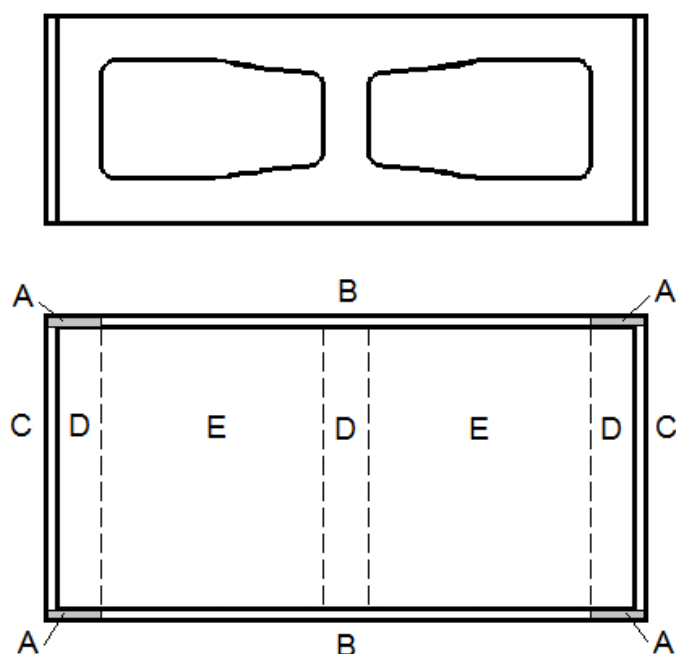


Figura 4.22 – Bloco de concreto atual do mercado dividido em seções.

Contudo calculam-se as áreas frontais de cada seção e em seguida determinam-se suas resistências térmicas:

$$A_A = 0,0007m^2$$

$$A_B = 0,0033m^2$$

$$A_C = 0,0019m^2$$

$$A_D = 0,0171m^2$$

$$A_E = 0,057m^2$$

$$R_A = \frac{L}{\lambda} = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_B = 0,2533(m^2K)W^{-1}$$

$$R_C = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_D = 0,0838(m^2K)W^{-1}$$

$$R_E = 0,20593(m^2K)W^{-1}$$

Pode-se então calcular a resistência total da montagem e em seguida a condutividade térmica equivalente:

$$R_t = 0,1577(m^2K)W^{-1}$$

$$\lambda_{eq} = \frac{L}{R_t} = 0,888W(mK)^{-1}$$

4.4.1.2 Proposta #3 (C2P2)

A Figura 4.23 apresenta a divisão de seções para a Proposta #3 da mesma forma que a proposta anterior mas contém uma seção a mais, chamada de F , pois a espessura da parede central é de 18mm, sendo que as paredes externas têm 30mm.

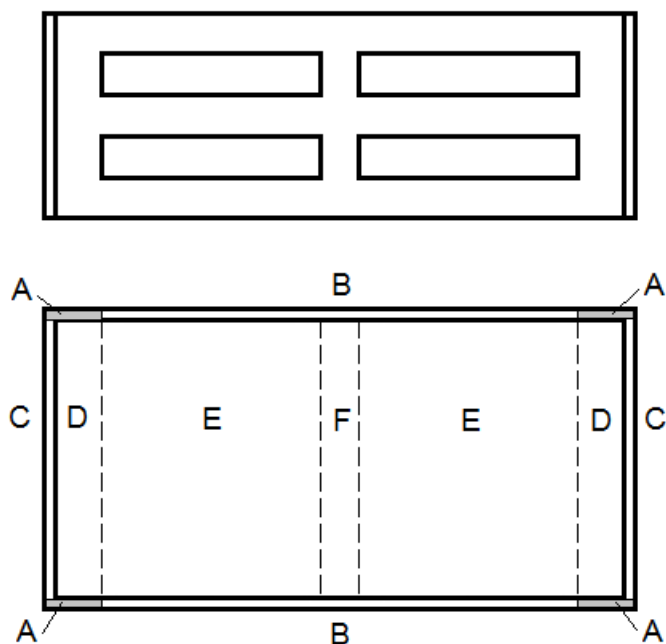


Figura 4.23 – Bloco de concreto da Proposta #3 dividido em seções.

Calculam-se abaixo as áreas frontais de cada seção e em seguida determinam-se suas resistências térmicas, para então

$$A_A = 0,0007m^2$$

$$A_B = 0,0033m^2$$

$$A_C = 0,0019m^2$$

$$A_D = 0,0114m^2$$

$$A_E = 0,05928m^2$$

$$A_F = 0,00342m^2$$

$$R_A = \frac{L}{\lambda} = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_B = 0,2533(m^2K)W^{-1}$$

$$R_C = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_D = 0,0838(m^2K)W^{-1}$$

$$R_E = 0,36671(m^2K)W^{-1}$$

$$R_F = 0,0838(m^2K)W^{-1}$$

Pode-se então calcular a resistência total da montagem e em seguida a condutividade térmica equivalente:

$$R_t = 0,21923(m^2K)W^{-1}$$

$$\lambda_{eq} 0,639W(mK)^{-1}$$

4.4.1.3 Proposta #24 (C1P2)

A Proposta #24 tem suas seções divididas conforme mostra a Figura 4.24. A Proposta #24 tem a espessura das paredes laterais em 10mm, a profundidade das cavidades com 29,5mm e as paredes longitudinais têm espessuras de 27mm.

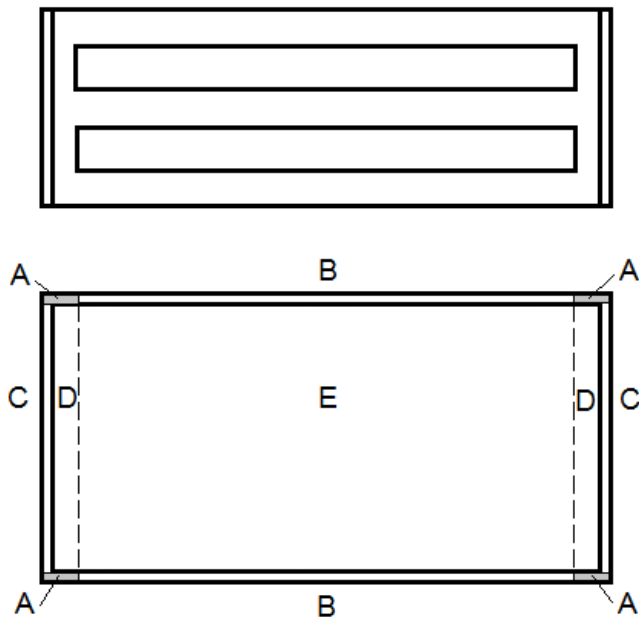


Figura 4.24 – Bloco de concreto da Proposta #24 dividido em seções.

Calculam-se abaixo as áreas frontais de cada seção e em seguida determinam-se suas resistências térmicas:

$$A_A = 0,0003m^2$$

$$A_B = 0,0037m^2$$

$$A_C = 0,0019m^2$$

$$A_D = 0,0038m^2$$

$$A_E = 0,370 \cdot 0,190 = ,0703m^2$$

$$R_A = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_B = 0,245(m^2K)W^{-1}$$

$$R_C = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_D = 0,0838(m^2K)W^{-1}$$

$$R_E = 0,3685(m^2K)W^{-1}$$

Pode-se então calcular a resistência total da montagem e em seguida a condutividade térmica equivalente:

$$R_t = 0,3047(m^2K)W^{-1}$$

$$\lambda_{eq} = \frac{L}{R_t} = 0,4594W(mK)^{-1}$$

4.4.1.4 Proposta #27 (C1P5)

A Figura 4.25 mostra como a Proposta #27 foi dividida em seções. Nela, a espessura das paredes laterais também são de 10mm, são 5 cavidades com profundidades de 11,8mm e as paredes longitudinais têm espessuras de 13,5mm. Calculam-se abaixo as áreas frontais de cada seção e em seguida determinam-se suas resistências térmicas:

$$A_A = 0,0003m^2$$

$$A_B = 0,0037m^2$$

$$A_C = 0,0019m^2$$

$$A_D = 0,0038m^2$$

$$A_E = 0,0703m^2$$

$$R_A = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_B = 0,2075(m^2K)W^{-1}$$

$$R_C = 0,19444(m^2K)W^{-1}$$

$$R_D = 0,0838(m^2K)W^{-1}$$

$$R_E = 0,7081(m^2K)W^{-1}$$

Pode-se então calcular a resistência total da montagem e em seguida a condutividade térmica equivalente:

$$R_t = 0,4604(m^2K)W^{-1}$$

$$\lambda_{eq} = \frac{L}{R_t} = 0,3041W(mK)^{-1}$$

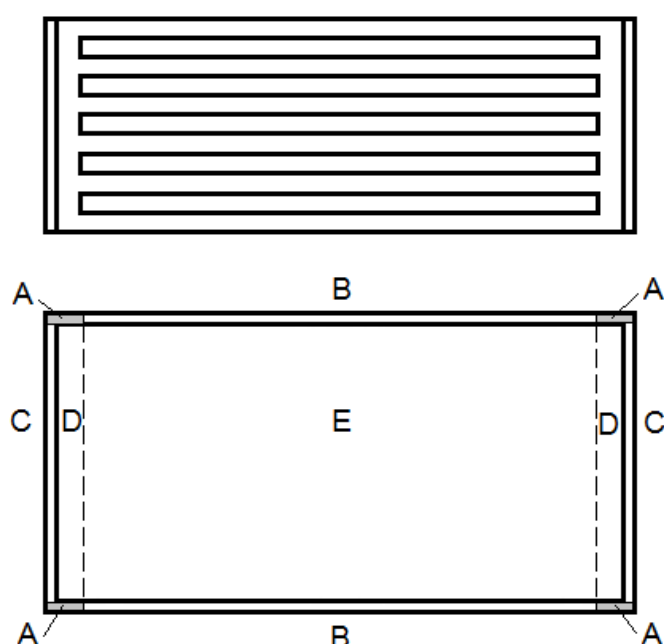


Figura 4.25 – Bloco de concreto da Proposta #27 dividido em seções.

4.4.2. Avaliação dos resultados e das hipóteses consideradas na norma

Um quadro resumo dos resultados é apresentado na **Tabela 4.9**. Para o bloco original de mercado, o resultado é muito próximo ao resultado simulado.

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

Mas nota-se rapidamente que a norma superestima as resistências térmicas das cavidades, isso se observa com o decréscimo da condutividade conduzido pelo aumento do número de cavidades ao longo da profundidade do bloco. Enquanto que através das simulações a condutividade caiu 37,8% para a Proposta #24 em relação ao original, pela norma a condutividade caiu 48,3%. A tabela B.1 da norma (Figura 4.19) deveria apresentar valores de resistência térmica com maior precisão, com menor escala na variação de espessura da câmara de ar. Da mesma forma, variações de emissividade entre 0,8 e 0,95 deveriam ser consideradas, como mostra a Figura 4.8 na seção de análises paramétricas.

Os valores encontrados através dos cálculos da norma seriam mais próximos dos simulados caso as simulações fossem realizadas com reduzidas diferenças de temperaturas entre os ambientes interno e externo, ou seja, ΔT próximo de 4°C, é o que sugere os resultados da Figura 4.12 a reduzidos ΔT s, apresentados na análise paramétrica. Porém, pequenos ΔT s não estão de acordo com as práticas comuns em ensaios conforme [32, 47].

Tabela 4.9 – Quadro resumo.

Caso	λ_{eq} (Ansys)	λ_{eq} (NBR)
Bloco Original	0,906 (100%)	0,888 (100%)
Proposta #3	0,707 (78,0%)	0,639 (72,0%)
Proposta #24	0,564 (62,2%)	0,459 (51,7%)
Proposta #27	0,498 (55,0%)	0,304 (34,2%)

Analisando os valores de resistências térmicas de cavidades de ar sugeridas na norma ISO 6946 [13] – Tabela 2 da norma, observa-se maior preocupação com a variação da resistência em função da espessura da cavidade

Capítulo 4: Resultados do aprimoramento do desempenho do bloco de concreto

e indica ao usuário a interpolação para espessuras intermediárias, mas os valores de resistência também são elevados e resultam em condutividades térmicas mais baixas.

Tabela 4.10 – Tabela 2 da ISO [13] – Resistência térmica da camada de ar não ventilada para superfícies com emissividade acima de 0,8, em $(m^2K).W^{-1}$.

Espessura da camada de ar (mm)	Direção do fluxo de calor		
	Para cima	Horizontal	Para baixo
0	0,00	0,00	0,00
5	0,11	0,11	0,11
7	0,13	0,13	0,13
10	0,15	0,15	0,15
15	0,16	0,17	0,17
25	0,16	0,18	0,19
50	0,16	0,18	0,21
100	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	-,23

Outras hipóteses assumidas pela NBR também contribuem para o aumento de erros e incertezas do método de cálculo apresentado, são elas:

- i) Como visto no presente estudo, o ar das cavidades mais próximas aos ambientes interno e externo apresentam campos de velocidades com valores de maiores magnitudes, influenciando no coeficiente de convecção e diferenciando as resistências térmicas destas cavidades em relação às demais. A norma determina valores de resistência térmica somente em função da profundidade e emissividade da cavidade.

- ii) A condução 1-D em cada seção, nos materiais sólidos, despreza as parcelas de calor que desviam as resistências térmicas impostas pelas cavidades de ar, o que aumentaria o fluxo de calor nas pontes sólidas, como apontado em [15];
- iii) A comunicação entre cavidades de blocos diferentes e de seções diferentes do mesmo bloco tornam o comportamento de transferência de calor tridimensional, a norma considera um único bloco; e
- iv) A norma ignora variações de diferenças de temperaturas, que influenciam na atividade de convecção internamente às cavidades e nos gradientes internos ao bloco, alterando a condutividade térmica equivalente do bloco de concreto, efeito evidenciado na Figura 4.12 da análise paramétrica deste capítulo.

A análise crítica realizada na presente seção encontra divergências entre valores calculados e valores simulados. Credita-se os erros à norma, tais créditos ganham apoio quando se verifica que os valores calculados estão muito baixos, Por exemplo, o valor encontrado para bloco da proposta #27 através do método da norma é muito inferior também às condutividades térmicas equivalentes encontradas para as configurações otimizadas em outros trabalhos, por exemplo [19, 20, 22]. Recomendam-se estudos mais aprofundados em trabalhos futuros para maiores esclarecimentos sobre as diferenças encontradas e, contudo, propor correções ao método normalizado.

5 RESULTADOS OBTIDOS COM O ACOPLAMENTO ENTRE SOFTWARES BES - CFD

Neste capítulo se iniciam os estudos que avaliam ganhos em precisão de resultados com o uso do acoplamento BES-CFD, comparando-se os resultados encontrados a simulações realizadas no software de BES, utilizando-se das mesmas configurações de ambiente, de paredes e de condições de contorno. Adicionalmente varia-se a criticidade dos usuários definidos na Seção 3.1. A metodologia dos quatro casos está descritas no Capítulo 3. Os Casos 1, 3 e 4 fazem tais comparações entre métodos BES e acoplamento BES-CFD. O Caso 2 avalia o desempenho do bloco aprimorado da proposta #27 frente ao bloco atual do mercado brasileiro.

Grande parte das figuras que mostram os resultados de tais casos, nas próximas seções, apresentam os resultados para duas ou mais situações, como mostradas a seguir:

- A) Método BES com a parede configurada com os materiais da biblioteca do Domus, utilizando as propriedades equivalentes da biblioteca, simulando o uso do programa por um usuário básico;
- B) Método BES com os elementos da parede configurada com propriedades calculadas de acordo com procedimento da norma [5], simulando o uso do programa por um usuário profissional.
- C) Método BES com a condutividade térmica equivalente obtida através de simulação no CFD, com seus elementos detalhados, de acordo com metodologia similar à descrita na Seção 3.2, simulando o uso do programa por um usuário avançado; e

- D) Método acoplado BES-CFD que detalha os elementos da parede com suas cavidades, levando em conta os fenômenos físicos da dinâmica dos fluidos e da transferência de calor internamente à parede durante todo o transiente.

Deste modo, com as quatro situações acima, visualiza-se o ganho de precisão nos resultados com o uso do método acoplado BES-CFD frente ao uso do BES para as situações mais comuns encontradas em estudos energéticos de edificações (A e B) e também avalia-se o ganho unicamente do detalhamento interno da parede em CFD durante o transiente quando se compara situações C e D, desde que em C, as propriedades foram obtidas pelo mesmo CFD.

5.1 Verificação da co-simulação BES-CFD

Primeiramente faz-se uma verificação na funcionalidade do método de co-simulação. Como metodologia modelam-se blocos maciços no CFD, sem cavidades e com as mesmas propriedades equivalentes utilizadas no BES. Desta forma faz-se análises idênticas, em ambos os métodos, da temperatura de superfície interna da parede sob análise do ambiente de teste da Figura 3.7. Conforme resultados apresentados na Figura 5.1, comparando-se a variação da temperatura interna do ambiente ao longo do dia, a cada 20 minutos, nota-se concordância, com pequenas diferenças de até $0,15^{\circ}\text{C}$ (0,64%), portanto assume-se que esta é a magnitude aproximada do erro relativo ao compararmos resultados de ambos os métodos de simulação. Uma diferença compreensível desde que aplicam métodos numéricos bastante distintos, portanto, considerou-se que o método aplicado para co-simulação está consistente.

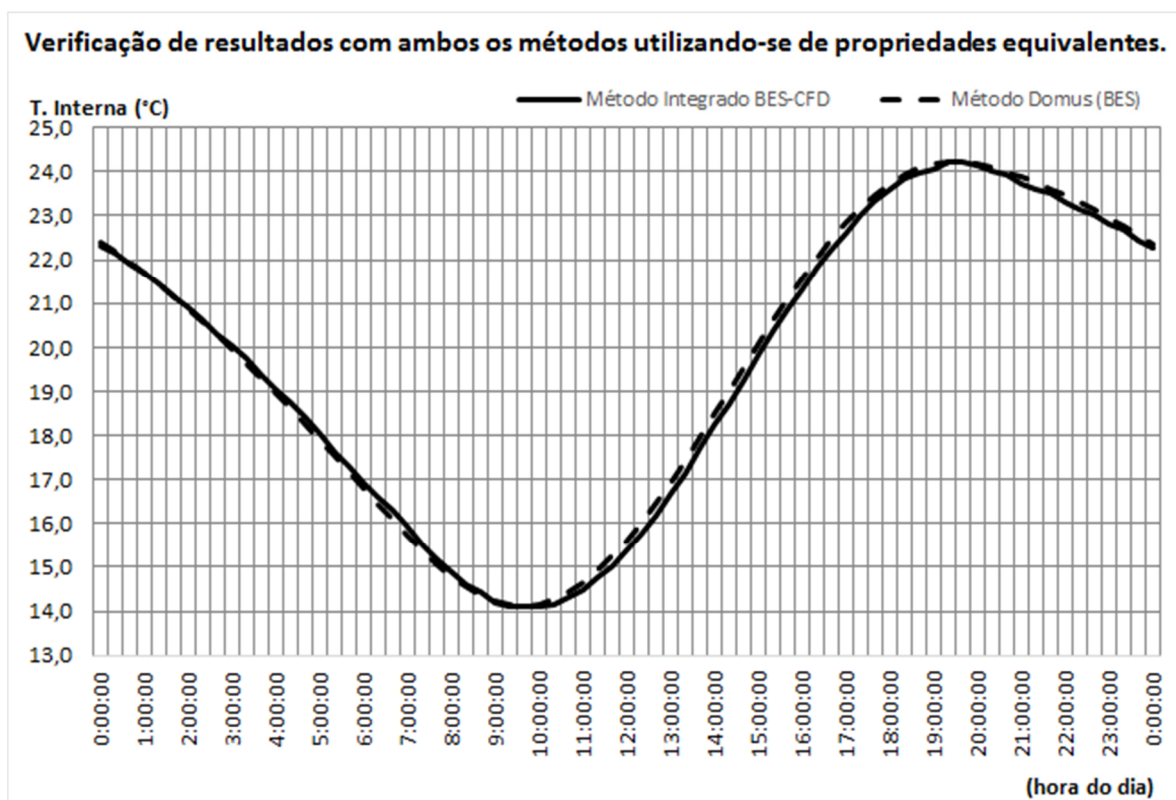


Figura 5.1 – Temperatura interna obtida por ambos os métodos de simulação com bloco maciço com fim de validação.

5.2 Resultados do Caso 1 - Análise do acoplamento BES-CFD

A seguir, na Seção 5.2.1, simulações são realizadas com a temperatura do ambiente livre e na seção seguinte, com a temperatura do ambiente fixa.

5.2.1 Temperatura Interna Livre

A Figura 5.2 apresenta a variação da temperatura interna do ambiente da Figura 3.7. Os resultados mostrados são do quinto dia, onde já se encontram estáveis. Os resultados mostram que para este primeiro caso, onde a temperatura da sala permanece livre e, portanto, a única fonte de calor é a parede sob análise e a temperatura da superfície interna da parede permanece sempre muito próxima à temperatura da sala, a taxa de transferência de calor é minimizada. Ocorre então que a temperatura da sala ao longo do dia, para o novo método acoplado BES-CFD, onde se modela as cavidades internas da parede, permanece muito próxima ao método de simulação do Domus que utiliza propriedades equivalentes calculadas no mesmo CFD. Isso ocorre também porque somente uma parede do ambiente está apta a transferir calor, o que minimiza a influência das condições externas na temperatura interna do ambiente. As demais simulações e resultados, a partir da próxima seção, terão a temperatura interna fixa, condição ideal de ambiente climatizado. Com a temperatura interna fixa, qualificam-se as análises ao se comparar temperaturas da superfície interna da parede e fluxos de calor que a percorrem.

Assim mesmo, os resultados de temperatura interna para a simulação do usuário básico têm resultados com importante nível de erro, alcançando $1,2^{\circ}\text{C}$ no fim de tarde. O erro *rms* –*root mean square*, presente no gráfico, aponta $0,74^{\circ}\text{C}$. Erros expressivos para simulações que buscam, por exemplo a análise de classificação energética de uma nova edificação.

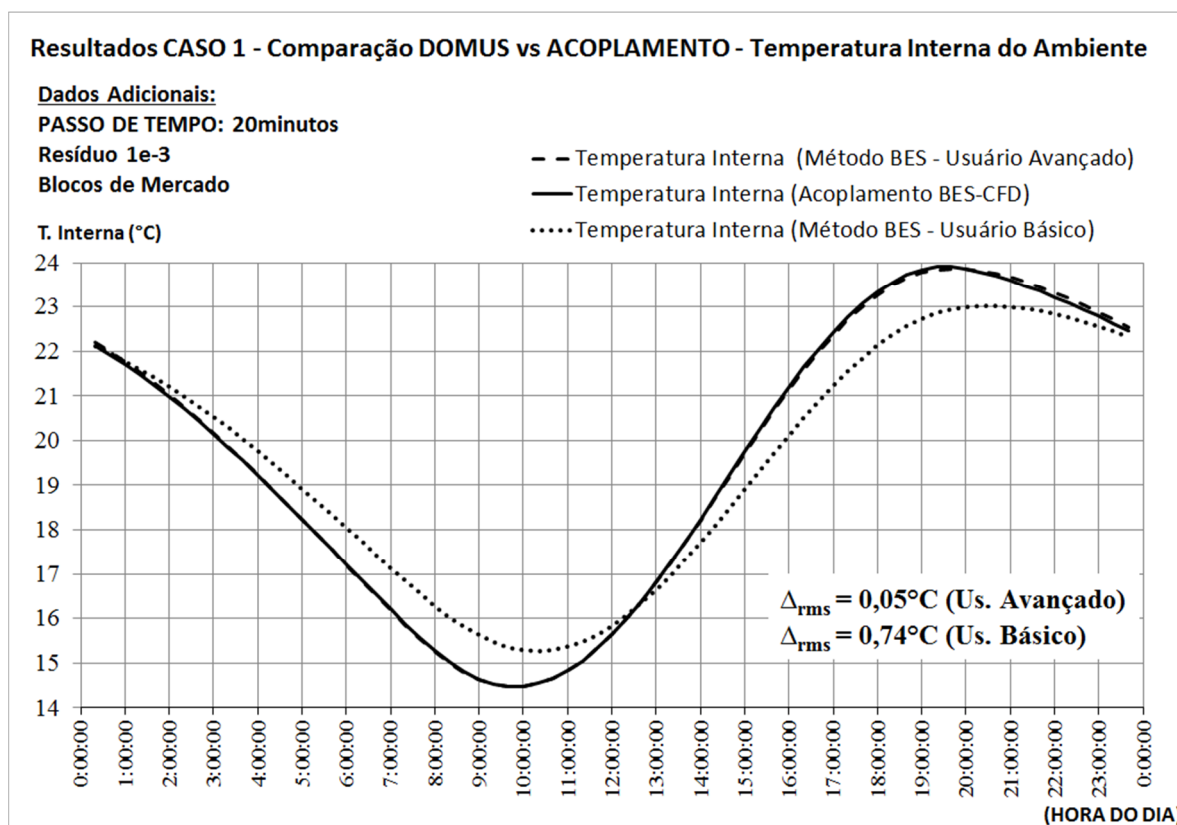


Figura 5.2 – Resultados da temperatura interna livre para Caso 1 – Blocos originais de mercado.

5.2.2 Temperatura Interna Fixa

5.2.2.1 Com o Bloco de concreto modelo atual de mercado

A Figura 5.3 apresenta a variação da temperatura da superfície interna da parede sob análise, quando comparados os métodos de simulação para o bloco de mercado. O ambiente simulado é o apresentado na Figura 3.8. Os resultados apresentados são para o sexto ciclo de 1 dia, o que garante convergência

conforme mostra a Figura 5.5. Os resultados mostram que para este caso com blocos de concreto originais de mercado, as diferenças de resultados não são tão importantes quando comparam-se os métodos BES (usuário avançado) e BES-CFD. Lembra-se que o usuário avançado configurou as propriedades equivalentes do bloco com os valores obtidos em simulação no CFD, em regime permanente. Foram evidenciadas diferenças de temperaturas em torno de $0,2^{\circ}\text{C}$. Importante observar que as diferenças de temperaturas são próximas ao encontrado na verificação da Seção 4.2.1, mas agora o BES apresenta temperaturas mais baixas, o que sugere uma variação de $0,35^{\circ}\text{C}$ nos pontos com maiores divergências. As maiores diferenças ocorreram nos horários de pico de temperaturas externas baixas e elevadas, chegando a $0,25^{\circ}\text{C}$ de diferença entre métodos de simulação por volta das 15h da tarde. A média *rms* é de $0,14^{\circ}\text{C}$.

Quando se compara a simulação de um usuário básico, lembrando que este utilizou as propriedades equivalentes constantes na biblioteca do programa de BES, encontram-se diferenças de resultados bastante expressivas das 0h até às 12h, alcançando $1,04^{\circ}\text{C}$ de diferença, e um pouco menos expressivas no período da tarde. O erro *rms* é de $0,64^{\circ}\text{C}$. Para evidenciar o quão importante são estas diferenças, a Figura 5.4 apresenta os valores do fluxo de calor de calor na parede sob análise, calculados através da Equação 3.15, em Wm^{-2} , com o método do *BES* para ambas as simulações e sob o método acoplado para o mesmo caso. Valores negativos de fluxo representam o calor que deixa o ambiente. Os fluxos de calor variam de $-36,7$ a $11,7\text{Wm}^{-2}$. As diferenças instantâneas são de até $3,0\text{Wm}^{-2}$ comparando-se as diferenças entre métodos de simulação.

Já o usuário básico tem seus resultados com erros de até $9,0\text{Wm}^{-2}$. A importância destas diferenças encontradas pode ser confirmada analisando-se a energia em kJ que entra e que sai do ambiente durante as 24 horas nos dois métodos de simulação. A Tabela 5.1 apresenta as energias totais transferidas

através da parede sob análise e quanto representam as diferenças encontradas entre os dois métodos. Os maiores fluxos ocorrem quando se leva em conta a modelagem detalhada no interior da parede, pois, elevou-se em 2,5% o calor transferido para fora do ambiente e elevou-se 15,4% o calor transferido para dentro do ambiente nos períodos de temperatura elevada na superfície externa da parede. Se somados os módulos das quantidades que entram e que saem do ambiente para os dois casos, a diferença eleva-se a 4,2%. São ganhos importantes de precisão apesar de não serem tão expressivos para este caso com blocos de configuração atual de mercado. Contudo, nesta configuração o método utilizado pelo programa de BES apresenta bons resultados.

Para a simulação do usuário básico, a energia transferida para fora do ambiente é 25,1% menor, uma quantidade expressiva que valoriza o uso do acoplamento BES-CFD. Qualquer usuário ao utilizar-se do método acoplado BES-CFD para simulação de um caso está minimizando a possibilidade de gerar erros, pois não depende de cálculos de propriedades equivalentes dos elementos da parede.

Tabela 5.1 – Quantidade de calor transferido Domus vs. Acoplamento Domus-Ansys-CFX com blocos originais de mercado.

Energia	Domus	Domus	Acoplamento	Diferença	Diferença
	U. Básico	U. Avançado			
	(1)	(2)	(3)	(1 – 3)	(2 – 3)
$E_{T_saída}$ (kJ)	-19.729	-26.324	-26.978	36,7	2,5
$E_{T_entrada}$ (kJ)	3.628	4.137	4.773	31,6	15,4

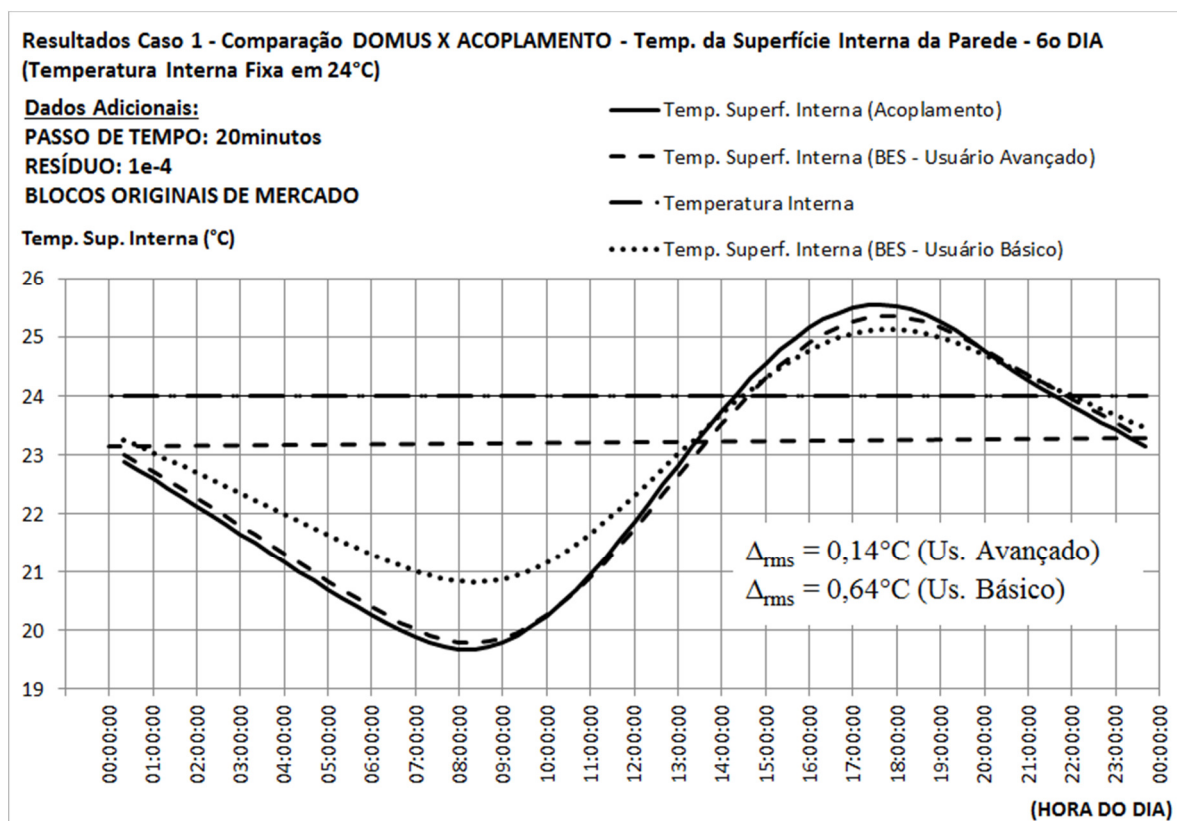


Figura 5.3 – Resultados da temp. da superfície interna para Caso 1 com temperatura interna fixa e bloco de mercado.

A Figura 5.5 faz a análise de convergência dos resultados da Figura 5.3, mostrando resultados do primeiro ao quarto dia, ilustrando que a partir do quarto dia já não há efeitos das condições iniciais. Os quinto e sexto dias não estão plotados para facilitar a visualização no gráfico. Ao longo dos 72 horários monitorados, as diferenças de temperaturas entre o quarto e o sexto dia são inferiores a $0,06^{\circ}\text{C}$ para esta análise.

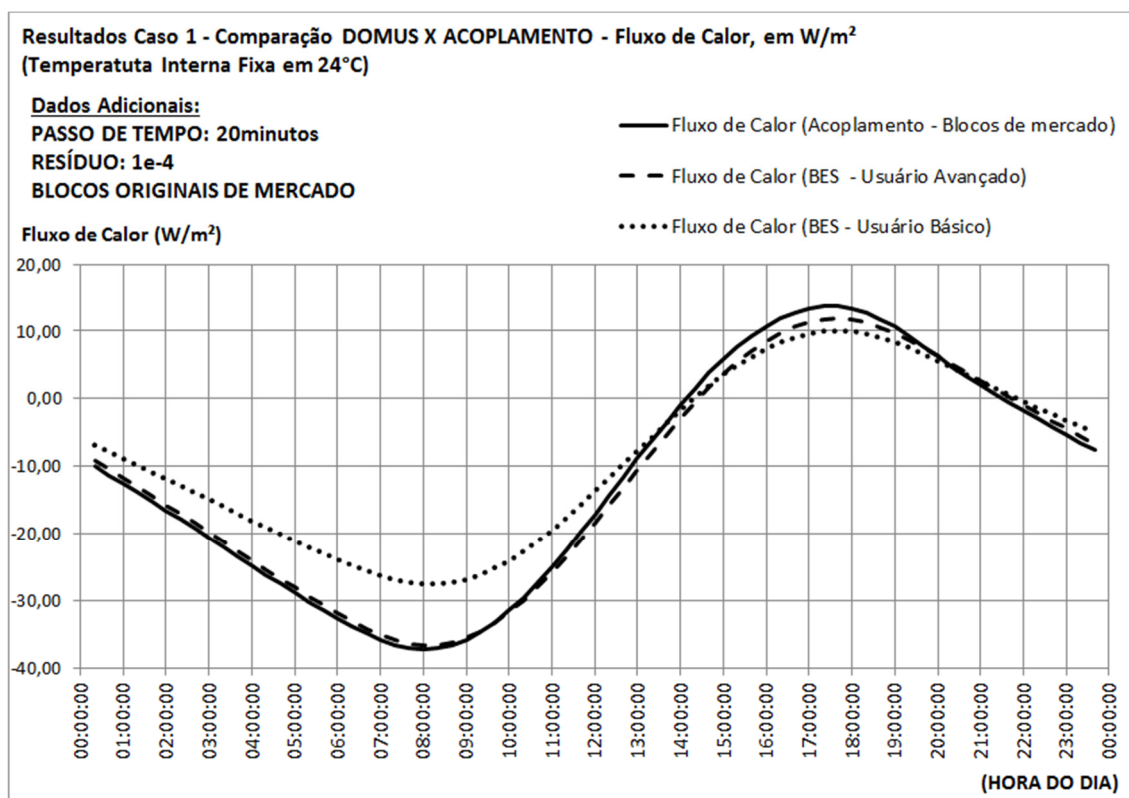


Figura 5.4 – Fluxo de calor para Caso 1 com temp. interna fixa e Blocos de mercado.

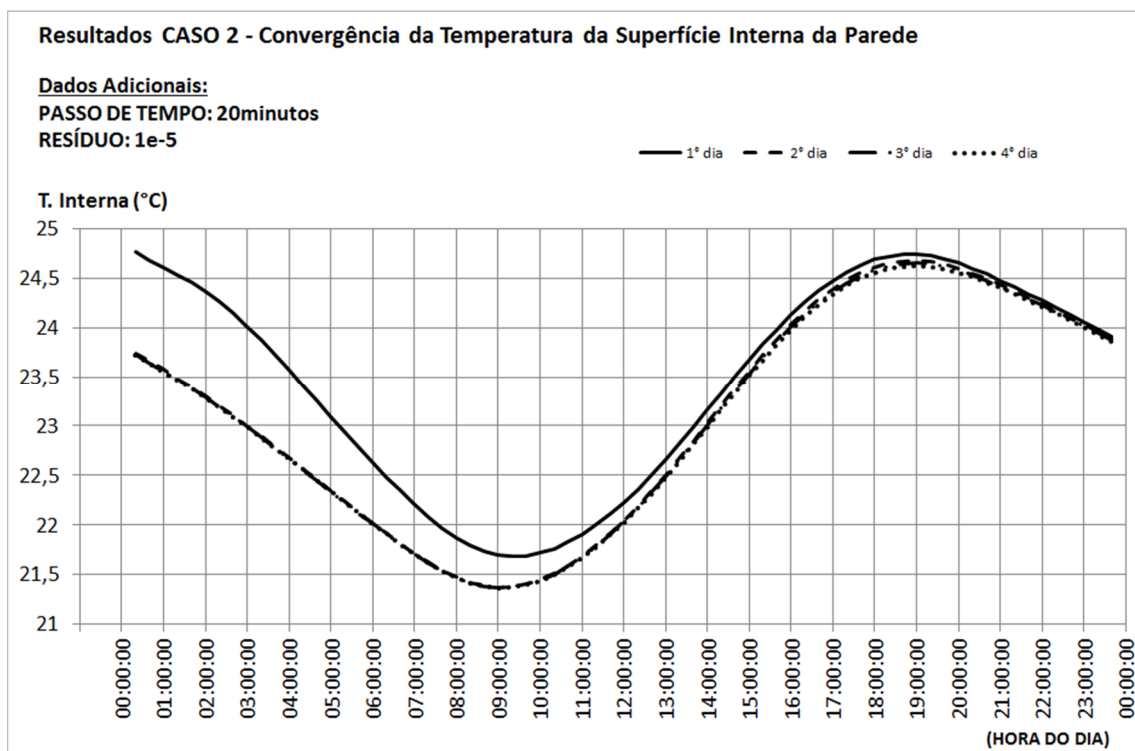


Figura 5.5 – Convergência da temp. da superfície interna para Caso 1 com temperatura interna fixa e Blocos originais de mercado.

5.2.2.2 Bloco de concreto aprimorado (Proposta #27 – C1P5)

O mesmo trabalho de simulações foi feito com a parede montada com o bloco modificado C1P5 da Proposta #27 para se avaliar as diferenças nos resultados com ambos os métodos de simulação. A Figura 5.6 apresenta os resultados de temperatura média da superfície interna da parede ao longo do dia simulado. Comparando-se o método acoplado com a simulação no Domus do usuário avançado (possui a condutividade térmica equivalente obtida no CFD e condições de contorno idênticas), se pode observar que as diferenças de temperaturas são maiores ao longo de todas as 24h. Para o método acoplado, durante a madrugada e no início da manhã, a superfície interna da parede tem temperatura média superior à média encontrada na simulação BES. Nestes períodos a temperatura da superfície externa é mais baixa que a temperatura interna, portanto, o detalhamento do interior da parede tem aumentado a resistência térmica. Após às 10h, quando a temperatura da superfície externa aumenta, tornando-se superior à temperatura média da superfície interna, esta apresenta valores menores na simulação acoplada, mantendo-se mais isolante termicamente com a simulação BES-CFD. As diferenças de temperaturas são importantes, alcançando $0,59^{\circ}\text{C}$ às 8:20h da manhã. A diferença média *rms* é de $0,36^{\circ}\text{C}$.

A Figura 5.6 também apresenta resultados obtidos por um usuário profissional, que adicionou ao BES o valor de condutividade térmica equivalente calculado pelo método da norma [5], $0,304\text{W}(\text{mK})^{-1}$. Os resultados obtidos por este usuário estão muito diferentes aos do usuário avançado, o que será comprovado com os cálculos da integração de calores transferidos em 24h.

As Figuras 5.7a a 5.7c comparam resultados de perfis de temperatura obtidos para ambos os métodos em três diferentes horários do dia. Nas Figuras

5.7, a ilustração superior mostra o campo de temperatura bidimensional no CFD e o gráfico logo abaixo mostra o perfil de temperatura unidimensional do BES. Para todas as três figuras o ambiente interno está à esquerda da seção e o ambiente externo à direita.

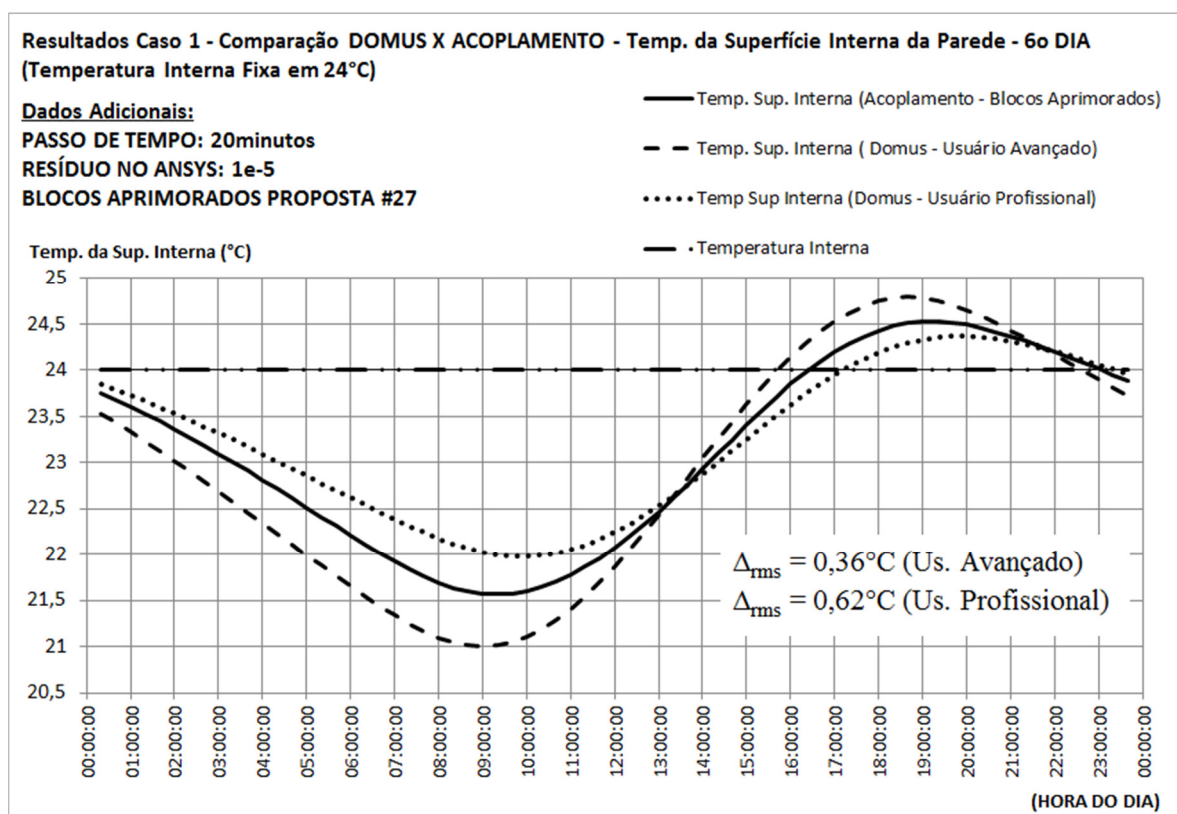


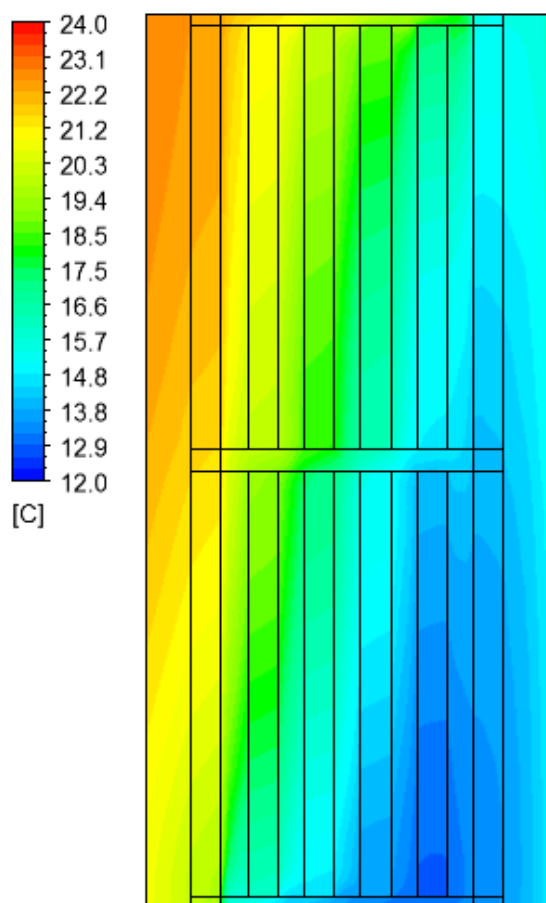
Figura 5.6 – Resultados do Caso 1 para blocos aprimorados da proposta #27 – Temperaturas de superfície interna da parede em análise.

Nos três horários, nota-se que o campo de temperatura obtido por CFD na simulação acoplada é bidimensional dentro das seções. Já o perfil calculado pelo Domus é unidimensional. Este é o maior efeito de se modelar o campo de velocidades do ar interno às cavidades, o campo de velocidades se diferencia entre as cavidades, principalmente nas cavidades mais extremas. O ar da cavidade adjacente à superfície mais quente aquece a região superior dos blocos

e transfere calor a outras cavidades, principalmente à cavidade adjacente à superfície mais fria.

Perfil de temperatura com o Acoplamento

08:20h



Dados:
Tint = 24,0°C
Text = 6,7°C
Radiação Solar = 0W

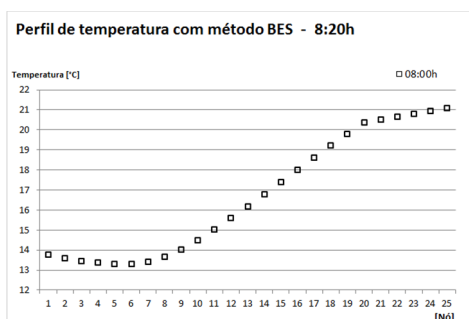
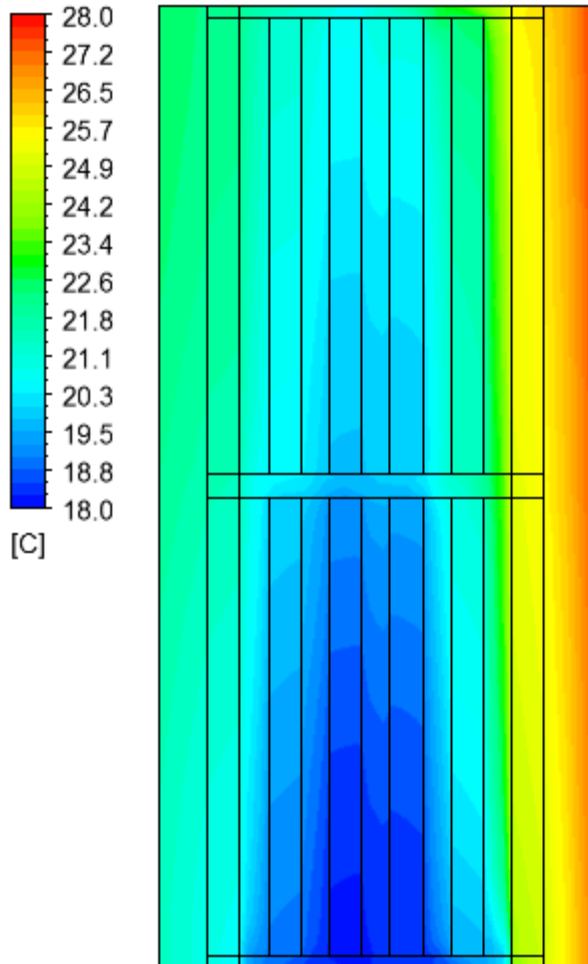


Figura 5.7a – Caso 1 - Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 8:20h.

Perfil de temperatura com o Acoplamento

11:20h



Dados:
Tint = 24,0°C
Text = 11,6°C
Radiação Solar = 465,0W

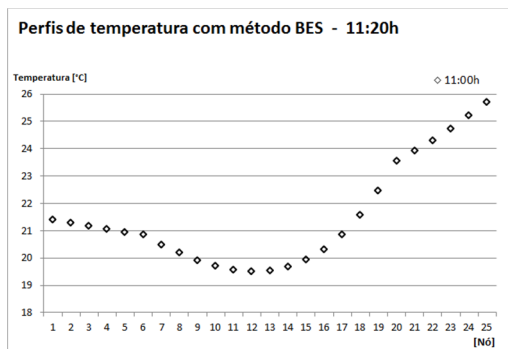
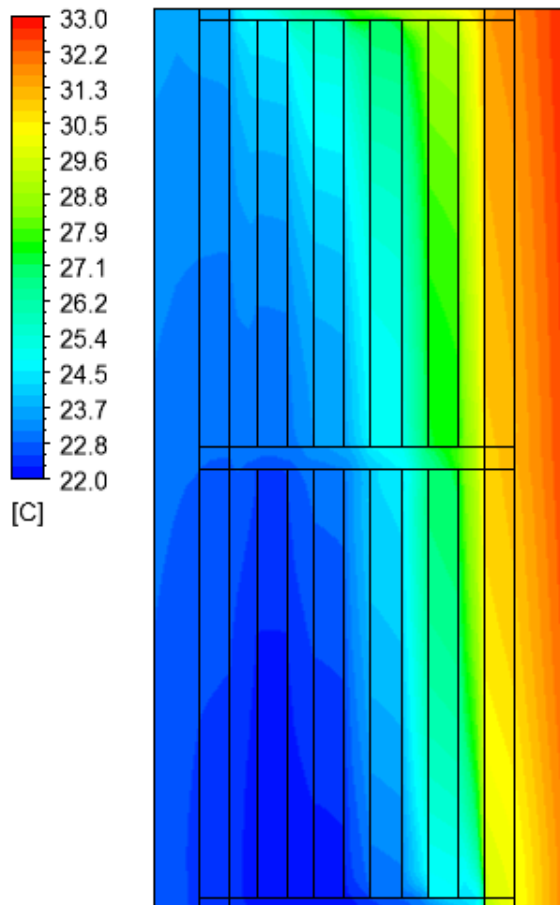


Figura 5.7b – Caso 1 - Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 11:20h.

Perfil de temperatura com o Acoplamento

14:20h



Dados:
Tint = 24,0°C
Text = 16,0°C
Radiação Solar = 386,3W

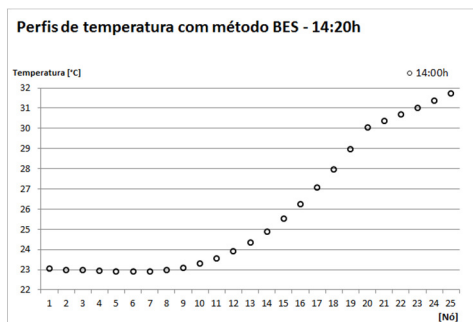


Figura 5.7c – Caso 1 - Comparação de perfis de temperatura entre métodos às 14:20h.

Contudo, chega-se a resultados diferentes quando se utiliza do método acoplado para detalhar os fenômenos envolvidos no interior da parede.

Reforçando a importância dos resultados encontrados com o acoplamento BES-CFD, a Figura 5.8 apresenta os valores do fluxo de calor de calor na parede em análise com os blocos aprimorados para ambos os métodos de simulação. As taxas de transferência de calor variam de -26,1 a 6,9 W/m². As diferenças instantâneas são de até 5,2W/m².

A Tabela 5.2 informa a integração da energia diária transferida, em kJ. A diferença é de 11,7% de calor transferido para fora do ambiente e reduziu-se 29,8% o calor transferido para dentro do ambiente. São diferenças expressivas, causam impacto em cálculos do consumo de energia de equipamentos de climatização e em verificações de atendimento a classificação energética de edifícios. Caso somadas as magnitudes dos calores transferidos para dentro e para fora do ambiente nos dois casos (colunas 2 e 3), chega-se a diferença de 15,9%.

Observa-se então que para o bloco de concreto aprimorado, que possui mais cavidades, aumentando a complexidade dos fenômenos envolvidos e diferenciando a distribuição das massas térmica de concreto e ar em várias camadas, as diferenças tornam-se maiores quando comparam-se os desempenhos dos métodos de simulação. Este bloco de concreto possui 5 cavidades, sendo que as duas mais próximas às superfícies interna e externa possuem atividades de convecção mais intensas, como visto na Figura 4.7. diferenciando as suas resistências térmicas, valorizando o detalhamento interno do bloco de concreto na simulação, o que não pode ser feito na simulação 1-D comum aos programas de *Building Energy Simulation*.

Importante notar que aqui se avalia a diferença de se detalhar o interior na parede comparando-se com o BES, tendo as propriedades equivalentes exatas, calculadas pelo próprio CFD com o mesmo modelo utilizado no acoplamento

Capítulo 5: Resultados Obtidos com o Acoplamento BES – CFD

(usuário avançado). Portanto, o fato de se detalhar o interior da parede utilizando-se do método acoplado garante resultados precisos, já o método do BES depende das propriedades equivalentes informadas pelo usuário. Se estas informações carregam erros, as simulações serão imprecisas, o que pode ser visto com os resultados obtidos pelo usuário profissional.

Tabela 5.2 – Quantidade de calor transferido comparando metodologia Domus versus Acoplamento Domus-CFX com os blocos aprimorados da proposta #27.

Energia	Domus	Domus	Acoplamento	Diferença (%)	Diferença (%)
	U. Prof.	U. Avançado			
	(1)	(2)	(3)	(1 – 3)	(2 – 3)
$E_{T_saída}$ (kJ)	-13.399	-19.203	-16.947	26,5	-11,7
$E_{T_entrada}$ (kJ)	986	2.326	1.633	65,6	-29,8

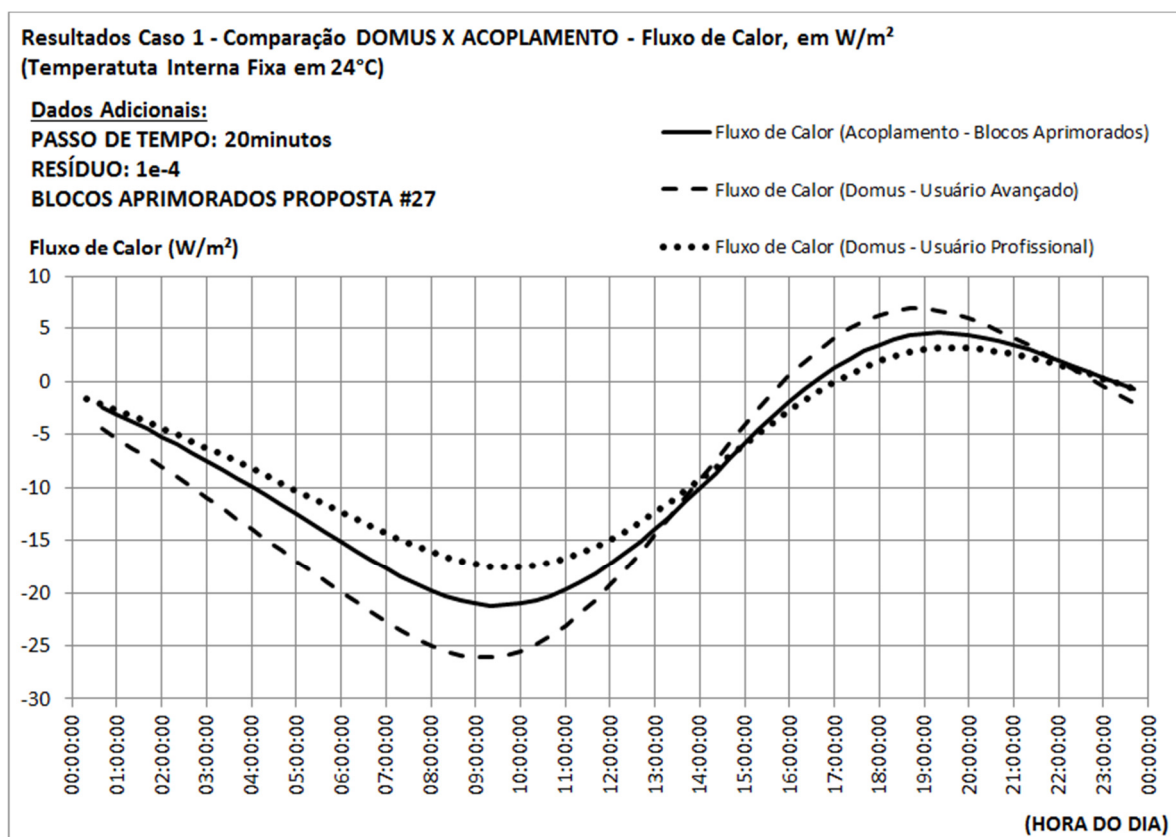


Figura 5.8 – Resultados do fluxo de calor para Caso 1 com temperatura interna fixa em $24^{\circ}C$ e Blocos aprimorados C1P5 da proposta #27.

A Figura 5.9 apresenta os resultados de temperatura média da superfície interna com a temperatura interna fixa em 27°C, aumentando as diferenças de temperatura entre os ambientes e os fluxos de calor através da parede ao longo do dia. O objetivo é analisar novamente as diferenças de resultados entre os métodos com o aumento de fluxos de calor. Nota-se que as diferenças de temperaturas são um pouco maiores, chegando a 0,69°C às 8:00h da manhã. O erro médio *rms* para o usuário avançado do Domus é de 0,42°C em relação ao acoplamento e o erro *rms* para o usuário profissional é de 0,31°C.

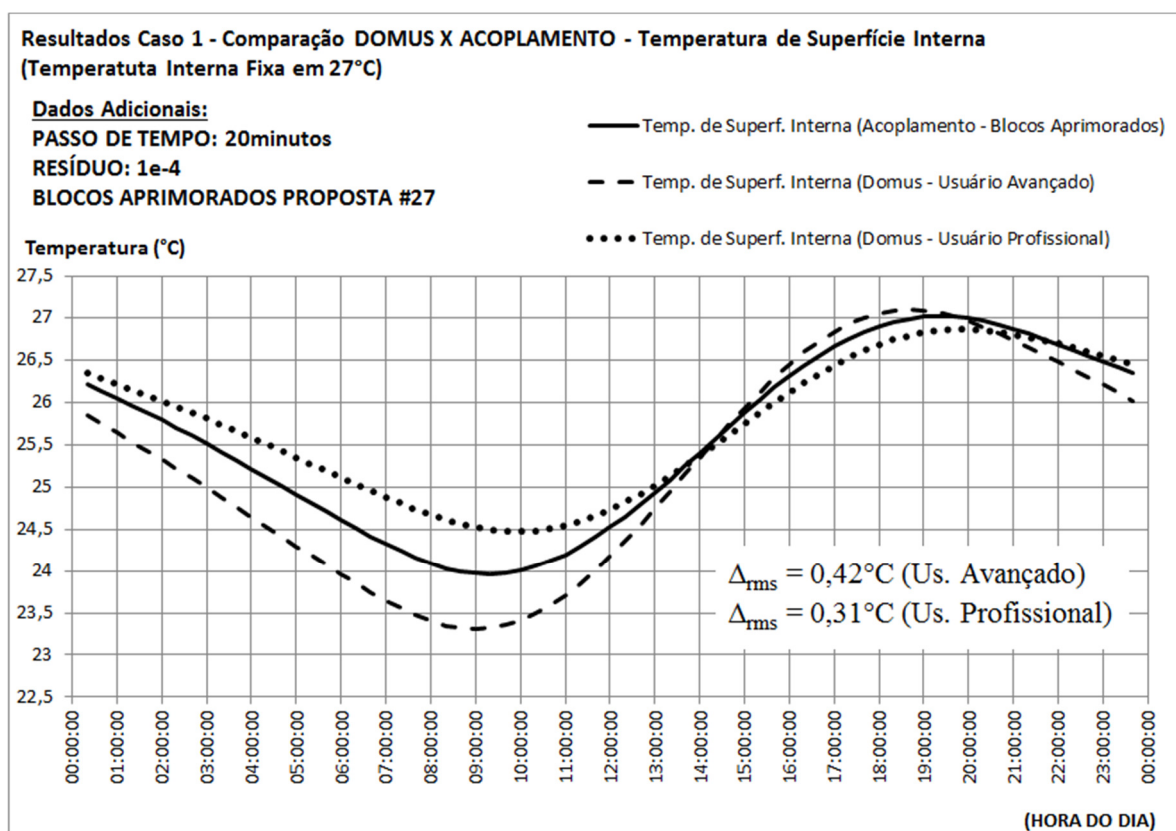


Figura 5.9 – Resultados de temperaturas para Caso 1 com temperatura interna fixa em 27°C e Blocos aprimorados C1P5 da proposta #27.

5.3 Resultados: Caso 2 – Ganhos com o aprimoramento térmico do bloco de concreto

5.3.1 Temperatura Interna Livre

A Figura 5.10 mostra a variação da temperatura interna (do ambiente) para a simulação de metodologia acoplada para a parede com o bloco original de mercado e para o bloco aprimorado. Observa-se um importante ganho de desempenho através da menor amplitude térmica no interior do ambiente simulado e do maior atraso térmico alcançado com o uso dos blocos aprimorados resultantes do trabalho de aprimoramento descrito no Capítulo 4. Com a parede montada com os blocos de concreto de mercado o fator de decréscimo, d_f , calculado, é de 0,69 e o atraso térmico calculado na temperatura interna, no picos de mínima, é de 2,3 horas. Já com a parede montada com os blocos de concreto aprimorados da proposta #27, o fator de decréscimo calculado é de 0,42 e o atraso térmico é de 5,0h. Esses resultados reforçam a importante melhora de desempenho dos blocos aprimorados quando aplicados, pois indicam ganhos interessantes para projetos de ambientes e redução de consumo de energia de equipamentos de climatização.

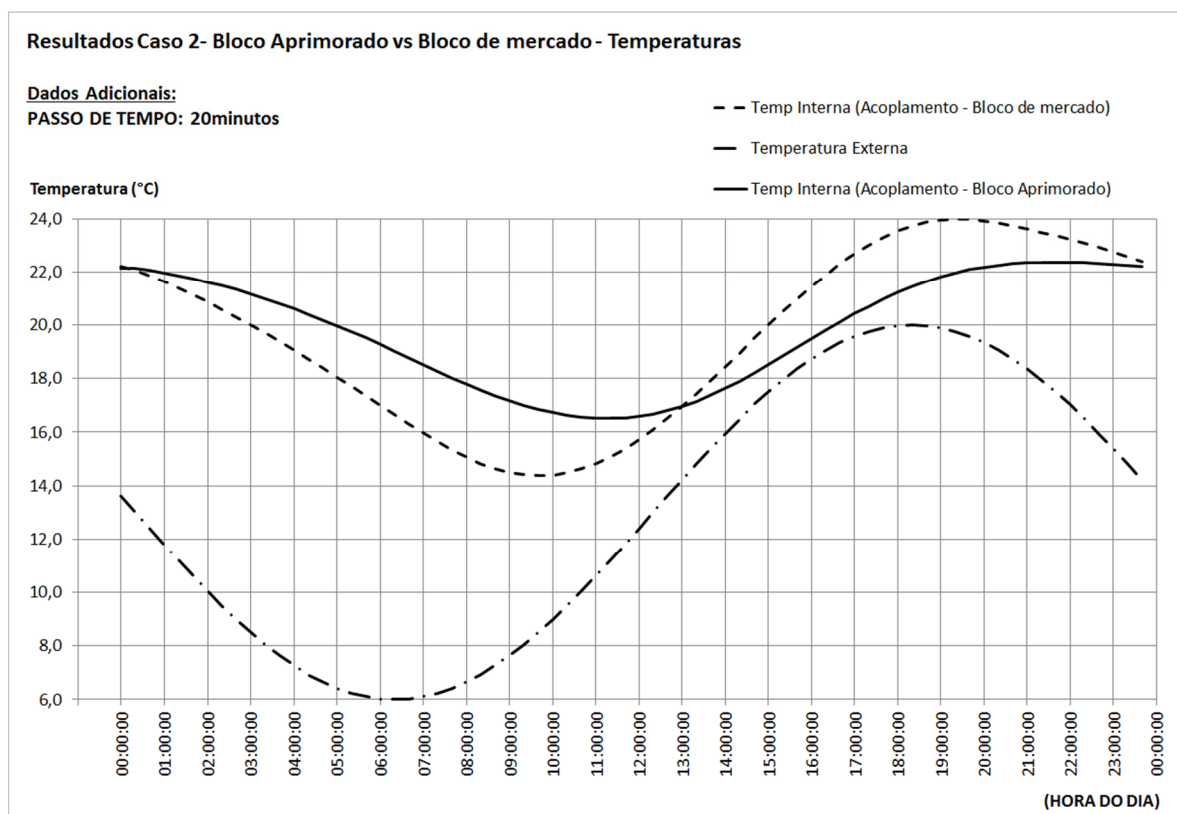


Figura 5.10 – Resultados de temperaturas internas para Caso 2 com temperatura interna livre.

A Figura 5.11 mostra os fluxos de calor através da parede, avaliados na superfície interna, para os dois modelos de blocos de concreto. Observa-se uma importante redução de calor transferido, evidenciando o bom desempenho dos blocos aprimorados. Integrando-se os fluxos de calor integrados ao longo do dia, que entram e que saem do ambiente, encontram-se reduções de 38,2% e 39,1%, conforme apresenta a Tabela 5.3.

Capítulo 5: Resultados Obtidos com o Acoplamento BES – CFD

Tabela 5.3 – Quantidade de calor transferido para ambos os tipos de blocos no Caso 2, com temperatura interna livre.

Energia	Blocos de Mercado	Blocos Aprimorados	Diferença (%)
Energia que sai em 24h (kJ)	-2.683	-1.659	-38,2%
Energia que entra em 24h (kJ)	2.727	1.661	-39,1%

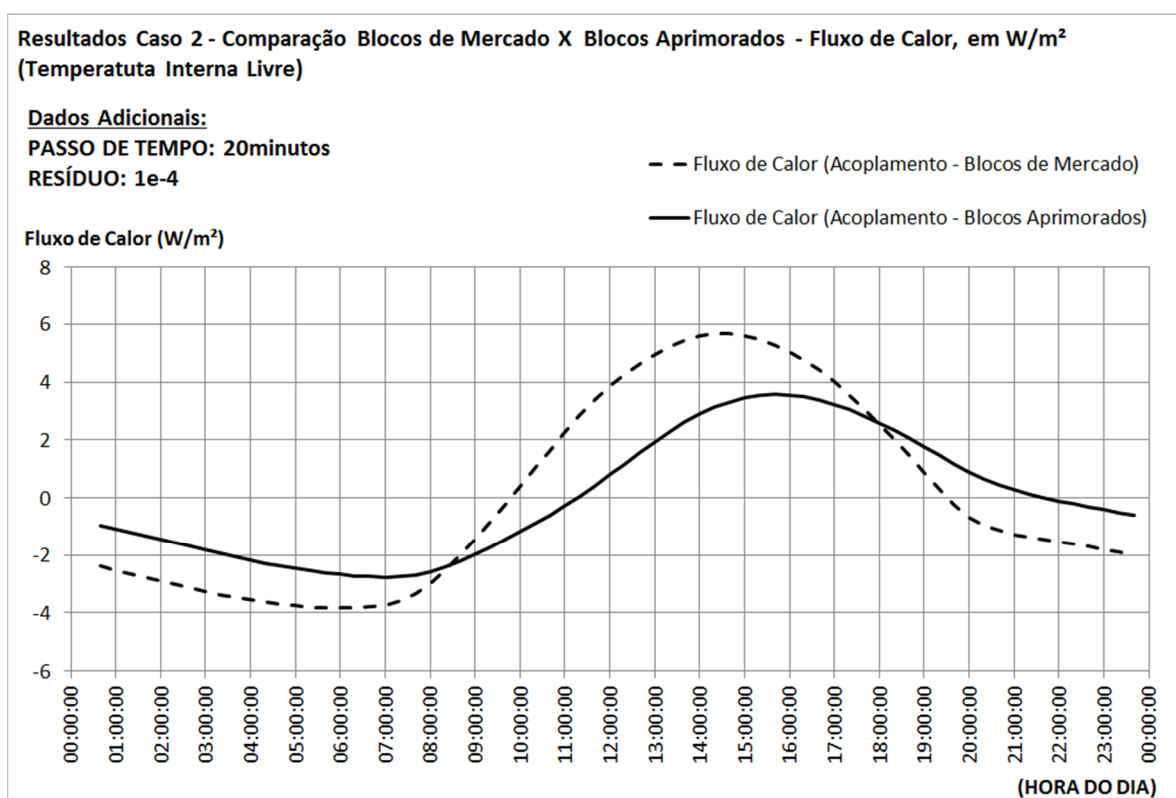


Figura 5.11 – Resultados de fluxos de calor para Caso 2 com temperatura interna livre.

5.3.2 Temperatura Interna Fixa

Os desempenhos dos blocos de concreto aprimorados também são analisados fixando-se a temperatura interna em 24°C para maximizar-se os

fluxos de calor através da parede e aumentar o movimento de ar no interior das cavidades. Os resultados estão apresentados na Figura 5.12 com a apresentação das variações das temperaturas médias da superfície interna da parede sob análise. Novamente os blocos de concreto aprimorados oferecem um notável ganho de desempenho. Com a parede montada com os blocos de concreto de mercado o fator de decréscimo, d_f , calculado, é de 0,42 e o atraso térmico calculado na temperatura interna é de 1,7 horas. Já com a parede montada com os blocos de concreto aprimorados (da Proposta #27), o fator de decréscimo calculado é de 0,23 e o atraso térmico é de 2,7horas.

A Figura 5.13 mostra a variação do fluxo de calor transferido entre a parede e o ambiente interno, por convecção, calculado com a Equação 3.16. Nota-se que os fluxos permanecem mais próximos de zero com o uso dos blocos de concreto aprimorados, variando entre +5 e -23W m². Já para os blocos originais de mercado, os fluxos encontrados variam entre +13,5 e -37,7W m². A Tabela 5.4 apresenta os valores integrados de calor transferido através da parede para o exterior e para o interior do ambiente e quanto representa as diferenças encontradas entre as simulações com blocos de mercado e com os blocos aprimorados. Notam-se expressivas reduções com o uso dos blocos aprimorados, pois, reduziu-se em 36,2% de calor transferido para fora do ambiente nos períodos de temperatura baixa e reduziu-se em 66,1% o calor transferido para dentro do ambiente nos períodos de temperatura elevada na superfície externa da parede. Demonstrando notável melhora no desempenho térmico da parede quando aplicados os blocos aprimorados no presente trabalho.

A Figura 5.14 ilustra os campos de temperaturas no mesmo instante, às 14h da tarde, para ambos os blocos de mercado e aprimorado, sendo a figura da esquerda referente aos blocos de mercado. À esquerda das seções está o ambiente interno e à direita o ambiente externo. Há radiação solar e neste momento está em curso a transformação dos perfis de temperatura após uma

inversão térmica proporcionada pelo aquecimento da superfície externa pela radiação solar. Mais uma vez nota-se bi dimensionalidade nos perfis de temperatura. A diferença de temperaturas é notável, os blocos aprimorados, mais isolantes termicamente, têm aproximadamente 50% da área plotada com temperaturas entre 23 e 24°C. Já os blocos atuais do mercado com temperaturas bastante superiores.

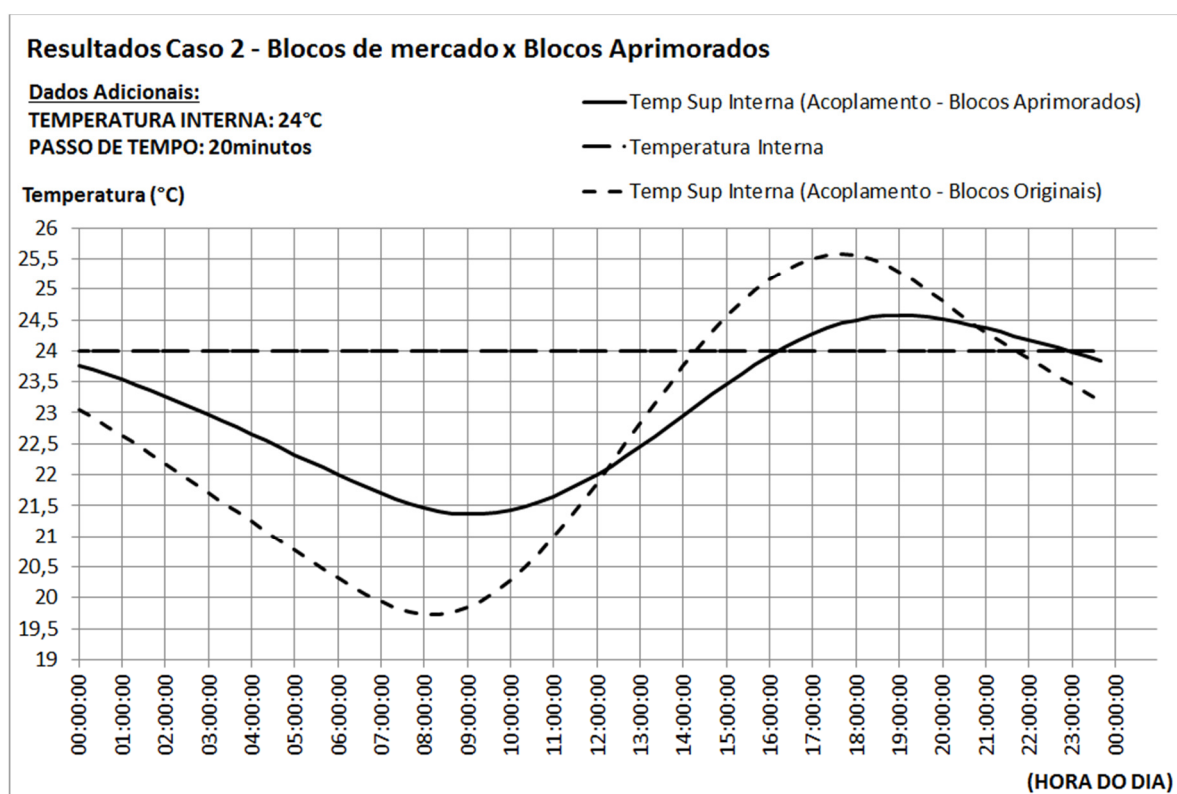


Figura 5.12 – Resultados de temperatura de superfície interna para Caso 2 com temperatura interna fixa.

Tabela 5.4 – Quantidade integrada de calor transferido para ambos os tipos de blocos no Caso 2, com temperatura interna fixa em 24°C.

Energia	Blocos de Mercado	Blocos Aprimorados	Diferença (%)
Energia que sai em 24h (kJ)	-26.978	-16.947	-37,2
Energia que entra em 24h (kJ)	4.773	1.633	-65,8

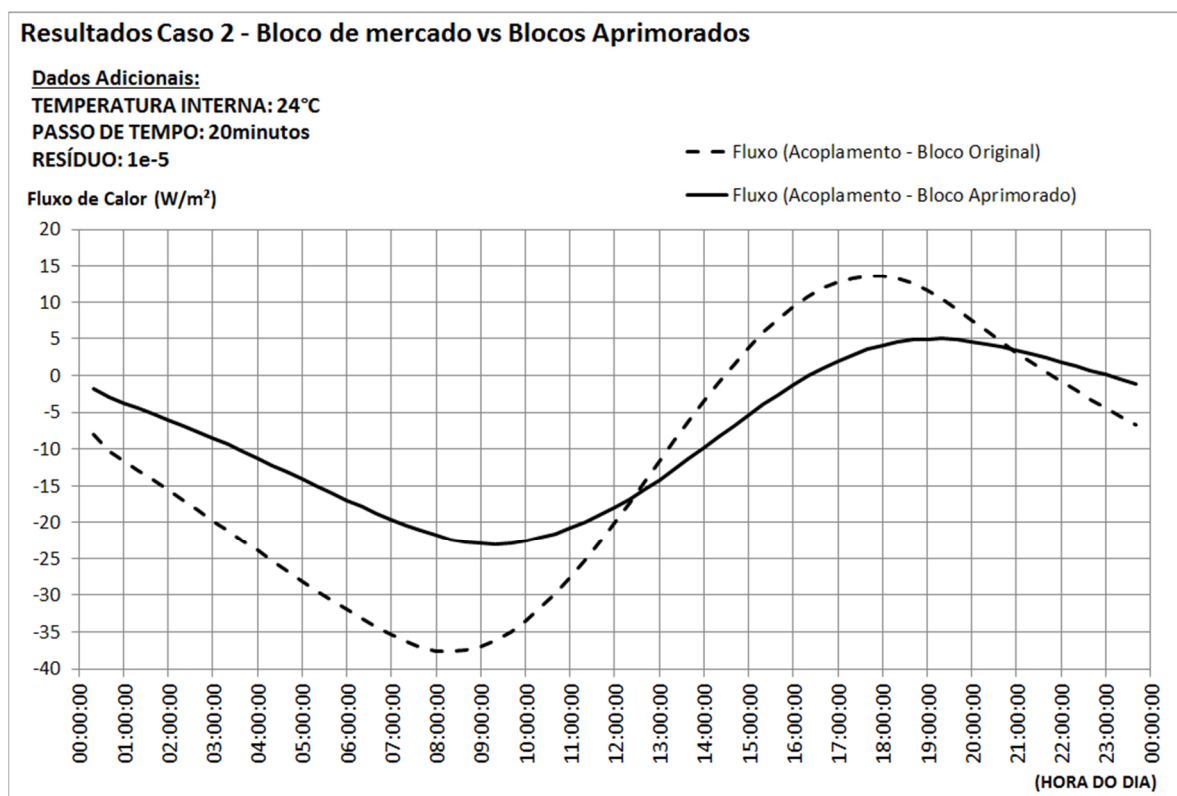


Figura 5.13 – Resultados do fluxo de calor para Caso 2 com temperatura interna fixa.

A título de informação, as simulações reportadas neste trabalho dos casos 1e 2 têm tempos de processamento variáveis de acordo com o refino de malha e precisão de resíduos. Ao todo foram 24 simulações com resultados compilados. O tempo total de processamento de cada simulação variou entre 58 e 246 horas em um computador com processor Intel Core I5, 4 processadores com 2.30GHz, memória de 6,0GB.

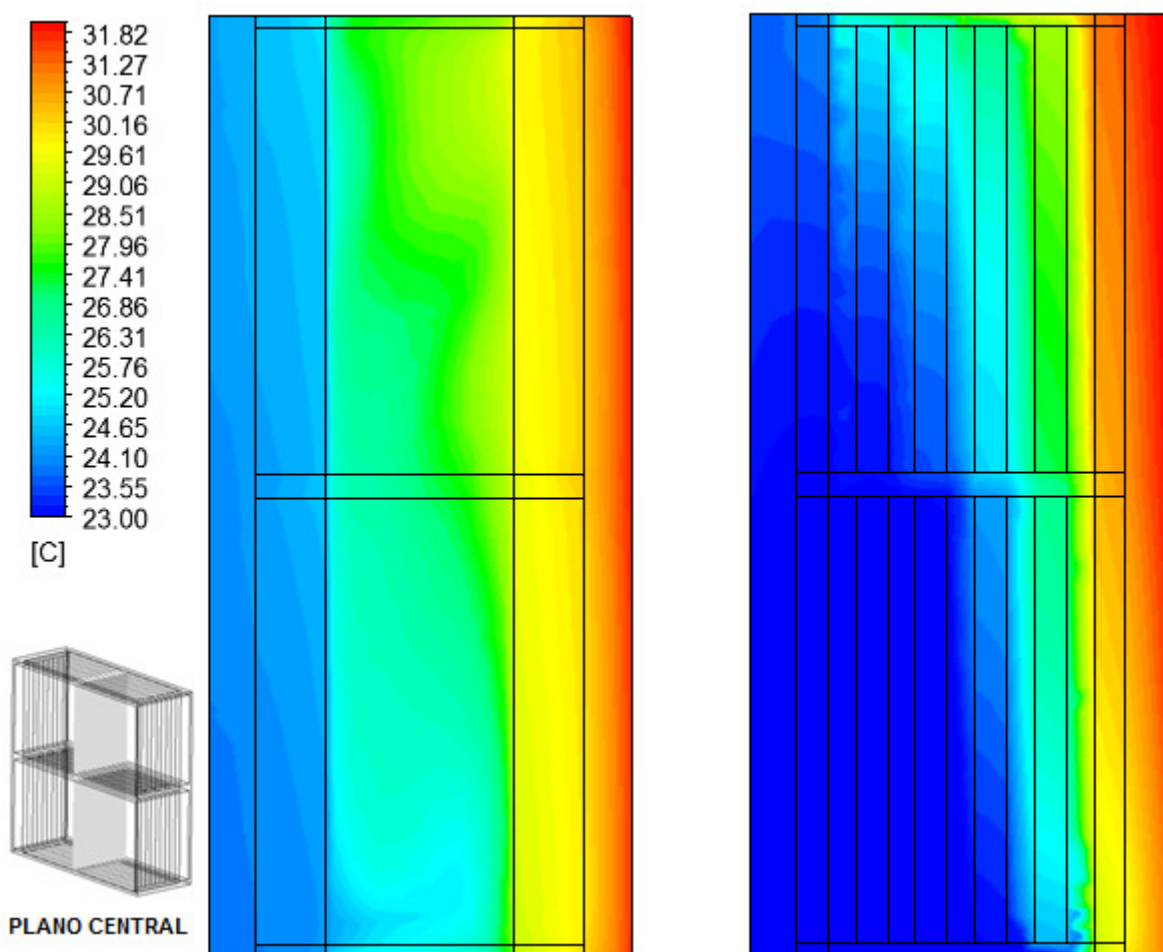


Figura 5.14 – Perfis de temperatura para o caso com blocos de mercado e blocos aprimorados da proposta #27 às 16h da tarde no plano central do comprimento dos blocos. [Temp. Externa = 16,5°C ; Radiação solar = 415,9Wm² ; Temp. Interna = 24°C].

5.3.3 Estudo de Refino de Malha no acoplamento BES-CFD – Blocos Aprimorados

A Figura 5.15 apresenta graficamente a variação de temperatura média da superfície interna variando-se o refino de malha. Três versões de malha foram avaliados conforme Tabela 5.5. A malha menos refinada oferece perda de

Capítulo 5: Resultados Obtidos com o Acoplamento BES – CFD

precisão nos resultados. As análises do Caso 1 (Seção 4.2.2) foram realizadas com a malha mais refinada, V1. As análises do Caso 2 (Seção 4.2.3) foram realizadas com a malha V2.

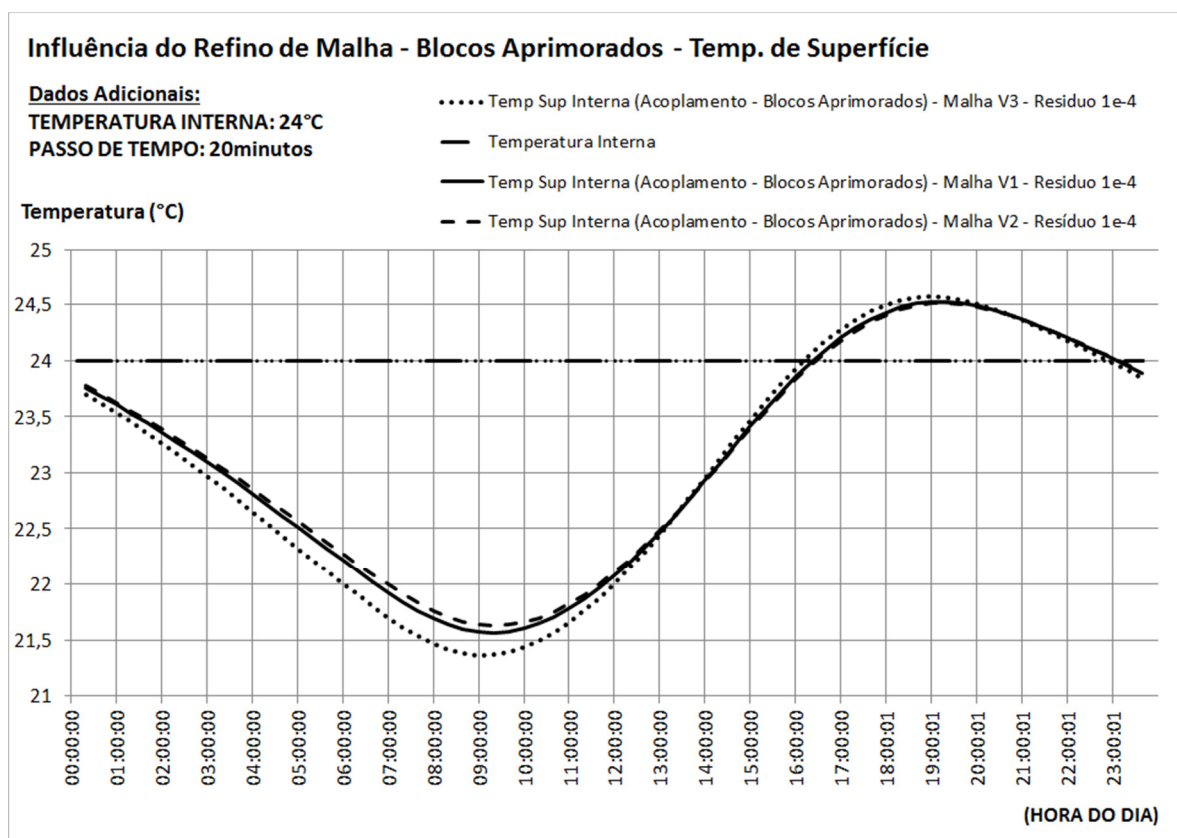


Figura 5.15 – Influência do refino de malha no CFD no método acoplado BES-CFD.

Tabela 5.5 – Número de elementos de malha em cada versão de refinamento.

Malha	Número de elementos			
	Ar	Blocos	Argamassa	Reboco
V1	885.000	268.000	29.000	44.000
V2	442.000	153.000	17.000	30.000
V3	127.000	138.000	13.000	20.000

5.3.4 Efeito do congelamento do campo de velocidades no interior das cavidades no acoplamento BES-CFD.

Como mencionado no Capítulo 3, de metodologia, antes de cada trajetória transiente que possui tempo total igual ao passo de tempo do BES, o campo de velocidades é atualizado para o novo campo de temperaturas determinado ao final do passo de tempo anterior e permanece “congelado” durante o próximo transiente de 20 minutos. Esta condição consome menos tempo de processamento e não causa perdas de precisão nos resultados como mostra a Figura 5.16, o que não significa que o efeito da convecção interna nas cavidades é baixo. Foi visto no Capítulo 4 que uma grande parcela de calor é trocada pelo fenômeno de convecção nas cavidades. Significa, então, que o congelamento do campo de velocidades a cada 20 minutos, após sua atualização, mantém a precisão para os cálculos do efeito convectivo.

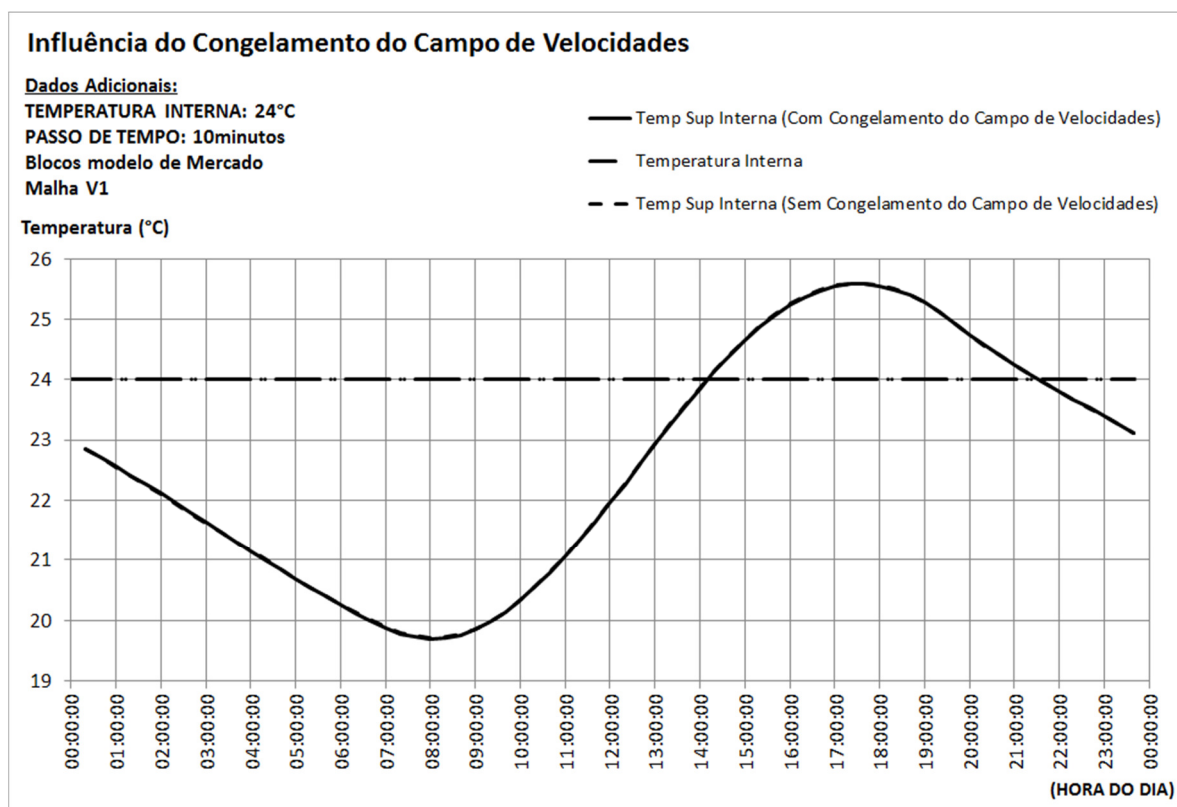


Figura 5.16 – Influência do congelamento do campo de velocidades.

5.3.5 Estudo do resíduo mínimo utilizado nas simulações transientes do Ansys-CFX®.

As Figuras 5.17 e 5.18 comparam resultados com a variação do resíduo selecionado para convergência das iterações do CFD no método acoplado. O resíduo selecionado é utilizado pelo programa para convergência e é a medida do alcance da estabilidade do balanço de energia, massa e quantidade de movimento em cada volume de controle. As figuras mostram que resíduos entre $1e-3$ e $1e-5$ oferecem resultados muito próximos. Todas as simulações foram realizadas com valores abaixo de $1e-3$.

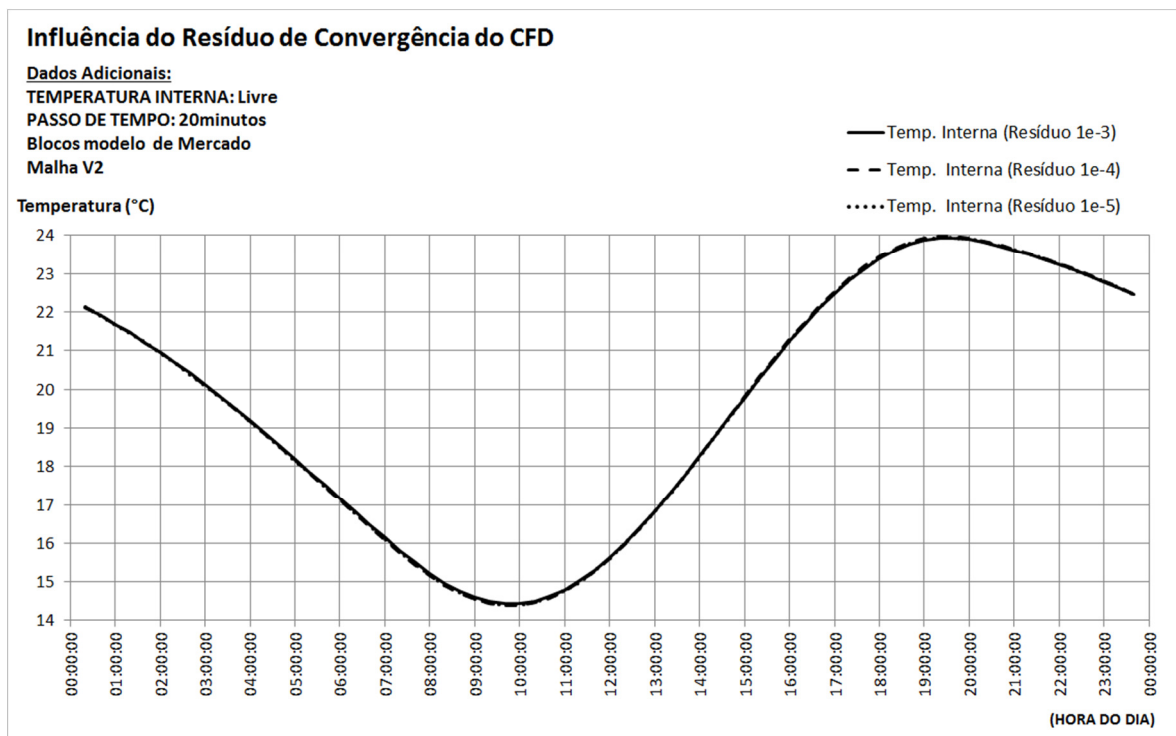


Figura 5.17 – Influência do resíduo no CFD – Bloco de Mercado.

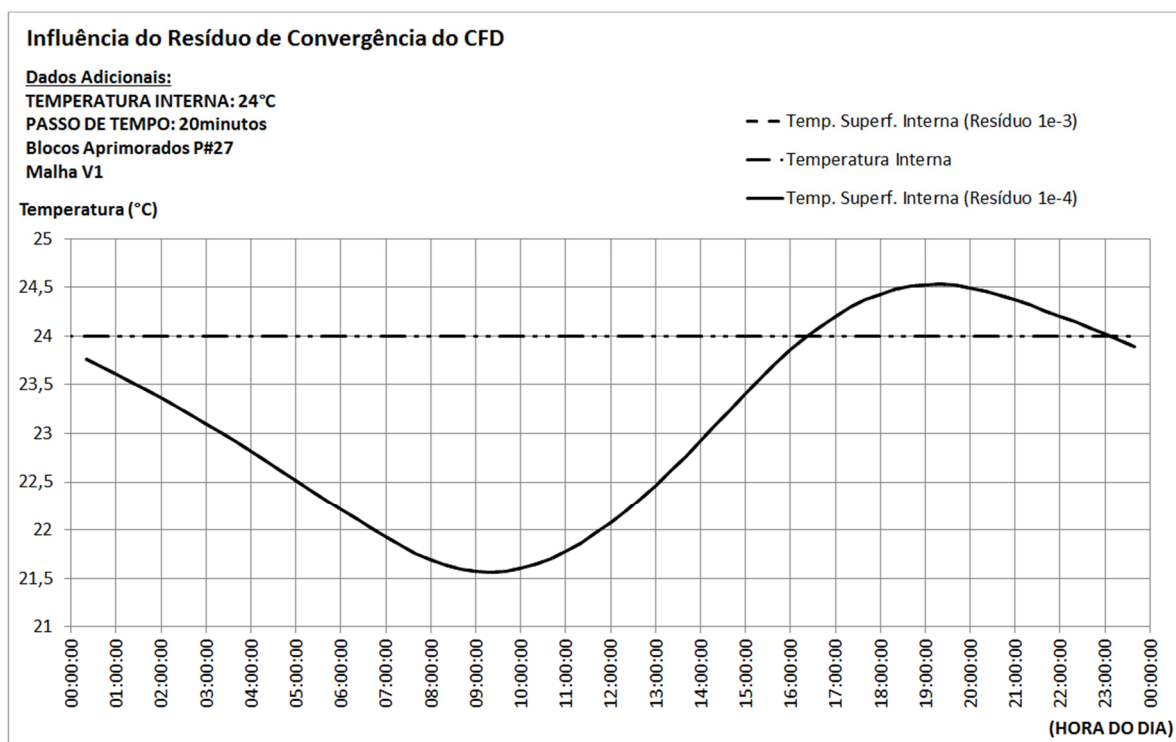


Figura 5.18 – Influência do resíduo no CFD – Bloco Aprimorado proposta #27.

5.3.6 Estudo do efeito dos passos de tempo.

Na Figura 5.19 tem-se um estudo comparativo dos resultados em termos da temperatura da superfície interna da parede variando-se o passo tempo no BES nas simulações com o acoplamento. O passo de tempo utilizado em todas as simulações, dos Casos 1, 2 e 3, foi de 20 minutos. A Figura abaixo mostra que este passo de tempo não oferece perda de precisão nos resultados desde que compara com passos de tempo de 10 minutos e de 5 minutos e seus resultados são muito próximos. As diferenças são de até 0,04°C.

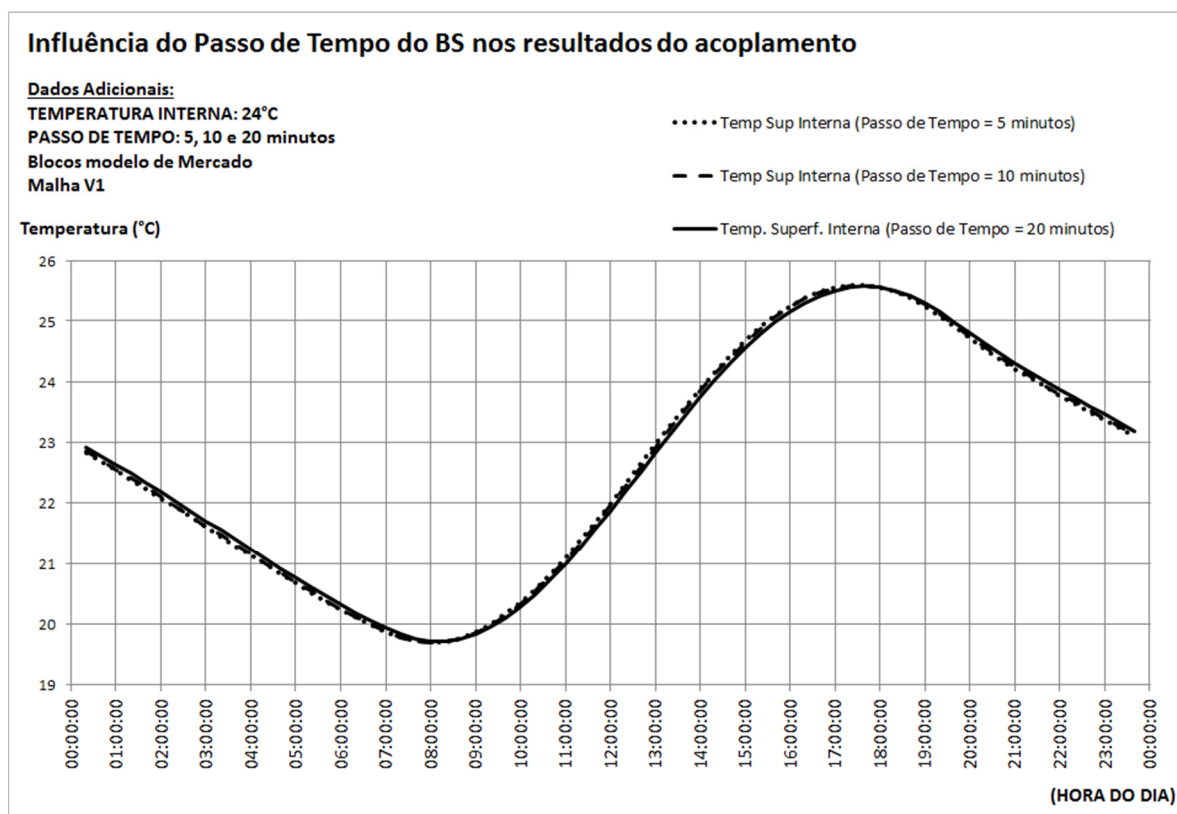


Figura 5.19 – Influência do passo de tempo no BES – Bloco de mercado.

5.4 Resultados: Caso 3 – Inclusão de assimetria provocada pela cinemática solar.

Como descrito na Seção 3.3.2.3, este estudo de caso pretende explorar potencialidades do acoplamento BES-CFD, pois se torna possível utilizar-se do modelo de cinemática solar e do sombreamento por contagem de pixels do Domus. A Figura 3.13 apresentou a ilustração do movimento do sol e a variação da área ensolarada. A modelagem 3-D da parede abordada pelo método de simulação acoplada torna possível usufruir da informação da área de parede ensolarada, desta forma a radiação solar incide somente nos elementos de malha

da superfície externa da parede que estão abaixo da altura ensolarada. A parede em análise, orientada a oeste, começa a receber radiação solar na sua parte inferior às 14h da tarde. A parcela superior da parede, abaixo da marquise, recebe sombra até às 18h. O ar do interior das cavidades é aquecido na área ensolarada e se movimenta, alcançando o interior dos blocos sombreados, influenciando no campo de temperaturas dos blocos superiores e portanto, influenciando os resultados, de modo que a simulação 3-D mostra suas vantagens.

Já no método 1-D utilizado no programa de BES, a radiação é distribuída em toda a área da parede. A parede, portanto, recebe ou não radiação solar em toda sua área, devido sua orientação e dados do arquivo climático.

Os resultados obtidos para ambos os métodos de simulação são apresentados na Figura 5.20, em termos da temperatura média de superfície interna da parede. Notam-se importantes diferenças quando se comparam os métodos. Para tanto, visualiza-se as curvas do “Acoplamento” e “Domus – Usuário Avançado”.

Nota-se que o comportamento da temperatura da superfície interna da parede é muito diferente entre as simulações, o ganho de precisão nos resultados é bastante elevado com o uso do método acoplado. Há diferenças de temperaturas de superfície à noite, em torno de $0,35^{\circ}\text{C}$. Durante o dia os erros tornam-se maiores, chegando a $2,15^{\circ}\text{C}$, no período da tarde, quando a assimetria da condição de contorno de radiação de onda curta é mais acentuada. A média *rms* do erro é de $1,0^{\circ}\text{C}$ para a simulação tradicional.

As diferenças de desempenho podem ser confirmadas comparando-se os fluxos de calor transferidos entre a parede e o ambiente. A Figura 5.21 apresenta os valores de fluxo de calor integrados ao longo do dia e a Tabela 5.6 mostra a energia integrada nas 24 horas. A grande quantidade de calor transferido é no

sentido do ambiente, onde se nota redução de 24,1% com a metodologia do acoplamento.

Também na Figura 5.20, estão plotados os resultados obtidos pelo usuário básico que utilizou o bloco de concreto de 14cm da biblioteca do Domus. Como a condutividade térmica equivalente do bloco da biblioteca do Domus é muito baixa, $0,461\text{W}(\text{mK})^{-1}$, as temperaturas da superfície interna permanecem mais baixas, se aproximando dos resultados do acoplamento no período de incidência solar na parede. De qualquer forma, os erros permanecem grandes comparando-se com a simulação acoplada. As temperaturas de superfície se mantêm com diferenças ao longo de todo o dia, variando entre $0,1^{\circ}\text{C}$ e $1,6^{\circ}\text{C}$. Os resultados do fluxo de calor para o usuário básico também estão plotados na Figura 5.21. Contudo, o usuário básico obteve erros altos, diferença de 20,3% no calor integrado que deixa o ambiente, comprometendo seus resultados.

Tabela 5.6 – Quantidade de calor transferido comparando-se os dois métodos de simulação para o Caso 3.

Energia	Domus	Domus	Acoplamento	Diferença	Diferença
	U. Básico	U. Avançado		(%)	(%)
	(1)	(2)	(3)	(1 – 3)	(2 – 3)
$E_{T_saída}$ (kJ)	-198	-1.142	-323	63,1	-71,5
$E_{T_entrada}$ (kJ)	20.346	33.616	25.513	25,4	-24,1

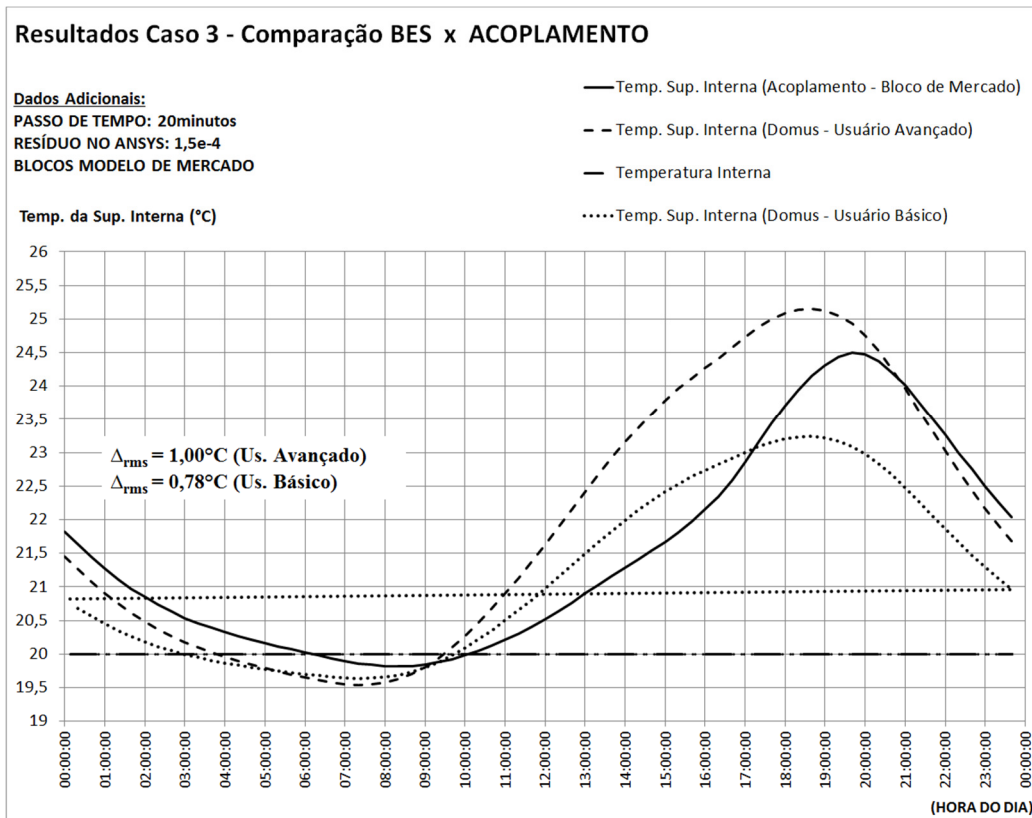


Figura 5.20 – Resultados de temperatura de superfície interna para o Caso 3.

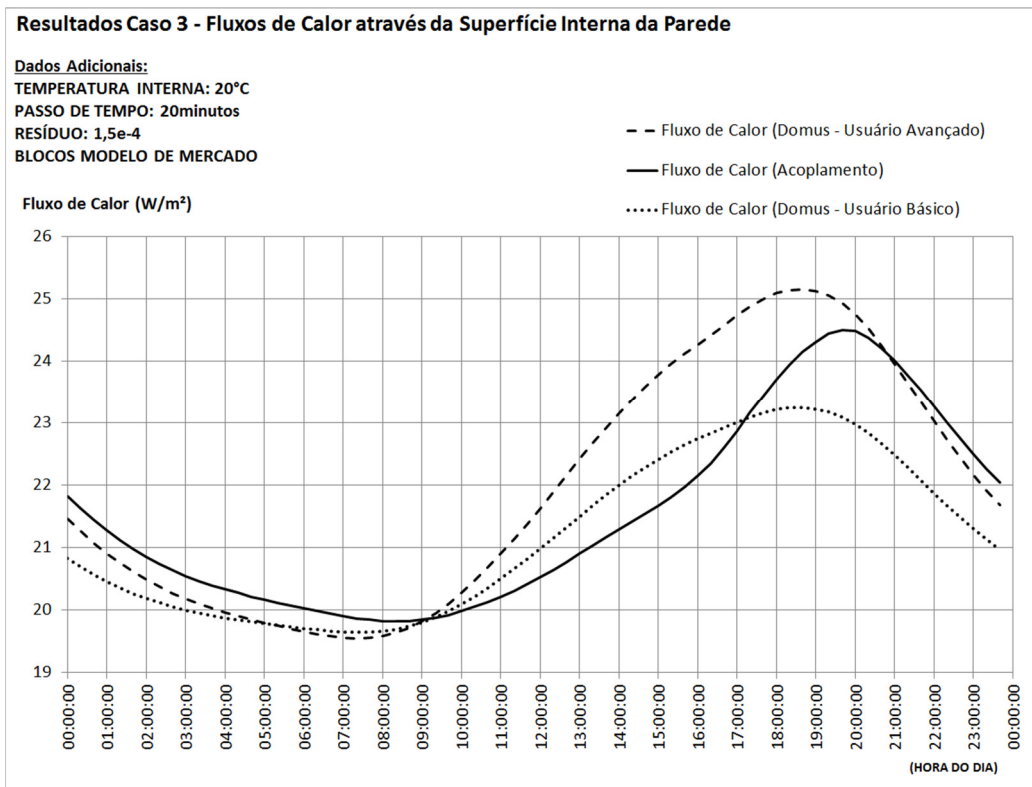


Figura 5.21 – Resultados de fluxo de calor na superfície interna para o Caso 3.

As Figuras 5.22a e 5.22b mostram os campos de temperatura no interior da parede em análise de hora em hora, das 13h às 23h. Olhando-se o ar do interior das cavidades dos blocos de concreto, fica evidente os efeitos que se esperava com relação ao ar que seria aquecido na porção inferior da parede já aquecida pelos raios solares, aquecer a porção superior ainda sob sombra. Este efeito está sendo ilustrado em todas as figuras das 14h até às 19h.

Já às 14h, nota-se que o ar das cavidades dos três blocos de concreto mais superiores está mais aquecido que nos blocos centrais. A tridimensionalidade oferecida pelo método de modelagem acoplada no interior da parede torna isto possível. A temperatura destes blocos está mais alta e os resultados tornam-se mais precisos, pois a simulação aproxima-se mais da realidade.

Nos perfis de temperaturas dos horários seguintes, 15h–18h, nota-se claramente o ar sendo aquecido por regiões quentes dos blocos ensolarados. Em detalhe, na Figura 5.23, que mostra campo de velocidades com vetores, visualizam-se os vetores com sentido ascendente, transferindo calor por convecção aos blocos logo acima.

Pelo fato de o Domus receber a temperatura média da parede obtida no CFD, uma parte da precisão de resultados alcançada é desperdiçada, pois, o cálculo do calor transferido entre a parede e o ambiente é feito com as temperaturas médias da sala e da superfície interna da parede.

O presente trabalho investiga os ganhos em precisão de resultados com o detalhamento do interior da parede, os resultados sugerem que um passo importante adicional pode ser dado ao incluir-se, em futuras simulações, uma abordagem tridimensional no domínio do ar da sala, pois, a bi dimensionalidade dos campos de temperatura na área da parede é observada nas Figuras 5.22, 5.23, 5.27 e 5.28.

O passo de tempo utilizado nas simulações do caso 3 foi de 20 minutos no Domus, portanto cada transiente no CFX tem 20 minutos de duração, com passo de tempo de 1 minuto. O tempo total de processamento da simulação reportada foi de 798 horas. Dados do computador: processador Intel Core I5, 4 processadores com 2.30GHz, memória de 6,0GB.

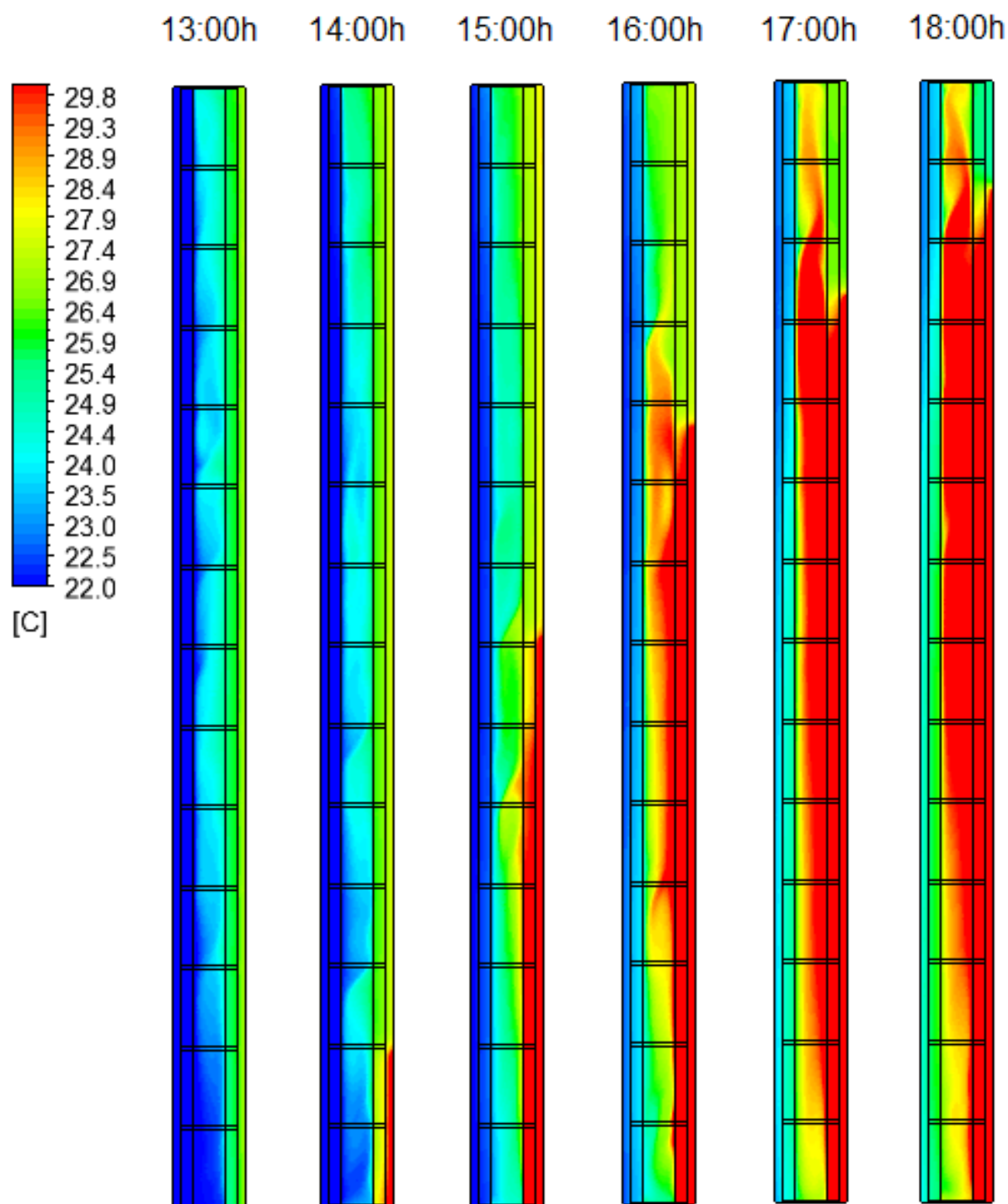


Figura 5.22a – Campos de temperatura das 13:00 às 18:00h - Caso 3.

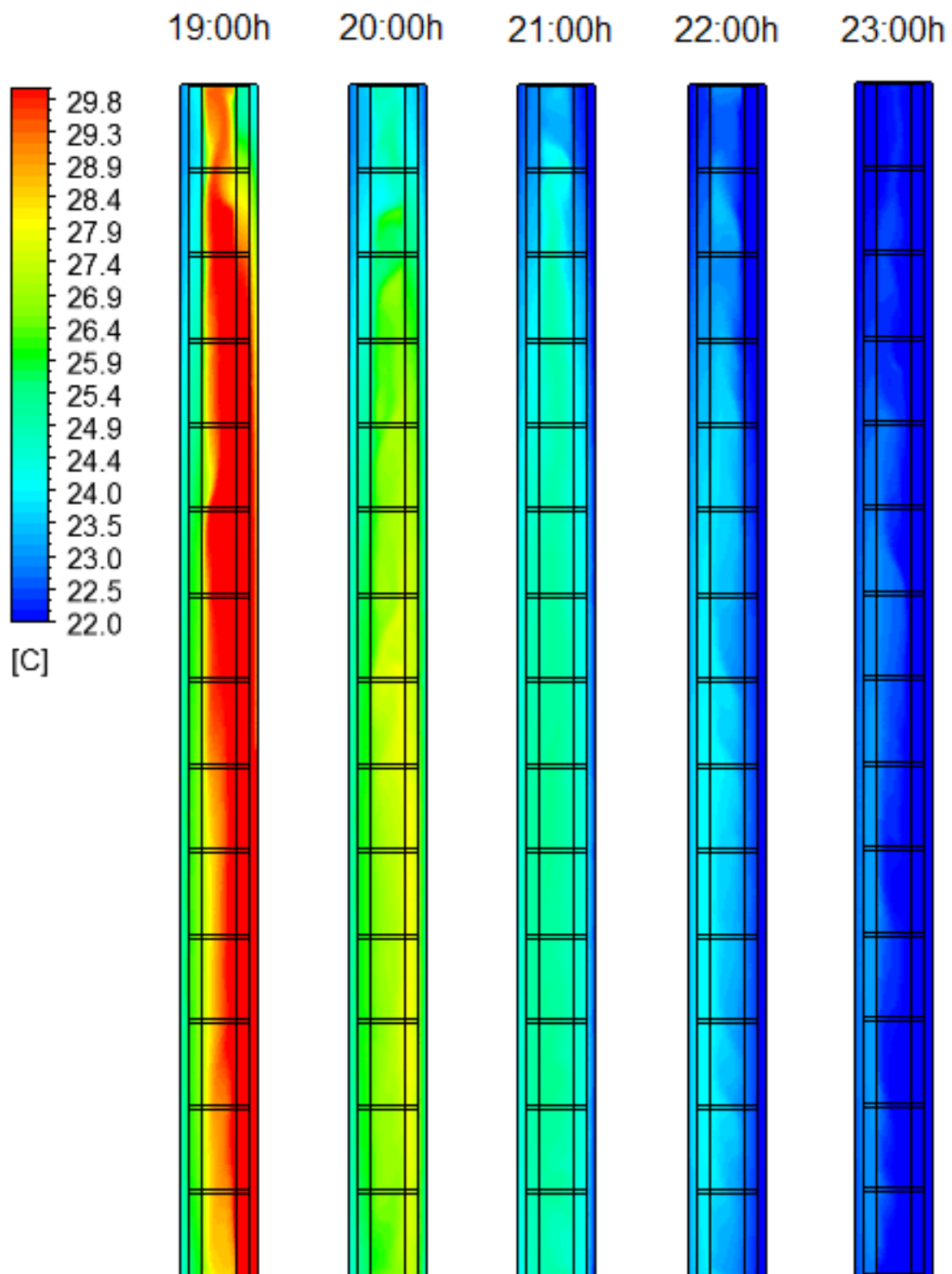


Figura 5.22b – Campos de temperatura das 19:00 às 23:00h - Caso 3.

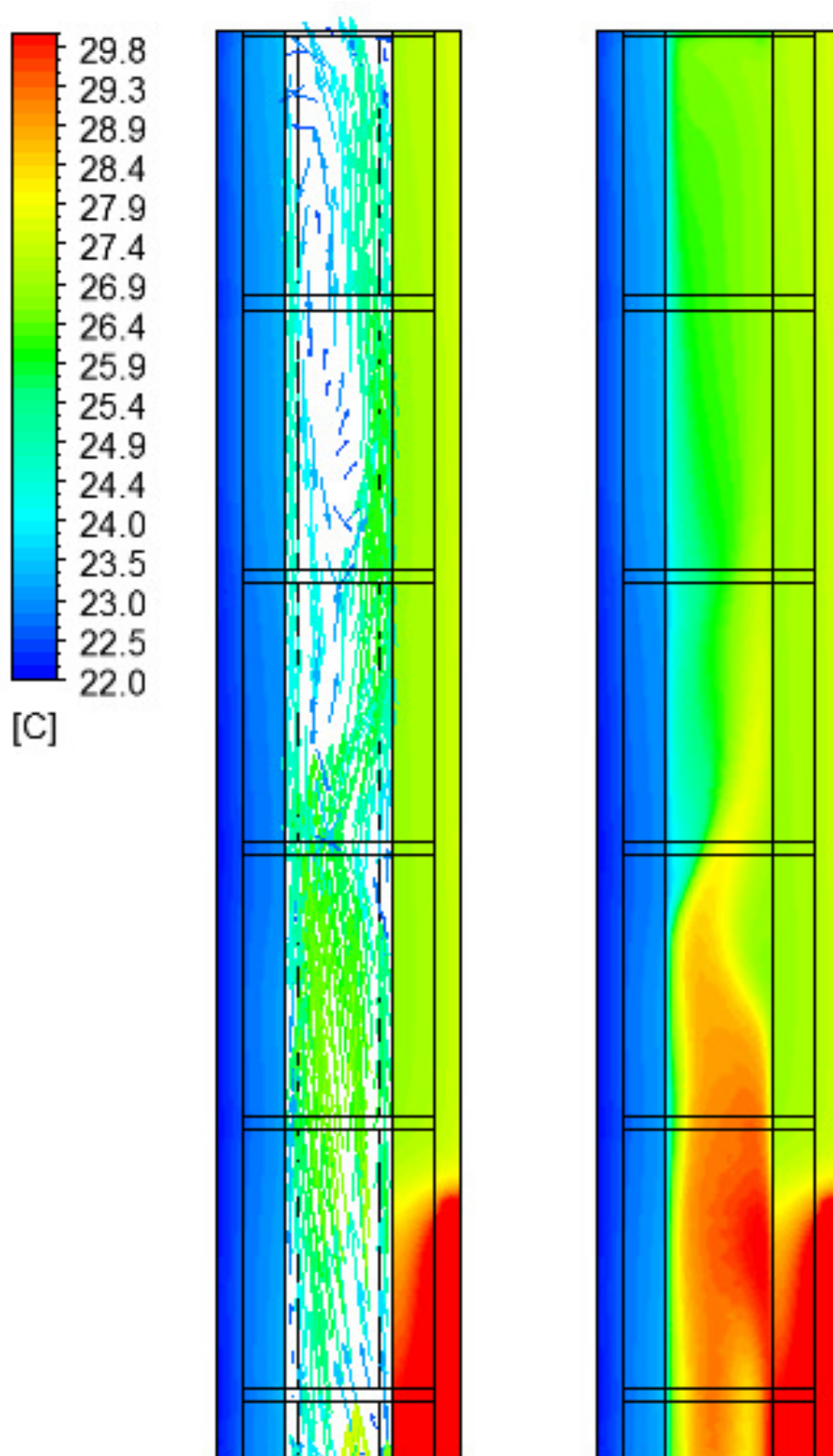


Figura 5.23 – Detalhe dos campos de temperatura e velocidade nos 4 blocos superiores da parede às 16:00h – Caso 3. (* as cores dos vetores indicam intensidade da velocidade).

5.5 Resultados: Caso 4 –Assimetria provocada pela cinemática solar e inclusão de uma camada de ar ventilada.

Conforme descrito na Seção 3.3.2.4, o caso 4 inclui uma camada de ar ventilada na parede, que preenche o espaço entre o reboco externo, aplicado sobre o bloco de concreto e placas de cerâmica. A camada de ar ventilada usualmente é aplicada para aumentar resistência térmica equivalente da parede, proporciona também uma barreira à radiação solar e às chuvas. O caso simulado, com seus resultados mostrados nas Figuras 5.25 e 5.26, foi configurado com os blocos aprimorados da proposta #27.

O ambiente construído na interface do Domus é mostrado na Figura 3.13. Como descrito na Seção 3.3.2.4, os dois métodos de simulação serão comparados a seguir através da comparação das transferências de calor através da parede em análise. Em ambos os métodos de simulação o mesmo ambiente é configurado igualmente, inclusive a parede em análise. No método acoplado BES-CFD a abordagem 3-D é aplicada tanto para os fenômenos de transferência de calor como de mecânica dos fluidos, com os campos de velocidades das cavidades e da camada de ar sendo calculados. Somente no método acoplado BES-CFD a camada torna-se realmente ventilada, devido aos recursos da ferramenta de CFD. O modelo de cinemática solar é aplicado em ambos os métodos, mas só o método acoplado torna possível a incidência de radiação somente na área ensolarada, também devido ao modelamento 3-D e a outros recursos da ferramenta de CFD. No método BES, a camada de ar é configurada no Domus com a condutividade térmica equivalente igual a $0,30\text{W(mK)}^{-1}$, valor calculado segundo método da norma brasileira [5], levando-se em conta radiação de onda longa entre superfícies. A camada da montagem de blocos de

concreto com argamassa de assentamento são configuradas com o valor de condutividade térmica igual a calculada por CFD, $0,498\text{W(mK)}^{-1}$. Os demais materiais sólidos, reboco e placa de cerâmica são configurados com propriedades idênticas em ambos os métodos de simulação. A Figura 5.24 mostra os domínios simulados no CFD. O passo de tempo utilizado foi de 20 minutos no Domus, portanto cada transiente no CFX tem 20 minutos de duração, com passo de tempo de 1 minuto. O tempo total de processamento do caso foi de 840 horas. Dados do computador: processor Intel Core I5, 4 processadores com 2.30GHz, memória de 6,0GB.

4

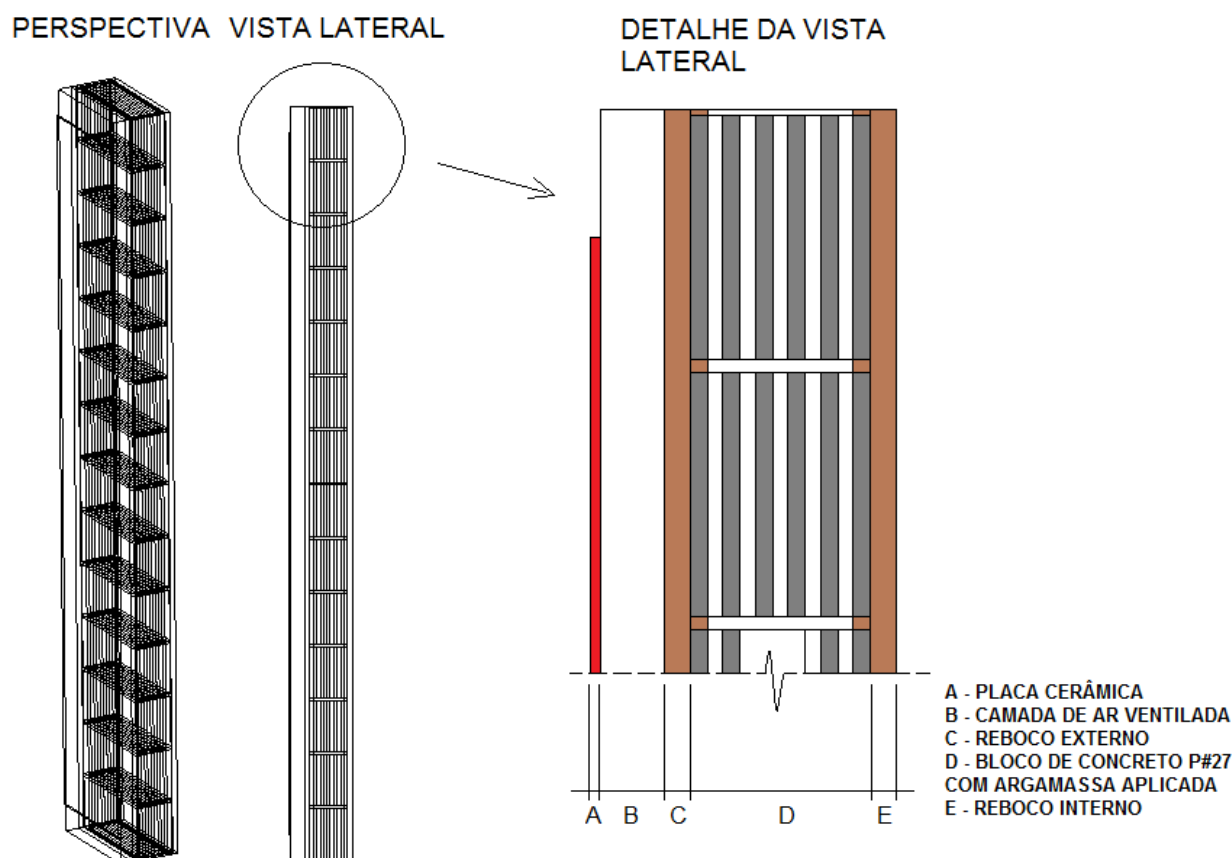


Figura 5.24 – Domínios simulados.

Contudo, a abordagem 3-D se apresenta com resultados muito diferentes. A Figura 5.26 mostra os resultados de temperatura de superfície interna da parede em análise para os Caso 4, mantendo-se os resultados do Caso 3 no gráfico.

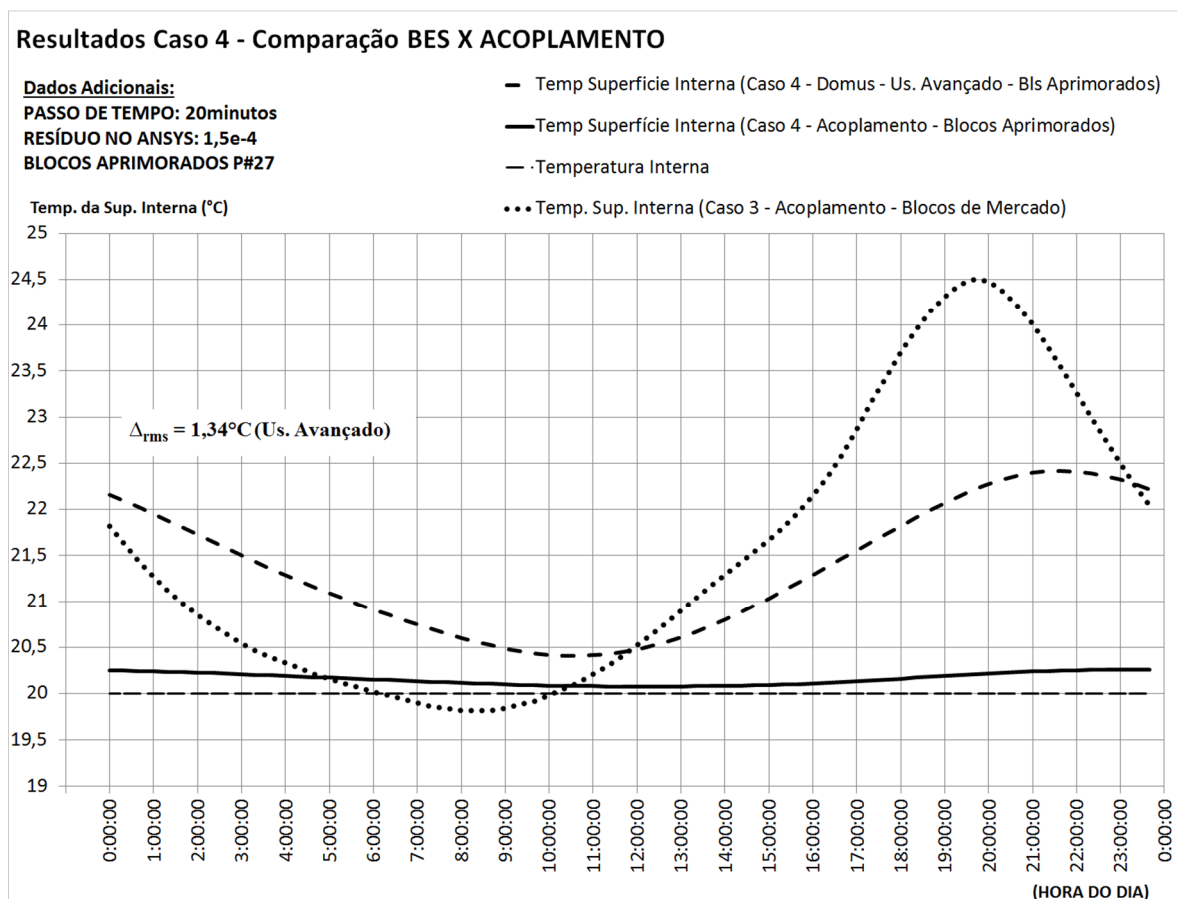


Figura 5.25 – Temperaturas de superfície interna para o Caso 4.

A parede se apresenta mais isolante termicamente no método acoplado BES-CFD: Ao longo das 24 horas, a temperatura de superfície interna da parede permanece muito próxima à temperatura da sala, 20°C alcançando o valor máximo de 20,26°C. Já na simulação realizada através do método BES, a temperatura da superfície interna da parede apresenta maiores variações,

principalmente no período da tarde, quando há incidência de radiação solar direta, alcançando 22,42°C.

Contudo, o calor transferido entre a parede e o ambiente acompanha as diferenças observadas. A Figura 5.26 apresenta a variação do fluxo de calor através da parede para ambos os métodos de simulação ao longo do dia para o caso 4, mantendo-se no gráfico os resultados do caso 3. Os fluxos de calor são de menores intensidades na parede quando simulada com o maior nível de detalhamento oferecido pelo acoplamento. Quando se integra a taxa de transferência de calor transferido na parede ao longo do dia, como mostra a Tabela 5.7, a diferença alcança os 88,1%.

Analisando-se os campos de temperatura expostos nas Figuras 5.27a e 5.27b, nota-se que o fluxo de ar da camada ventilada remove com eficiência o calor proveniente da radiação direta no ambiente externo (que está à esquerda das seções que mostram os perfis de temperatura nas figuras), e consegue evitar o aquecimento da parede de forma que a temperatura da superfície interna permaneça estável. A corrente de ar que se desenvolve dentro da camada de ar, com sentido ascendente, é intensa, desenvolvendo uma velocidade média próxima a 0,5m/s e um coeficiente convectivo de transferência de calor de $16,0W(m^2K)^{-1}$, aproximadamente, entre a superfície placa de cerâmica e o fluxo de ar da camada de ar ventilada às 16h, como mostra a Figura 5.28, que apresenta o campo de velocidades no plano médio da camada de ar ventilada.

Portanto a instalação da camada de ar ventilada se mostra eficaz, o que também pode ser demonstrado ao se comparar os resultados do caso 3 com o caso 4 quando simulados sob o método acoplado BES-CFD. Isto pode ser analisado nas Figuras 5.25 e 5.26. Apesar de que a parede está configurada com o bloco de mercado no caso 3, a temperatura de superfície chega a 24,5°C.

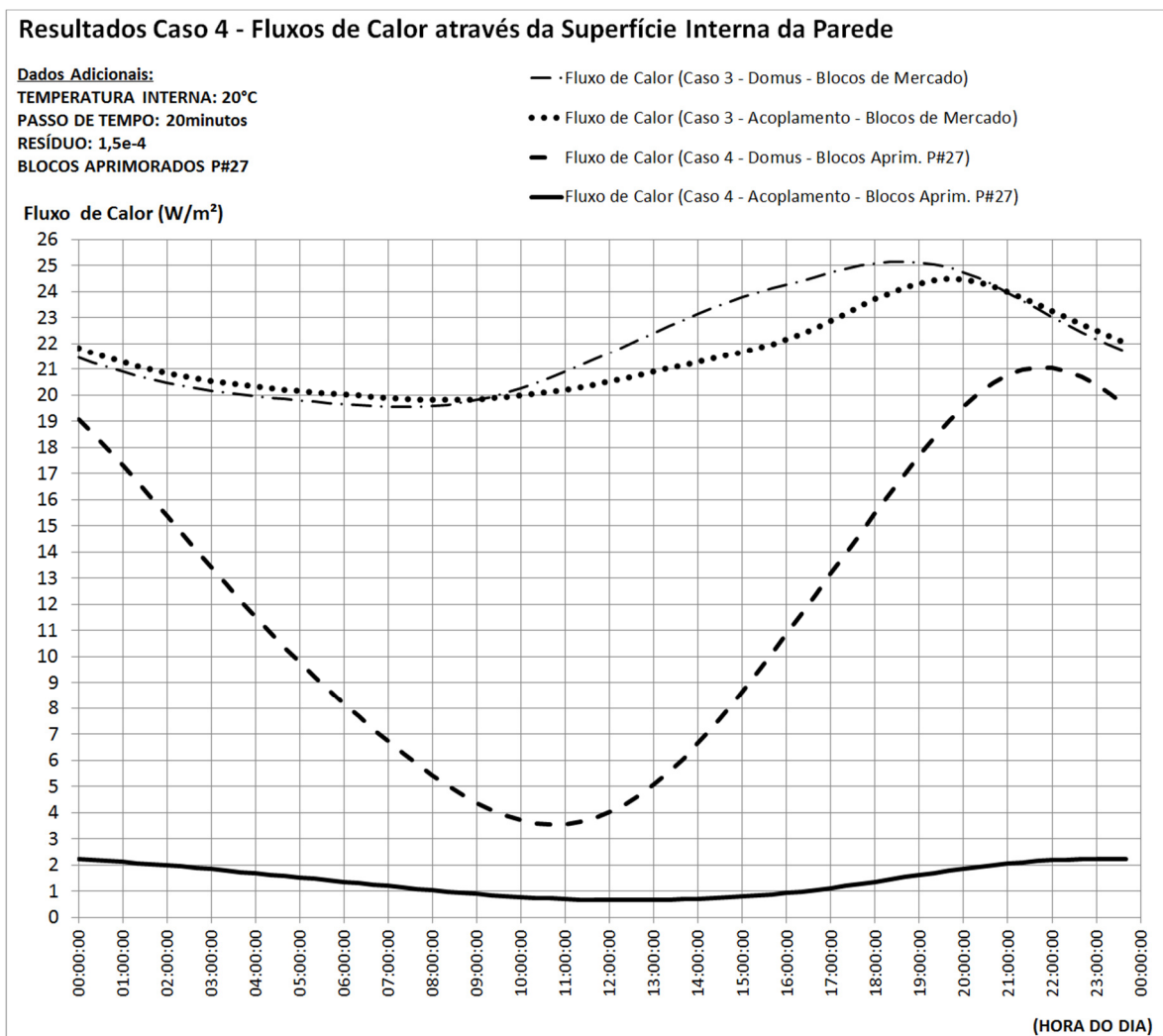


Figura 5.26 – Fluxo de calor na superfície interna da parede para o Caso 4.

Tabela 5.7 – Quantidade de calor transferido comparando-se os dois métodos de simulação para o Caso 4.

Energia	Domus	Acoplamento	Diferença (%)
Energia que sai em 24h (kJ)	0	-646	-
Energia que entra em 24h (kJ)	22.248	2.645	-88,1%

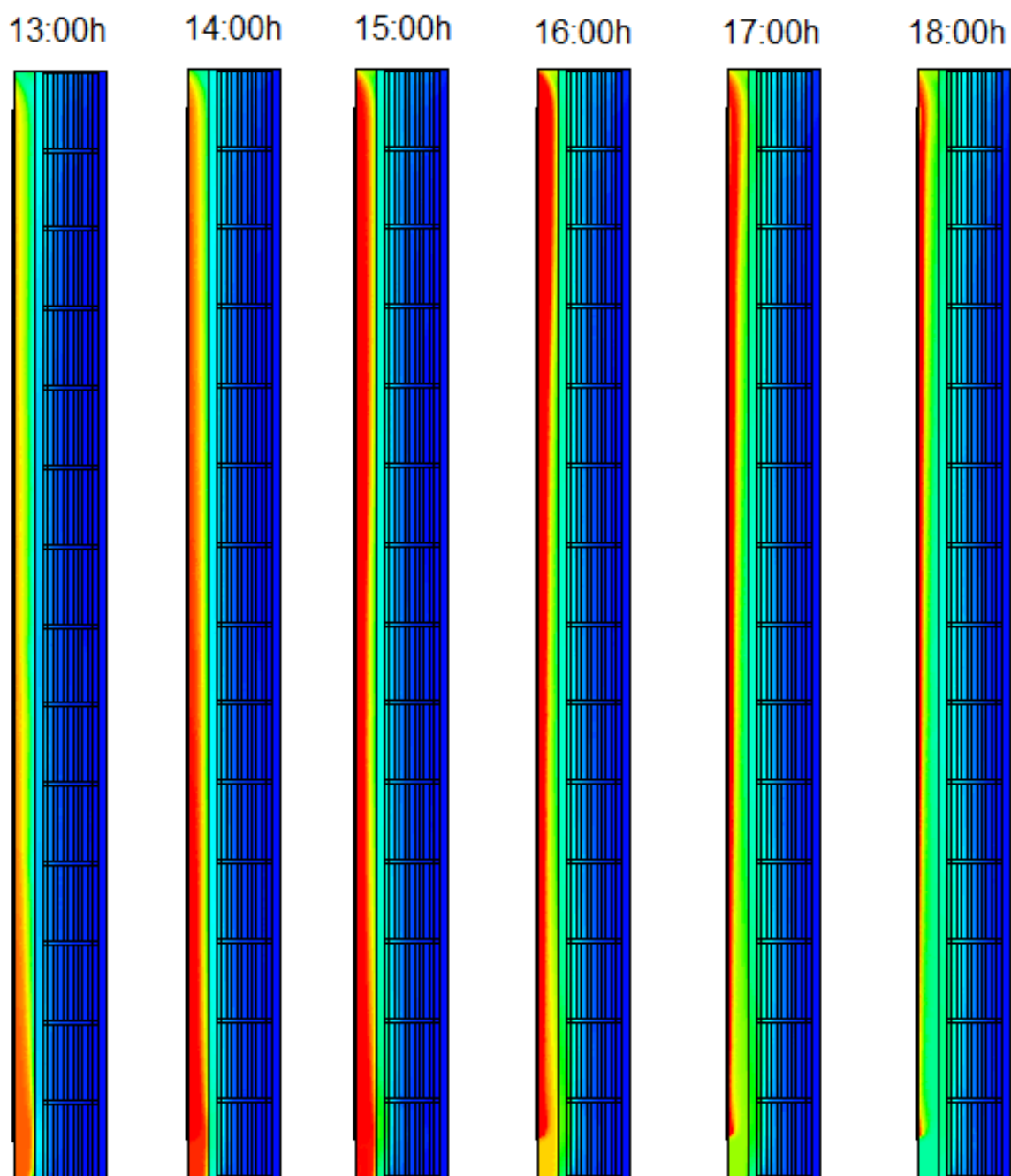


Figura 5.27a – Campos de temperatura no plano central das 13:00 às 18:00h - Caso 4.

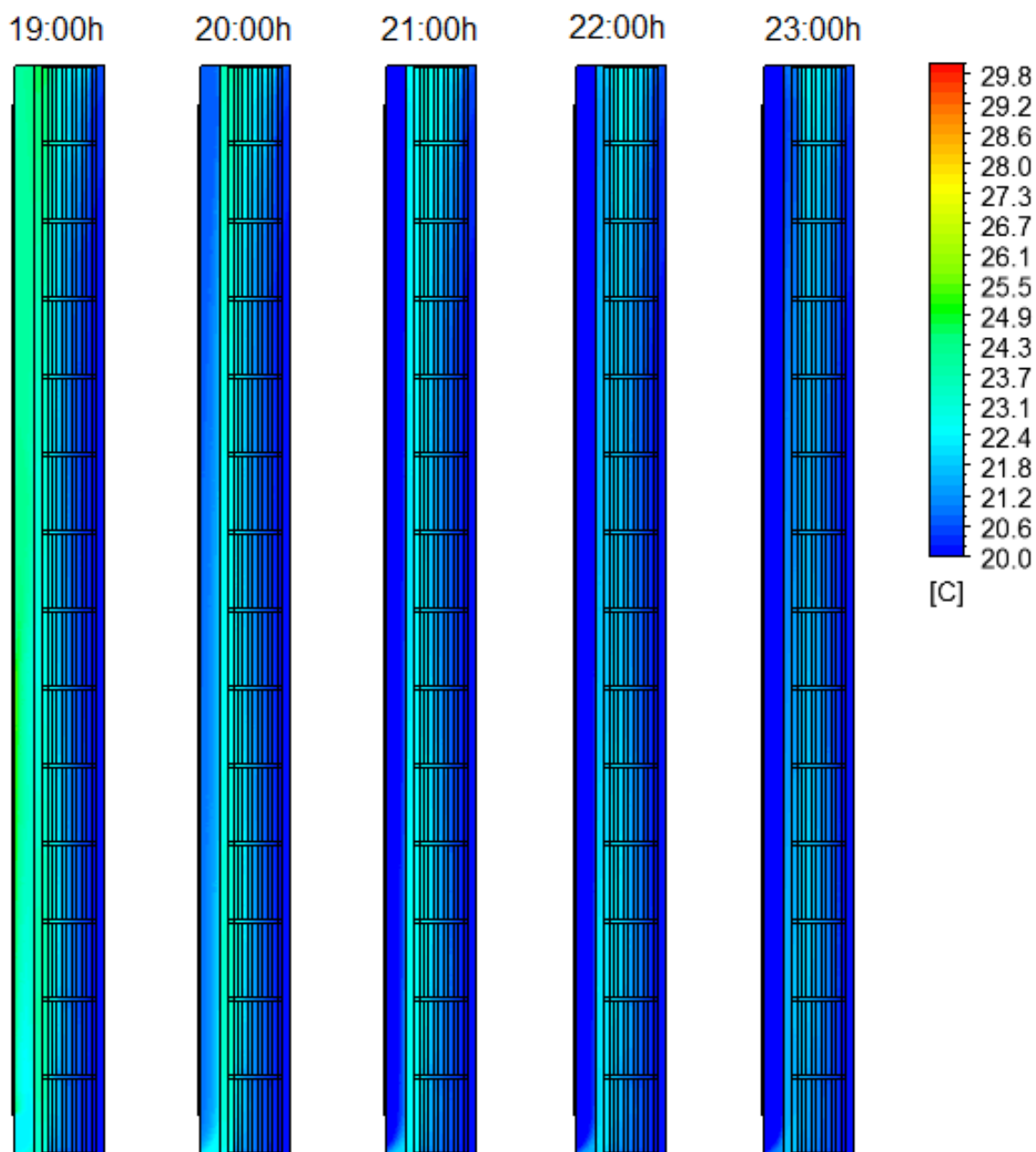


Figura 5.27b – Campos de temperatura no plano central das 19:00 às 23:00h - Caso 4.

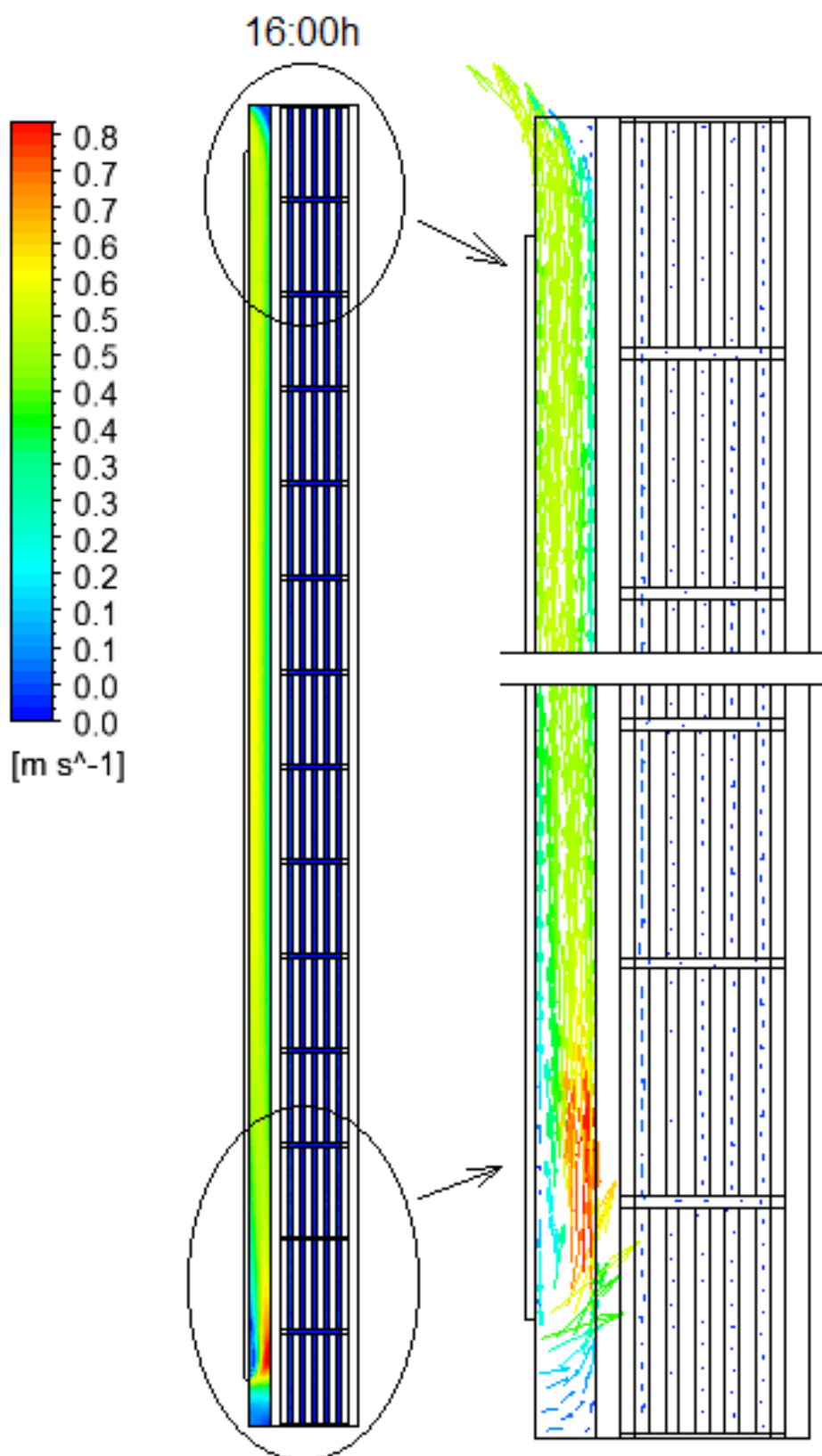


Figura 5.28 – Campo de velocidades no plano central às 16:00h - Caso 4.

Portanto, apesar do alto custo computacional, o método acoplado BES-CFD se torna uma poderosa ferramenta na análise de camadas de ar ventiladas. A camada de ar ventilada, geralmente construída para impor uma barreira à umidade proveniente de chuvas e também à radiações solares, minimiza as influências destes fenômenos à superfície interna da parede. Porém, como reportado por [49], a eficácia da instalação de uma camada de ar ventilada não é unanimidade entre os autores na literatura. Características específicas das condições climáticas de cada local e características construtivas da camada de ar podem levar a um desempenho desfavorável. Portanto, futuras simulações poderão investigar a eficácia de instalações em edificações, estudar o efeito de alterações de características de seu projeto e também, por exemplo, avaliar as mudanças no desempenho da camada de ar frente à influências de ventos direcionados.

Abaixo, a Tabela 5.8 resume os resultados dos casos 1, 3 e 4 que avaliam os ganhos em precisão de resultados com a abordagem detalhada no interior da parede proporcionada pelo acoplamento entre softwares.

Capítulo 5: Resultados Obtidos com o Acoplamento BES – CFD

Tabela 5.8 – Tabela resumo de resultados dos Casos 1, 2 e 3.

Caso de Estudo	Parâmetro	Domus	Domus	Acoplamento BES-CFD	
		Usuário menos experiente	Usuário Avançado		
<u>Caso 1</u> (Bloco de Mercado)	\bar{T}_{sup_int}	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ (°C)	1,04 *	0,25	Referência
		Δ_{rms} (°C)	0,64 *	0,14	Referência
	$E_{T_saída}$ (kJ)	-19.729 * (-26,9%)	-26.324 (-2,4%)	-26.978	
	$E_{T_entrada}$ (kJ)	3.628 * (-24,0%)	4.137 (-13,3%)	4.773	
<u>Caso 1</u> (Bloco P#27)	\bar{T}_{sup_int}	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ (°C)	1,08 **	0,59	Referência
		Δ_{rms} (°C)	0,62 **	0,36	Referência
	$E_{T_saída}$ (kJ)	-13.399 ** (-20,9%)	-19.203 (13,3%)	-16.947	
	$E_{T_entrada}$ (kJ)	986 ** (-39,6%)	2.326 (42,4%)	1.633	
<u>Caso 3</u>	\bar{T}_{sup_int}	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ (°C)	1,60 *	2,15	Referência
		Δ_{rms} (°C)	0,78 *	1,00	Referência
	$E_{T_saída}$ (kJ)	-198 * (-38,7%)	-1.142 (253,6%)	-323	
	$E_{T_entrada}$ (kJ)	20.346 * (-20,3%)	33.616 (31,8%)	25.513	
<u>Caso 4</u>	\bar{T}_{sup_int}	$\Delta_{m\acute{a}x.}$ (°C)	–	2,45	Referência
		Δ_{rms} (°C)	–	1,34	Referência
	$E_{T_saída}$ (kJ)	–	0 (-100%)	-646	
	$E_{T_entrada}$ (kJ)	–	22.248 (741%)	2.645	

* Usuário Básico

** Usuário Avançado

6 CONCLUSÕES E DISCUSSÕES

Blocos de concreto estruturais e não estruturais têm se destacado como uma alternativa mais econômica para as construções em alvenaria brasileiras. Atualmente atuam em aproximadamente 5% das edificações em construção. Mas, o modelo de bloco de concreto mais utilizado atualmente no Brasil possui baixíssimo nível de desempenho térmico, o que foi comprovado no presente trabalho. Expondo, portanto, uma oportunidade de desenvolvimento de modelos mais eficientes termicamente, objetivo deste trabalho.

Um programa de CFD foi utilizado para modelagem multidimensional do problema. O resultado de simulação encontrado para a condutividade térmica equivalente foi de $0,906\text{W(mK)}^{-1}$, sendo 4,3% superior ao valor medido em ensaio de laboratório.

No bloco atual de mercado, a troca de calor por radiação entre superfícies internas das cavidades é responsável por, aproximadamente, 29% da transferência total de calor. Já o fenômeno de convecção internamente às cavidades, por aproximadamente 23%. O padrão do movimento do ar internamente às cavidades é circular, abrangendo os dois blocos da montagem, dominado por forças de empuxo. Este padrão circular, abrangendo todos os blocos, se mantém mesmo aumentando-se o número de blocos na altura. Este movimento circular abrangente torna o problema tridimensional, evidenciado por $6,0^{\circ}\text{C}$ de diferença entre temperaturas encontradas na base e no topo da montagem. Com o uso do mesmo método de simulação, 17 outras configurações geométricas para o bloco de concreto foram estudadas, mantendo-se as mesmas dimensões externas, a mesma massa e a mesma fração de vazio.

Todas respeitam uma espessura mínima de parede de 10mm, definida após análise do processo de fabricação deste tipo de bloco de concreto.

Com o uso do mesmo método de simulação, 17 outras configurações geométricas para o bloco de concreto foram estudadas, mantendo-se as mesmas dimensões externas, a mesma massa e a mesma fração de vazio. Todas respeitam uma espessura mínima de parede de 10mm, definida após análise do processo de fabricação deste tipo de bloco de concreto. Entre elas, a proposta #27, com 5 cavidades, apresentou o melhor desempenho térmico como isolante, oferecendo uma condutividade térmica equivalente de $0,498\text{W(mK)}^{-1}$, uma redução de 45% em relação ao modelo de mercado.

Gratificante notar que este valor de ETC é 24% maior que a ETC mínima alcançada em [19] para tijolos de argila, sendo que este trabalho utilizou um valor de condutividade do concreto 19,3% acima do encontrado como padrão na literatura. Também no presente trabalho o bloco de concreto foi aprimorado com argamassa aplicada, atendendo a norma, o que minimiza os ganhos em relação a trabalhos que não a respeitaram. Resultado, portanto, que reposiciona o bloco de concreto no mercado como um produto viável termicamente.

Na configuração da proposta #27, a radiação entre superfícies internas das cavidades é responsável por, aproximadamente, 28% da transferência total de calor. A convecção interna das cavidades por aproximadamente 53%. A manutenção dos níveis de trocas de calor radiativas e convectivas é consequência do aumento da resistência térmica condutiva, diminuindo a parcela por condução e represando calor no lado quente e frio no lado frio. Portanto, maiores gradientes de temperatura e contudo, mesmo com mais cavidades, mantiveram um nível similar de troca por estes dois fenômenos.

O melhor desempenho da proposta #27 em relação ao modelo de mercado é alavancado por três características principais: i) eliminação da ponte térmica central presente no modelo de mercado, reduzindo expressivamente o calor

transferido por condução através da massa de concreto do bloco ; ii) aumento do número de cavidades, que reduziram os fluxos de calor convectivos e radiativos; e iii) diminuição da espessura das paredes externas laterais do bloco para 10mm, reduzindo também a transferência de calor por difusão no concreto entre as faces quente e fria.

Objetivando visualizar o potencial máximo possível de redução da condutividade térmica equivalente de um bloco de concreto, a proposta #28 desenhada com 15 cavidades e espessura de paredes de 3,84mm. Alcançou 77,5% de redução na ETC, ou $0,204\text{W(mK)}^{-1}$. Esta proposta é de difícil manufaturabilidade com os processos de fabricação atuais, mas mostra um grande potencial que ainda pode ser alcançado.

Na proposta #28, nota-se grande redução do fluxo de calor transferido por difusão, que ainda é responsável por 26% do calor total transferido. O aumento do número de cavidades reduziu a transferência de calor radiativo, sendo aproximadamente 19% do calor transferido. Portanto, o fenômeno de convecção tornou-se o principal agente.

Entende-se que é possível reduzir ainda mais a transmitância térmica das propostas #27 e #28 criando-se barreiras à circulação do ar internamente às cavidades, permanecendo como sugestão de pesquisa futura.

O valor da emissividade utilizada para o concreto no trabalho de aprimoramento do desempenho térmico do bloco, foi de 0,85. Uma alteração imposta nas superfícies internas que diminua a emissividade das cavidades para 0,50, reduz a ETC em, aproximadamente, 15%. Se a emissividade for reduzida a zero, a condutividade equivalente decresce em, aproximadamente, 24%.

A condutividade térmica equivalente é estável frente à variações dos coeficientes de convecção, condições de contorno das faces quente e fria. O estudo mostra a importância de se utilizar coeficientes de convecção acima de,

aproximadamente, $5,0\text{W}(\text{m}^2\text{K})^{-1}$ para uma melhor precisão em análises em regime permanente.

Quando imposta uma alteração hipotética do coeficiente de condutividade do concreto de $1,67\text{W}(\text{mK})^{-1}$ para $0,90\text{W}(\text{mK})^{-1}$, nota-se redução de 27,9% na ETC do bloco. Um importante indicativo aos pesquisadores que buscam novos materiais menos difusivos. Por outro lado, valoriza-se o resultado obtido com a proposta #27 que reduziu a condutividade térmica equivalente do bloco em 45% somente com alterações geométricas, mantendo-se a massa e as mesmas propriedades do material do bloco.

Para o bloco aprimorado da proposta #27, a mesma redução de $1,67\text{W}(\text{mK})^{-1}$ para $0,90\text{W}(\text{mK})^{-1}$, oferece redução de 9,9% na ETC.

A norma brasileira NBR 15220 [5] determina um método para cálculo da resistência térmica equivalente e, portanto, indiretamente, da condutividade térmica equivalente de elementos vazados como o bloco de concreto. Resultados obtidos com o método da norma foram comparados com os resultados das propostas simuladas. Para blocos com mais de uma cavidade no sentido da largura, o método normalizado subestima os resultados. Para a proposta #27, por exemplo, o cálculo com o método normalizado prevê ETC igual a $0,304\text{W}(\text{mK})^{-1}$, sendo 61% do resultado simulado, portanto, muito abaixo do esperado. O presente trabalho sugere às futuras pesquisas o aprofundamento da questão, para elaboração de propostas de melhorias no método de cálculo da norma.

No comparativo de resultados simulados e calculados pelo método da norma, as seguintes observações são feitas sobre o método atual da norma: i) deveria apresentar número maior de dados ou correlações para determinação da resistência térmica de cavidades com maior precisão; ii) não diferencia previsão de valores de resistência térmica entre cavidades mais externas e cavidades centrais. No presente estudo, nota-se que as cavidades adjacentes às faces quente

e fria têm atividades de convecção mais intensas e, portanto, menores resistências térmicas que cavidades centrais; iii) a hipótese de condução 1-D do método, nos materiais sólidos, despreza as parcelas de calor que desviam as resistências térmicas impostas pelas cavidades de ar, que têm resistências térmicas de maior magnitude; iv) a norma não prevê a possibilidade de comunicação de ar entre diferentes cavidades. As comunicações, presentes nos casos estudados, alteram a atividade de convecção nas cavidades, alterando a resistência térmica do bloco; e v) também ignora as temperaturas das faces interna e externa e, portanto, a magnitude do ΔT . A ETC é sensível à diferença de temperatura entre faces.

Permanece uma oportunidade para trabalhos futuros uma nova avaliação de valores de resistências térmicas de cavidades para avaliação e/ou correção da norma.

Programas para previsão de desempenho de edificações têm sido desenvolvidos e utilizados com o objetivo de prever o comportamento energético de um edifício ocupado em quaisquer condições ambientais. Esses programas utilizam modelos 1-D e puramente difusivos, mesmo os elementos que contêm cavidades e espaços maiores de ar tornam-se difusivos no modelo onde há necessidade de identificação de três propriedades termofísicas para os representarem: massa específica equivalente, calor específico equivalente e o coeficiente de condutividade térmica equivalente.

Contudo, para alcance de maior precisão, uma abordagem 3-D foi desenvolvida, considerando os três fenômenos de transferência de calor internamente aos elementos que constituem as paredes. Isto foi possível com a integração de um programa de CFD ao Domus, um programa de BES – *Building Energy Simulation program*. As potencialidades da nova abordagem foi explorada e o aumento alcançado na precisão de resultados foi investigado frente à abordagem 1-D. Para tais análises quatro diferentes casos de estudo

foram realizados. Os casos 1,3 e 4 avaliaram os ganhos de precisão alcançados pela nova abordagem. O caso 2 utilizou a nova ferramenta para comparar o desempenho térmico do bloco de concreto aprimorado da proposta #27 com o bloco de concreto atual de mercado.

O desempenho do bloco de concreto aprimorado foi avaliado em modelo dinâmico e transiente no caso 2 frente ao desempenho do bloco de mercado, com o uso da nova abordagem 3-D oferecida pelo acoplamento dos dois programas. Com os blocos de concreto aprimorados, os fatores de decréscimo e os atrasos térmicos calculados são significativamente maiores. O calor transferido ao longo do dia através da parede reduz. Por exemplo, nas simulações com temperatura interna fixa em 24°C, os fluxos de calor entre a parede e o ambiente interno permanecem mais próximos de zero, variando entre +5 e -23W/m². Já para os blocos originais de mercado, os fluxos encontrados variam entre +13,5 e -37,7W/m². As diferenças das energias transferidas para o exterior e para o interior do ambiente são expressivas: reduziu-se em 36,2% de calor transferido para fora do ambiente nos períodos de temperatura baixa e reduziu-se em 66,1% o calor transferido para dentro do ambiente nos períodos de temperatura elevada na superfície externa da parede.

Contudo, a proposta de um novo bloco de concreto demonstra notável melhora no desempenho térmico da parede. Os resultados são expressivos, reforçam a importante melhora de desempenho dos blocos aprimorados quando aplicados, pois proporcionam reduções de energias transferidas entre ambientes que ofereceriam grande redução de consumo de energia de equipamentos de climatização, objetivo constante da sociedade e de pesquisadores.

Nos três outros casos de estudos, resultados de simulações no programa de BES onde se configurou a parede em análise com o uso de elementos e dados da biblioteca do programa de BES ou com o uso de valores, de condutividade

térmica equivalente, calculados de acordo com a norma brasileira [5], apresentam erros grosseiros. No caso 1, onde uma parede simples é construída com blocos de mercado e com blocos aprimorados no Capítulo 4, erros relativos de 25% a 30% são observados para o calor transferido para fora do ambiente durante o dia simulado. No caso 3, as temperaturas da superfície interna se mantêm com diferenças ao longo de todo o dia para o usuário que utiliza dados da biblioteca do programa de BES, alcançando diferença de 1,9°C, resultando em erros relativos de 20,3% no calor deixa o ambiente.

O ganho de precisão alcançado puramente com o detalhamento dos elementos do interior da parede foi avaliado comparando-se simulações do método acoplado BES-CFD com simulações do método BES, onde a parede é configurada com valores de condutividades térmicas equivalentes calculadas com resultados de simulações no CFD.

Ambos os blocos de mercado e o bloco aprimorado da proposta #27 foram avaliados no caso 1. Com o bloco de mercado, o detalhamento do interior da parede ofereceu ganhos de precisão, apresentando diferenças de 0,25°C na temperatura de superfície interna, resultando em 4,2% de calor adicional transferido entre ambientes. Com o bloco aprimorado, a simulação acoplada apresentou maiores diferenças contra o método BES nas temperaturas de superfícies, alcançando 0,59°C as 8:20h da manhã. As diferenças de temperaturas observadas resultaram em ganhos de precisão no cálculo de fluxos de calor entre a parede e o ambiente em até 5,2Wm⁻², resultando na diferença de 11,7% no calor total transferido para fora do ambiente em 24horas e 29,8% para o calor total transferido para o ambiente.

Quando comparados os perfis de temperatura 1-D do programa de BES e 3-D do método acoplado BES-CFD, nota-se semelhanças, mas a

tridimensionalidade do campo de temperaturas observado no método acoplado é nítida e justifica as diferenças nos resultados.

O caso 3 elevou a complexidade da análise e das condições de contorno, incluindo-se multidimensionalidades nelas. O domínio de simulação no CFD incluiu a altura total da parede, com 14 blocos de concreto. O clima externo foi obtido de arquivo climático da cidade de Curitiba, incluindo-se a radiação direta. O acoplamento entre softwares tornou possível utilizar-se do modelo de cinemática solar e do modelo de sombreamento por contagem de pixels do Domus, que juntamente aos recursos do CFD, pode-se considerar a incidência da radiação direta apenas na área ensolarada da parede da edificação.

Os resultados da nova abordagem 3-D foram então comparados com a abordagem 1-D tradicional e significativas diferenças foram observadas em termos da temperatura da superfície interna da parede e de fluxos de calor. Durante a noite são observadas diferenças de temperatura de superfície de até $0,35^{\circ}\text{C}$. Durante o dia, alcança diferenças de até $2,15^{\circ}\text{C}$. Integrando-se fluxos de calor nas 24 horas do dia para ambos os métodos de modelagem, percebe-se que o calor transferido para o ambiente (pouco calor é transferido para fora do ambiente) é 24,1% menor para a simulação sob o novo método. Campos de temperaturas em seções da parede evidenciam a tridimensionalidade do caso e novamente justificam as diferenças de resultados observadas entre os métodos de simulação.

O caso de estudo número 4 adiciona uma camada de ar ventilada no lado exterior do ambiente e substitui o bloco atual de mercado pelo bloco aprimorado da proposta #27, acentuando-se ainda mais a complexidade da análise. As mesmas configurações de ambiente, condições de contorno e da parede foram impostas para os diferentes métodos de simulação para que novamente investigue-se a influência do detalhamento tridimensional do interior da parede.

O desempenho da camada de ar ventilada é muito superior quando modelada tridimensionalmente pelo método acoplado, tendo a superfície interna das placas cerâmicas sendo resfriadas com eficiência pelo fluxo vertical de ar externo no interior da camada de ar. Para o método acoplado BES-CFD, ao longo das 24 horas, a temperatura de superfície interna da parede permanece muito próxima à temperatura da sala, 20°C alcançando o valor máximo de 20,26°C. Já na simulação realizada através do método BES, a temperatura da superfície interna da parede apresenta maiores variações, principalmente no período da tarde, quando há incidência de radiação solar direta, alcançando 22,42°C. O calor transferido entre a parede e o ambiente acompanha as diferenças observadas. Quando se integra o calor transferido na parede ao longo do dia, as diferenças alcançam os 88,1% .

Contudo, a metodologia apresentada mostra seus benefícios:

- i) Análise mais realística dos fenômenos de transferência de calor e mecânica dos fluidos no interior da parede;
- ii) Precisão no posicionamento das diferentes massas térmicas que compõem os elementos influenciam na inércia térmica de cada subcamada dos elementos da parede, influenciando no perfil de temperatura e nas trocas de calor entre a parede e o ambiente;
- iii) O detalhamento do interior da parede também posiciona com precisão as resistências térmicas das cavidades ou outros elementos mais resistivos termicamente. Influenciando também na exatidão do perfil de temperatura na parede, principalmente devido ao comportamento sempre transiente do clima externo, com possibilidades de inversão de sentido do fluxo de calor;

- iv) Possibilidade de uso da bi dimensionalidade de informações de propriedades nas áreas das superfícies interna e externa das paredes que realizam trocas de calor com os ambientes;
- v) Ganho em precisão nos resultados dos balanços de energia necessários nas análises termoenergéticas de ambientes construídos, devido aos detalhamentos mencionados acima; e
- vi) Cada aplicação tem suas particularidades e os ganhos em precisão que a análise 3-D pode oferecer, variarão de caso a caso, mas o método acoplado BES-CFD garante ao usuário qualidade e precisão superior aos programas de BES com abordagem 1-D na parede, pois estes dependem da exatidão na determinação das propriedades equivalentes de cada camada que compõem a parede.

A simulação tridimensional no interior das paredes se mostra uma importante ferramenta na avaliação de projetos de elementos construtivos e aumenta a precisão de simulações, mas exige maior capacidade de processamento computacional, o que impossibilita a substituição, neste momento, do modelo 1-D. Porém, os resultados aqui apresentados são importantes e sugerem a continuidade do desenvolvimento e do uso da ferramenta em análises da física das edificações, visto que a tecnologia computacional evolui a cada ano.

Devido à alta exigência computacional, nos quatro casos de estudo apresentados, apenas uma parede do ambiente em análise foi modelada, sendo responsável pelas trocas entre os ambientes interno e externo. A existência de somente uma parede não adiabática reduz a interferência das condições climáticas externas na temperatura do ambiente interno. Portanto, acredita-se

que os resultados seriam mais acentuados caso todas as paredes estivessem atuando na transferência de calor entre os ambientes interno e externo.

Também, o fato das simulações realizadas realizarem o balanço de energia do ambiente com a temperatura média da superfície interna parede por não haver malha tridimensional no ambiente interno, diminui-se a precisão nos resultados, pois, perde-se informação bidimensional obtida pelo programa de CFD. Recomenda-se estudos futuros com CFD nos ambientes internos e externos, adicionando malhas de volumes finitos nos ambientes para a investigação dos ganhos adicionais de precisão nos resultados.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BEN, Balanço Energético Nacional, Ministério de Minas e Energia, 2016.
<https://ben.epe.gov.br>
2. SULFSTEDE L., “Applying Power Electronics to Residential HVAC – The Issues”, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.29, NO.2, Março/Abril 1993.
3. FEDRIGO, NATÁLIA S.; GONÇALVES GUILHERME; LUCAS, PAULO F.. Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro, Relatório, UFSC, Florianópolis, 2009.
4. RIBEIRO, L. P., Conforto térmico e a prática do projeto de edificações: recomendações para Ribeirão Preto, Dissertação de Mestrado, USP São Carlos, 2008.
5. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações; ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
6. NBR 15575 – Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos; ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.
7. ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland – www.abcp.org.br.
8. Site: www.usimak.com.br
9. Arendt, K; Krzaczek, M.; Florczuk, J.; Numerical analysis by FEM and analytical study of the dynamic thermal behavior of hollow bricks with different cavity concentration. International Journal os Thermal Sciences, v. 50, pp 1543-1553, 2011.
10. ASAN H.; Investigation of wall’s optimum insulation position from maximum time lag and minimum decrement factor point of view. Energy and Buildings, v. 32, pp. 197-203, 2000.
11. ASTE N.; ANGELOTTI A.; BUZZETTI M.; The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. Energy and Buildings, v. 41, pp. 1181-1187, 2009.
12. MENDES N.; OLIVEIRA R. C. L. F.; SANTOS G. H. DOMUS 2.0: A whole-building hygrothermal simulation program. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE(BUILDING SIMULATION), 8., 2003, Eindhoven, Holanda. Proceedings... Eindhoven:IBPSA, 2003.
13. ISO 6946:1996(E) – Building componentes and building elements – Thermal resistance and termal transmittance – Calculation method. 2007.

14. ANDERSON B.R.; On the Calculation of the U-value of Walls Containing Slotted Bricks or Blocks. *Building and Environment*, Vol. 16, N. 1, pp. 41-50, 1981.
15. LORENTE S.; PETIT M.; JAVELAS R.; Simplified analytical model for thermal transfer in vertical hollow brick. *Energy and Buildings*, 24 (1996). P. 95-103.
16. LORENTE S.; PETIT M.; JAVELAS R.; The effects of temperature conditions on the thermal resistance of walls made with different shapes vertical hollow bricks. *Journal of Energy and Buildings*, 28 (1998). P. 237-240.
17. Al-Hazmy M. M.; Analysis of coupled natural convection-conduction effects on the heat transport through hollow building blocks. *Journal of Energy and Buildings*, 38 (2006). P. 515-521.
18. DÍAZ, J.J. del Coz; GARCIA NIETO P.J.; BIEMPICA B.; PRENDES GERO M.B., Analysis and optimization of the heat-insulating light concrete hollow brick walls design by the finite element method. *Applied Thermal Engineering*, v.27, pp. 1445-1456, 2007.
19. LI L.P.; WU Z.G.; HE Y.L.; LAURIAT G.; TAO W.Q.; Optimization of the configuration of 290x140x90 hollow clay bricks with 3-D numerical simulation by finite volume method. *Energy and Buildings*, 40 (2008), p. 1790-1798.
20. SUN J.; FANG L.; Numerical Simulation of Concrete Hollow Bricks by the Finite Volume Method, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52 (2009), p.5598-5607.
21. SUN J.; FANG L.; HAN J., Optimization of concrete hollow brick using hybrid genetic algorithm combining with artificial neural networks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.53, pp. 5509-5518, 2010.
22. SVOBODA Z.; KUBR M.; Numerical Simulation of Heat Transfer Through Hollow Bricks in the Vertical Direction, 34 (2011).
23. SANTOS, G. H.; FOGIATTO M. A., MENDES N.; Numerical analysis of thermal transmittance of concrete hollow blocks. *International Journal of Building Physics*, 2017.
24. NEGRÃO, C.; Integration of computational fluid dynamics with building thermal and mass flow simulation. *Energy and Buildings*, v. 27, pp. 155-165, 1998.
25. ZHAI Z., CHEN Q.; Strategies for coupling energy simulation and computational fluid dynamics programs. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2001.
26. ZHAI Z., CHEN Q.; Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs. *Energy and Buildings*, v.35, pp. 493-505, 2003.
27. ZHAI Z., CHEN Q.; Numerical determination and treatment of convective heat transfer coefficient in the coupled building energy and CFD simulation. *Building and Environment*, v.39, pp. 1001-1009, 2004.

Capítulo 7: Referências Bibliográficas

28. ZHAI Z., CHEN Q.; Sensitivity analysis and application guides for integrates building energy and CFD simulation. *Energy and Buildings*, v.38, pp. 1060-1068, 2006.
29. BARTAK M.; BEAUSOLEIL-MORRISON I.; CLARKE J.A.; DENEV J.; DRKAL F.; LAIN M.; MACDONALD I.A.; MELIKOV A.; POPIOLEK Z.; STANKOV P.; Integrating CFD and building simulation. *Building and Environment*, v.37, pp.865-871, 2002.
30. DJUNAEDY E.; HENSEN J.L.M.; LOOMANS M.G.L.C.; External Coupling between CFD and Energy Simulation: Implementation and Validation. *ASHRAE Transactions*, v.111, Part 1, 2005.
31. WANG L.; WONG N.H.; Coupled simulations for naturally ventilated rooms between building simulation (BES) and computational fluid dynamics (CFD) for better prediction of indoor thermal environment. *Building and Environment*, v.44, pp.95-112, 2009.
32. 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 - PUC-PR, 2011.
33. MENDES, N. ; PHILIPPI, P. C. ; LAMBERTS, R.. A New Mathematical Method to Solve Highly-Coupled Equations of Heat and Mass Transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, England, v. 45, n. 3, p. 509-518, 2002.
34. CHEREM-PEREIRA, G.; MENDES N., Empirical modeling of room air conditioners for building energy analysis. *Energy and Buildings*, v. 47, p. 19-26, 2012.
35. ABNT NBR 6136 – Blocos vazados de concreto simples para alvenaria; ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
36. GRAY, D.D. ; GIORIN, A.. The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 19, p. 545-551, 1976.
37. Ansys CFX - Solver Modeling Guide, 2009, Ansys Inc..
38. WILCOX, 1993.
39. Ansys CFX – Solver Theory Guide, Ansys Inc., 2013.
40. PAVLIK Z.; JERMAN M.; TRNIK A.; KOCI V.; CERNY R.; Effective thermal conductivity of hollow bricks with cavities filled by air and expanded polystyrene; *Journal of Building Physics*, Vol. 37(4) p. 436-448; 2014.
41. HAGENTOFT C. E.; Hamstad WP2; Modeling; v.4 Chalmers University of technology, Department of Building Physics, p 1-17, 2001.
42. ROCHA A.P., OLIVEIRA R.C.L.F., MENDES N., Experimental validation and comparison of direct solar shading calculations within building energy simulation tools: polygon clipping and pixel counting techniques, *Solar Energy*, 2017 (in press).

Capítulo 7: Referências Bibliográficas

43. SITE: <https://mondoarq.wordpress.com/>
44. MARCHI, C. H., Verificação de Soluções Numéricas Unidimensionais em dinâmica dos fluidos. Tese de Doutorado, UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2001.
45. INCROPERA, F.; DE WITT, D.; Fundamentos da Transferência de Calor e de Massa, 1992
46. GRUPO GAI, visita à indústria de blocos de concreto, Curitiba, Paraná.
47. COSTA, C. N.; Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio. Tese de Doutorado, USP-Universidade de São Paulo, Brasil, 2008.
48. ASTM C1363 – Standard Test Method for Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus. ASTM International, 2011.
49. BELLEGHEM, M. V.; STEEMAN, M.; JANSSENS A.; PAEPE M.; Heat, air and moisture transport modelling in ventilated cavity walls. Journal of Building Physics, Vol. 38(4), p. 317-349, 2014.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES:

50. MANUAL DE DESEMPENHO – ALVENARIA COM BLOCOS DE CONCRETO-GUIA PARA ATENDIMENTO À NORMA ABNT 15575, Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto – Bloco Brasil, 2014.
51. MENDES N.; WESTPHAL F. S.; LAMBERTS R.; CUNHA NETO J. A . B.; Uso de Instrumentos Computacionais para Análise do Desempenho Térmico de Edificações no Brasil, Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.
52. MENDES, N.; Modelos para previsão da transferência de calor e de umidade em elementos porosos de edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.
53. ABRAVA – Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento; www.abrava.com.br.
54. SULFSTEDE L., “Applying Power Electronics to Residential HVAC – The Issues”, IEEE Transactions on Industry Applications, VOL.29, NO.2, Março/Abril 1993.

APÊNDICE A – METODOLOGIA DE DISCRETIZAÇÃO DO Ansys-CFX [39]

Fonte: versão do documento original [39]

Soluções analíticas às equações de Navier-Stokes existem somente para problemas simplificados e sob condições ideais. Para obter soluções para fluxos reais uma abordagem numérica deve ser adotada onde as equações de Navier-Stokes são substituídas por aproximações algébricas que podem ser resolvidas usando um método numérico.

O Ansys-CFX usa um método de volumes finitos baseado em elementos o qual primeiramente discretiza o domínio espacial utilizando-se de uma malha. A malha é utilizada para construir volumes finitos, os quais são usados para conservar propriedades como massa, momento e energia. A malha é tridimensional.

Para simplificar a ilustração deste processo, a figura abaixo mostra uma malha bidimensional. Todas as variáveis da solução e propriedades do fluido são armazenadas nos nós que são os vértices. Um volume de controle (área sombreada) é construída em torno de cada nó usando-se de medianas que ligam os centros das arestas com o centro dos elementos.

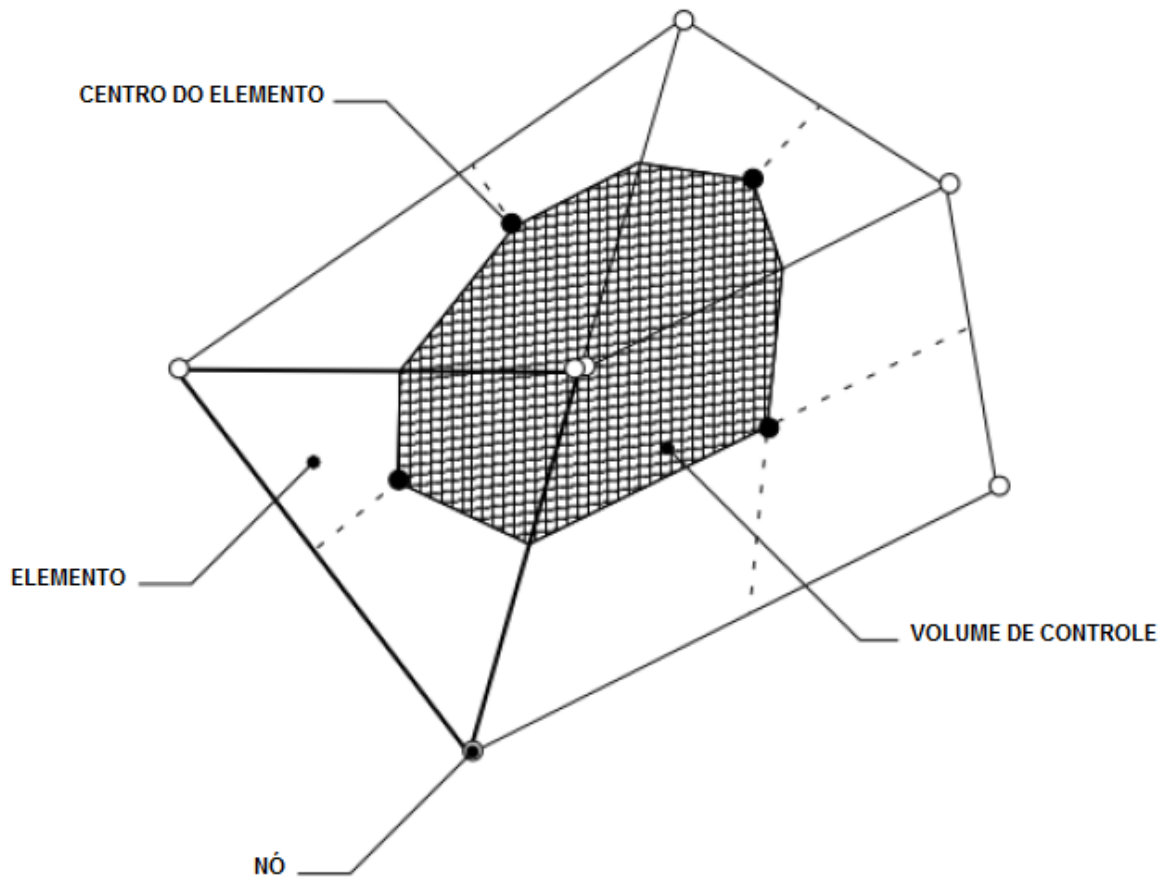


Figura A.1 – Definição do Volume de Controle.

Para ilustrar a metodologia de volumes finitos utilizada, consideram-se as equações de conservação da massa, de quantidade de movimento e a equação de transporte de um escalar, caso da temperatura no interior das cavidades, expressas em coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varphi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) \right) + S_\varphi \quad (\text{A.3})$$

Essas equações são integradas para cada volume de controle e o teorema de Gauss é aplicado para converter integrais de volume que envolvem gradientes e divergentes, em integrais de superfície. As equações tomam as formas integrais abaixo:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho U_j dn_j = 0 \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_V \rho U_i dV + \int_S \rho U_j U_i dn_j = & - \int_S P dn_j + \int_S \mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \right. \\ & \left. \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{Ui} dV \quad (\text{A.5}) \end{aligned}$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \varphi dV + \int_S \rho U_j \varphi dn_j = \int_S \Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_\varphi dV \quad (\text{A.6})$$

Onde Γ_{eff} indica a função de difusividade do escalar, V e S indicam se a região de integração é volume ou superfície, e dn_j é o diferencial do vetor na direção normal à superfície. As integrais de volume representam termos que acumulam ou termos fonte e as integrais de superfície representam as somas dos fluxos.

O próximo passo no algoritmo numérico é discretizar as integrais de volume e de superfície. Para ilustrar este passo, considera-se o elemento da Figura B.2:

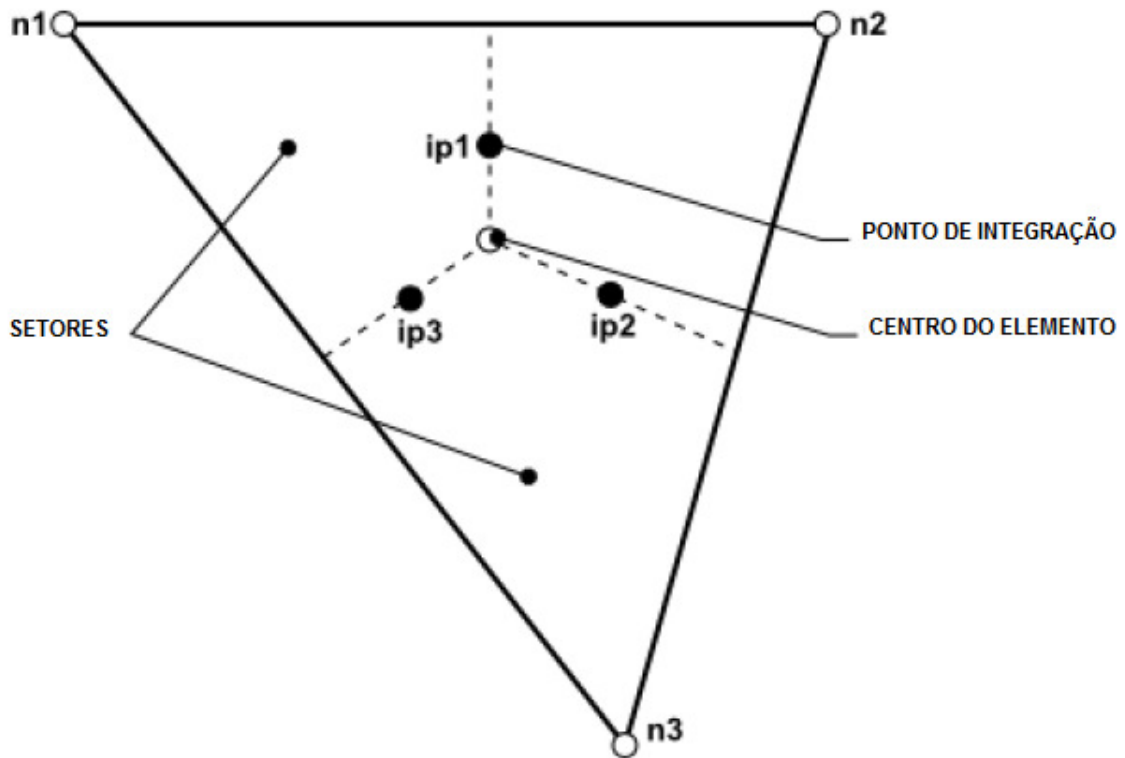


Figura A.2 – Elemento de malha.

Integrais de volume são discretizadas dentro de cada setor do elemento e somadas ao volume de controle a qual o setor pertence. Integrais de superfície são discretizadas nos pontos de integração localizados no centro de cada superfície de segmento dentro de um elemento e então distribuído aos volumes de controle adjacentes aos pontos de integração.

É garantido que as integrais de superfície são conservativas localmente.

Após discretizadas as integrais de volume e de superfície, as equações tomam os seguintes formatos:

$$V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} = 0 \quad (\text{A.7})$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_i)_{ip} \quad (\text{A.8})$$

$$V \left(\frac{\rho \varphi - \rho^0 \varphi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} \dot{m}_{ip} \varphi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \frac{\partial \varphi}{\partial x_j} \Delta n_j \right)_{ip} + \overline{S}_\varphi V \quad (A.9)$$

Onde:

- $\dot{m}_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}$;
- V é o volume do volume de controle;
- Δt é o passo de tempo;
- o sobrescrito “0” refere-se ao passo de tempo anterior.

Campos vetoriais e escalares são armazenadas nos nós da malha. Porém, para avaliar muitos dos termos, os valores ou seu gradiente deve ser aproximado nos pontos de integração. Para realizar essas aproximações, o Ansys-CFX usa funções de forma do elemento finito. A função de forma descreve a variação de uma variável escalar φ dentro de um elemento finito:

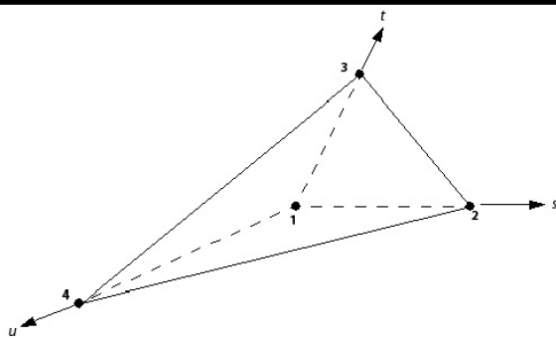
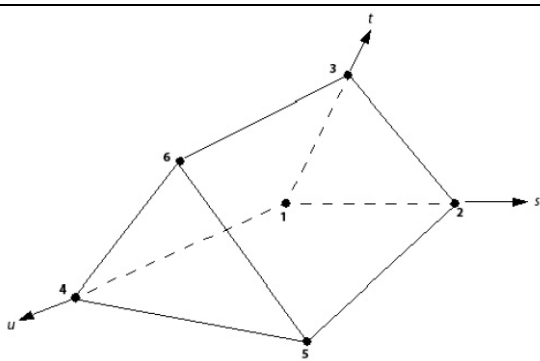
$$\varphi = \sum_{i=1}^{Nnós} N_i \varphi_i \quad (A.10)$$

Onde N_i é a função de forma para o nó i e φ_i é o valor da propriedade no nó i . A somatória engloba todos os nós do elemento.

As funções de forma referentes aos tipos de elementos de malha utilizados são apresentados da Tabela B1:

Apêndice A

Tabela A.1 – Funções de forma.

TIPO DE ELEMENTO	ELEMENTO	FUNÇÕES DE FORMA
TETAÉDRICO		$N_1(s,t,u) = 1 - s - t - u$ $N_2(s,t,u) = s$ $N_3(s,t,u) = t$ $N_4(s,t,u) = u$
PRISMA TRIANGULAR		$N_1(s,t,u) = (1 - s - t)(1 - u)$ $N_2(s,t,u) = s(1 - u)$ $N_3(s,t,u) = t(1 - u)$ $N_4(s,t,u) = (1 - s - t)u$ $N_5(s,t,u) = s \cdot u$ $N_6(s,t,u) = t \cdot u$

Diversas outras funções e métodos numéricos ainda são empregados para realizar a discretização numérica e para o alcance da solução acoplada. As demais funções e métodos empregados podem ser obtidos em [39].

APÊNDICE B – ENSAIO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA EQUIVALENTE DAS AMOSTRAS DO BLOCO DE CONCRETO ORIGINAL DE MERCADO.

O modelo de bloco em estudo foi recebido e analisado no LST - Laboratório de Sistemas Térmicos da PUCPR, onde há um aparato de teste para medição da transferência de calor e posterior cálculo da condutividade térmica Efetiva da amostra. O método de medição utiliza um dispositivo do tipo Caixa Quente Protegida, conforme norma ASTM C1363-05 [48], portanto, como referência para a construção do dispositivo. A Figura B.1 ilustra esquematicamente a Caixa Quente Protegida onde se observam duas câmaras principais que simulam as condições de temperatura interna (câmara fria) e externa (câmara quente) à edificação. Internamente à câmara quente, posiciona-se a Caixa Quente que envolve este lado da amostra, mantendo-o com temperatura e velocidade do ar controlada. Na câmara fria também se observam a inclusão de dispositivos que têm a função de induzir um fluxo de ar paralelo à amostra sob ensaio e também próximo ao padrão laminar. A condição de temperatura internamente à Caixa Quente é mantida a mesma da câmara quente, minimizando a transferência de calor através das cinco paredes da Caixa Quente que fazem fronteira com a câmara quente. A energia elétrica consumida pelo conjunto ventilador e resistência elétrica da Caixa Quente é medida após estabilizadas as condições ambientes e um balanço de energia é aplicado para determinar a taxa de calor transferido através da amostra de parede, \dot{q} . Todo este trabalho de construção e medição da amostra está apresentado detalhadamente em Turco [32].

Apêndice B

Como resultados destas medições foram obtidos valores que serão utilizados para validar configurações de modelagem adotadas, tais como: Condutividade Térmica Equivalente da amostra de parede, λ_{eq} , no valor de $0,86\text{W}/(\text{m K})$ com incerteza de medição aproximada de dez por cento [32], Condutividade térmica do concreto, λ_{conc} , como material homogêneo e contínuo, no valor de $1,67\text{W}/(\text{m K})$, Coeficiente global de transferência de calor da parede, U_{parede} , igual de $3,37\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ com velocidades do ar nas duas superfícies da amostra iguais a $0,3\text{m/s}$.

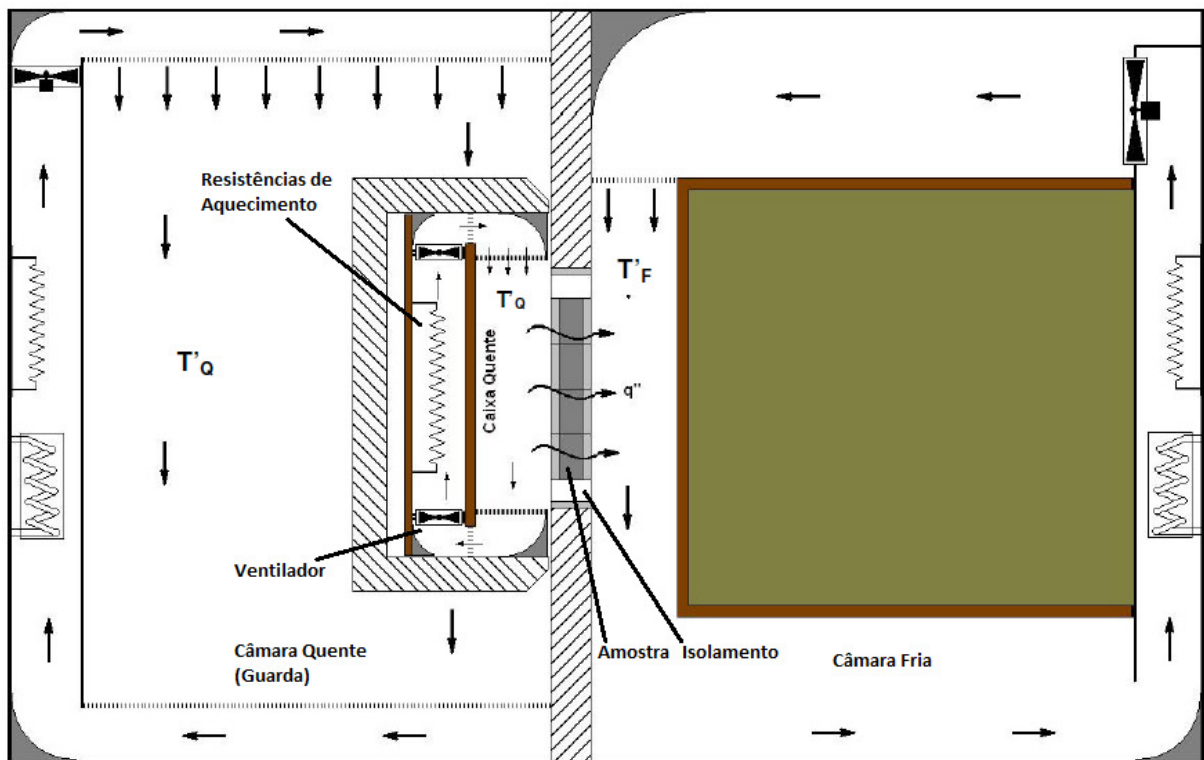


Figura B.1 – Aparato tipo Caixa Quente Protegida [32].

APÊNDICE C – MODELO DE TURBULÊNCIA K-ÔMEGA NO CFX

Fonte: versão do documento original [39]

Turbulência consiste em flutuações em tempo e espaço no campo de velocidades. É um processo complexo principalmente porque é tri-dimensional e acontece em diferentes escalas. Pode ter efeito significativo nas características do fluxo. Turbulência ocorre quando as forças de inércia no fluido se tornam significativas comparadas às forças viscosas e é caracterizada por altos números de Reynolds.

Em princípio, as equações de Navier-Stokes descrevem ambos fluxos laminares e turbulentos sem a necessidade de informações ou modelos adicionais. Porém, fluxos turbulentos com números de Reynolds realísticos engloba uma grande faixa de tamanho de vórtices e escalas de tempo e geralmente envolve escalas de comprimento muito menores que o menor volume finito da malha, as quais podem ser normalmente utilizadas em análises numéricas.

A análise direta das equações de Navier-Stokes (DNS) destes fluxos requereria uma capacidade de processamento numa ordem de magnitude muito maior que a disponível.

Para tornar capaz a previsão dos efeitos da turbulência, uma grande quantidade de pesquisas em CFD têm concentrado esforços em métodos que fazem uso dos modelos de turbulência. Os modelos têm sido especificamente desenvolvidos para levarem em consideração os efeitos da turbulência sem a necessidade de uma malha proibitivamente fina e sem a necessidade de analisar diretamente a equação de Navier-Stokes. A maioria dos modelos de turbulência são estatísticos. É o caso dos modelos k- ϵ e do k- ω .

Quando se observa em escalas de tempo muito maiores que as escalas de tempo das flutuações turbulentas, o fluxo turbulento pode ser determinado a partir de características médias, com uma variação de tempo adicional, um componente de flutuação. Por exemplo, um componente de velocidade pode ser composto por um valor médio e um componente que varia no tempo.

Em geral, os modelos de turbulência buscam modificar as equações originais de Navier-Stokes com a introdução de quantidades médias com as suas flutuações, produzindo as equações RANS – Reynolds Averaged Navier-Stokes. Modelos de turbulências baseados em equações RANS são conhecidos como modelos estatísticos devido ao procedimento empregado para determinação de médias estatísticas para obterem as equações. Simulações das equações RANS reduzem eficazmente o esforço computacional comparadas a simulações diretas de Navier-Stokes e portanto são geralmente adotadas em soluções de engenharia. Porém, o procedimento de encontrar as médias estatísticas gera termos desconhecidos, produtos de propriedades que seus valores flutuam, os quais agem como tensões adicionais no fluido. Esses termos, chamados de tensões turbulentas ou tensões de Reynolds são difíceis de determinar diretamente e se tornam incógnitas.

Tensões turbulentas precisam ser modeladas através de equações adicionais de quantidades conhecidas a fim de alcançar o número suficiente de equações para fechar o conjunto de equações com solução possível, ou seja, número suficiente de equações para todas as incógnitas. Incluindo o tensor de tensão de Reynolds que resulta do procedimento de médias estatísticas. As equações utilizadas para completar o conjunto de equações são o que definem o tipo de modelo de turbulência utilizado.

Como mencionado acima, modelos de turbulência buscam solucionar um conjunto de equações de transporte modificadas pela introdução de médias de

variáveis com suas flutuações. Por exemplo, uma velocidade U_i pode ser definida pela média \bar{U}_i e uma componente variável no tempo u_i :

$$\bar{U}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} U_i dt \quad (\text{C.1})$$

onde Δt é a escala de tempo que é grande relativamente às flutuações da turbulência, mas pequena relativamente à escala de tempo a qual as equações são resolvidas. Para fluxos compressíveis, as médias são ponderadas pela densidade, mas para simplificar as equações a seguir assumem que as flutuações de densidade são desprezíveis. Substituindo-se as quantidades médias dentro das equações de transporte originais, alcançam-se as equações RANS abaixo. A barra que simboliza média é descartada para as velocidades médias, exceto para as que representam flutuações.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (\text{C.2})$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M \quad (\text{C.2})$$

Onde τ é o tensor de tensão molecular (incluindo tensões normais e de cisalhamento).

A equação da continuidade não se altera mas as equações de momento (Equação A.2) e de transporte de escalares (Equação A.3) contêm termos do fluxo turbulento adicionais aos fluxos difusivos moleculares, que são as tensões turbulentas ($\rho \overline{u_i u_j}$). Esses termos surgem do termo convectivo nas equações

sem as médias. Eles refletem o fato de que o transporte convectivo devido às flutuações de velocidade turbulenta age para aumentar a mistura, o movimento.

A equação de energia com as médias de Reynolds torna-se:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i h} \right) + S_E \quad (C.3)$$

Essa equação contém um termo de fluxo turbulento adicional - $\rho \overline{u_i h}$. A entalpia total média é dada pela equação abaixo.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U_i U_i + k \quad (C.4)$$

Nota-se que a entalpia total contém uma contribuição da energia cinética turbulenta, k , dada por:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i^2} \quad (C.5)$$

Similarmente, outro escalar qualquer pode ser composto por uma média, Φ , e seu componente variável no tempo, φ . Após retirar a barra que indica média, exceto nos produtos de quantidades que flutuam, a equação de transporte de escalares torna-se:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i \Phi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} - \rho \overline{u_j \varphi} \right) + S_\Phi \quad (C.6)$$

Onde $\rho \overline{u_j \varphi}$ é o fluxo turbulento de Reynolds.

O modelo de turbulência utilizado, k-ômega ou k- ω , completará o conjunto de equações providenciando modelos para cálculo de tensões de Reynolds e fluxos turbulentos de Reynolds.

Os modelos k-ômega e k-epsilon são chamados de modelos de viscosidade turbulenta, esses modelos sugerem que a turbulência consiste de pequenos vórtices que são continuamente formados e dissipados, e nos quais as tensões de Reynolds ($\rho\overline{u_i u_j}$) são assumidas serem proporcionais aos gradientes de velocidades médias. Isto é o que define os modelos como de viscosidade turbulenta.

A teoria de viscosidade turbulenta assume que o tensor de Reynolds ($\rho\overline{u_i u_j}$) pode ser relacionado aos gradientes de velocidades médias e a viscosidade turbulenta pela hipótese de difusão de gradiente:

$$-\rho\overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \right) \quad (C.7)$$

Onde μ_t é a viscosidade turbulenta que deve ser modelada.

A hipótese da viscosidade turbulenta determina que o fluxo de um escalar é linearmente relacionado ao gradiente da média do escalar:

$$-\rho\overline{u_i \phi} = \Gamma_t \frac{\partial \phi}{\partial x_i} \quad (C.8)$$

Onde Γ_t é a difusividade turbulenta que é definida por:

$$\Gamma_t = \frac{\mu_t}{Pr_t} \quad (C.9)$$

Onde Pr_t é o número de Prandtl turbulento.

As equações acima podem expressar flutuações turbulentas em termos de funções de variáveis médias somente se a viscosidade turbulenta, μ_t , é conhecida. Ambos os modelos k-epsilon e k-ômega usam esta propriedade. Assumindo essas hipóteses, as equações RANS para momento e transporte de escalar tornam-se:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (C.10)$$

Onde S_M é a soma das forças de campo e μ_{eff} é a viscosidade efetiva definida por:

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (C.10)$$

A pressão modificada, p' , é definida por:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k + \frac{2}{3} \mu_{eff} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \quad (C.11)$$

O Ansys-CFX despreza o último termo que envolve divergente da velocidade, o que é correto somente para fluidos incompressíveis.

A equação RANS para a energia se torna:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j h_{tot}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} [U_i (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j})] + S_E \quad (C.12)$$

Os modelos de turbulência de viscosidade turbulenta se diferem pela maneira que definem a viscosidade turbulenta e a difusividade turbulenta.

Os modelos k-epsilon e k-ômega adicionam duas variáveis e duas equações ao sistema. Esses dois modelos de turbulência são largamente utilizados porque atingem boa precisão com satisfatório esforço computacional.

A velocidade e a escala de comprimento são resolvidas em separado utilizando-se das duas equações de transporte mencionadas. Os modelos de duas equações k-epsilon e k-ômega usam a hipótese de difusão de gradiente para relacionar as tensões de Reynolds com os gradientes de velocidades médias e com a viscosidade turbulenta. A viscosidade turbulenta é modelada como produto da velocidade turbulenta e da escala de comprimento turbulenta.

A escala de velocidade turbulenta é calculada pela energia cinética turbulenta, a qual é obtida da solução de sua equação de transporte. A escala de comprimento turbulenta é estimada através de duas propriedades do campo da turbulência, geralmente a energia cinética turbulenta e sua taxa de dissipação. A taxa de dissipação da energia cinética turbulenta é obtida da solução de sua equação de transporte.

O modelo k-ômega de Wilcox [38] adiciona as duas equações de transporte abaixo, a primeira para a energia cinética turbulenta, k , e a segunda para a frequência turbulenta, ω :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (\text{C.13})$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (\text{C.14})$$

A densidade, ρ , e o vetor velocidade, U , são tratados como quantidades conhecidas. P_k é a taxa de produção de turbulência devido à forças viscosas, a qual é calculada pela equação abaixo:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial U_k}{\partial x_k} \left(3\mu_t \frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k \right) \quad (\text{C.15})$$

Para fluidos incompressíveis, $\frac{\partial U_k}{\partial x_k}$ é pequeno e o segundo termo do lado direito da equação pode ser desprezado. AS constantes do modelo são:

$$\beta' = 0,09;$$

$$\alpha = 5/9;$$

$$\beta = 0,075;$$

$$\sigma_k = 2;$$

$$\sigma_\omega = 2;$$

O tensor de Reynolds, $\rho \overline{u_i u_j}$, é calculado pela equação C.7. P_{kb} , $P_{\varepsilon b}$ e $P_{\omega b}$ são propriedades de turbulência geradas por forças de empuxo geradas pela ação da gravidade (considerando o modelo de Boussinesq):

$$P_{kb} = \frac{\mu_t}{\rho \sigma_p} \rho \beta g_i \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (\text{C.16})$$

$$P_{\varepsilon b} = c_3 \max(0, P_{kb}) \text{sen}(\varnothing) \quad (\text{C.17})$$

$$P_{\omega b} = \frac{\omega}{k} ((\alpha + 1) c_3 \max(P_{kb}, 0) - P_{kb}) \quad (\text{C.18})$$

Onde:

- \varnothing é o ângulo entre os vetores velocidade e gravidade;
- σ_p é o número de schmidt de turbulência e igual a 1 quando aplicado Boussinesq;
- C_3 é o coeficiente de dissipação e igual a 1.

Uma das vantagens do modelo k-ômega é o tratamento próximo às paredes para números de Reynolds baixos. Também é mais preciso e mais robusto para baixos números de Reynolds e requer uma resolução menor de malha próximo à parede ($y^+ < 2$) enquanto para k-epsilon o y^+ deve ser menor que 0,2). Características que motivaram o uso deste modelo além do fato de outros autores o terem usado com sucesso.

O modelo k-ômega assume que a viscosidade turbulenta é dependente da energia cinética turbulenta e da frequência turbulenta:

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \tag{C.19}$$