

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

FERNANDO DA SILVA WEBER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EQUIVALENTE DE AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES TÉRMICAS PARA A ELABORAÇÃO DE UMA BIBLIOTECA DE
COMPONENTES CONSTRUTIVOS BRASILEIROS PARA O USO NO PROGRAMA
*ENERGYPLUS***

FLORIANÓPOLIS
2018

FERNANDO DA SILVA WEBER

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EQUIVALENTE DE AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES TÉRMICAS PARA A ELABORAÇÃO DE UMA BIBLIOTECA DE
COMPONENTES CONSTRUTIVOS BRASILEIROS PARA O USO NO PROGRAMA
*ENERGYPLUS***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Roberto Lamberts, PhD.
Coorientadora: Ana Paula Melo, Dra

FLORIANÓPOLIS
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Weber, Fernando da Silva

Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para uso no programa EnergyPlus / Fernando da Silva Weber ; orientador, Roberto Lamberts, coorientadora, Ana Paula Melo, 2018.

101 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Componentes construtivos. 3. EnergyPlus. 4. Pontes térmicas. I. Lamberts, Roberto. II. Melo, Ana Paula. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

FERNANDO DA SILVA WEBER

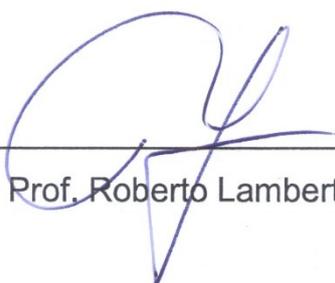
**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EQUIVALENTE DE AVALIAÇÃO DE
PROPRIEDADES TÉRMICAS PARA A ELABORAÇÃO DE UMA BIBLIOTECA DE
COMPONENTES CONSTRUTIVOS BRASILEIROS PARA O USO NO PROGRAMA
*ENERGYPLUS***

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado como requisito para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.

Florianópolis, 28 de junho de 2018

Prof^a. Lia Caetano Bastos - Coordenadora de TCC

Banca Examinadora:



Prof. Roberto Lamberts, Orientador

Eng. Ana Paulo Melo, Coorientadora

Prof. Deivis Luis Marinoski, PhD

Prof. Ricardo Rütther, PhD

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai Lenoir Weber, e em especial, à minha mãe Marli Terezinha da Silva, pela determinação, otimismo e alegria que contagiava a todos, e pelo carinho e amor que sempre teve para com seus filhos.

À minha irmã Camila da Silva Weber, pela coragem e força de vontade, pelo incentivo e ajuda que sempre me deu, e pelos longos anos de parceria e felicidades que tivemos morando juntos.

À minha namorada Natália Feilstrecker Bohn, pela amizade e compreensão acima de tudo, por compartilhar a vida comigo de maneira leve e alegre, e por me propiciar momentos especiais que guardarei com imenso carinho.

Ao professor Robertos Lamberts, pelas aulas ministradas sobre desempenho térmico, e pela orientação dada, fundamental para a concepção deste trabalho.

À Ana Paula Melo, minha coorientadora, pela confiança que depositou em mim para o desenvolvimento dos projetos no qual participei no LabEEE, pela paciência e preocupação que teve comigo, e pelo auxílio e sugestões dadas para a elaboração deste trabalho.

Ao professor Deivis Luis Marinoski, por ter me dado a oportunidade de ingressar ainda no início da graduação no LabEEE, me orientando por dois anos nos projetos que participei.

Aos colegas e amigos do LabEEE, da graduação e da vida, que me ajudaram de alguma forma durante toda a minha vida acadêmica, tornando possível o desenvolvimento e conclusão deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta um método para o desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas, e a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos adequados à realidade brasileira para aplicação no programa *EnergyPlus*. A biblioteca desenvolvida é composta por 34 modelos de paredes, 21 modelos de coberturas e 3 modelos de pisos, baseados nos componentes construtivos com câmara de ar em seu interior, apresentados no Anexo V do RAC. A modelagem dos componentes foi realizada no programa *Quickfield*, utilizando como propriedades térmicas os valores descritos na NBR 15220-2, e como resistência da câmara de ar, valores obtidos por cálculo iterativo utilizando ferramentas computacionais. A partir dos dados de saída da simulação em regime permanente para os modelos de referência (Anexo V do RAC), foi possível a elaboração de modelos equivalentes (materiais com camadas paralelas) utilizando as equações de propriedades térmicas descritas pela NBR 15220-2. A elaboração da biblioteca de componentes construtivos foi obtida pela compilação em um arquivo com extensão *.idf* (*Intermediate Data Format*) para aplicação no programa *EnergyPlus*. No programa *Quickfield*, foi verificada ainda a influência de pontes térmicas no comportamento termoenergético de um componente construtivo, analisando-se o fluxo de calor e a temperatura através das superfícies do modelo. Os resultados apresentaram boa concordância entre si, indicando pouca influência das pontes térmicas entre o modelo de referência e o modelo equivalente. A influência de pontes térmicas foi verificada também no programa *EnergyPlus*, analisando-se a taxa de troca de calor por condução e as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento. O elemento construtivo, modelado de forma homogênea e heterogênea, foi simulado para três cidades brasileiras, considerando dias extremos de verão (São João do Piauí - PI) e inverno (Urubici - SC), e para o ano inteiro (São Paulo - SP). Os resultados obtidos para estas simulações indicaram boa aproximação para as cidades de Urubici e São Paulo. Para São João do Piauí, onde há grande incidência de radiação solar direta sobre o elemento, os valores apresentaram uma variação média de 23 %, evidenciando a influência deste fator sobre as trocas de calor através das pontes térmicas.

Palavras-chave: Componentes Construtivos. *EnergyPlus*. Pontes Térmicas.

ABSTRACT

This work presents a method for the development of an equivalent model for the evaluation of thermal properties and the elaboration of a building components library suitable for the Brazilian weather for use in the EnergyPlus software. The developed library consists in 34 wall, 21 roofing and 3 floor models, based on the built-in air cavities components, presented in Annex V of the RAC. The modelling of the components was performed in the Quickfield software, using as thermal properties the values described in NBR 15220-2, and for the air cavities thermal resistance, the values were obtained by iterative calculation using computational tools. From the output data of the steady-state simulation for the reference models (Annex V of the RAC), it was possible to elaborate equivalent models (material layers in series) using the thermal properties equations described by NBR 15220-2. The library of building components was obtained by compiling it into a file with an .idf extension (Intermediate Data Format) for application in the EnergyPlus software. In the Quickfield software, the influence of thermal bridges on the thermal and energetic performance of a building component was also verified by analyzing the heat flux and temperature through the surfaces of the model. The results showed compliance among them, indicating low influence of the thermal bridges between the reference model and the equivalent model. The influence of thermal bridges was also verified in the EnergyPlus software, analyzing the rate of heat exchange by conduction and the thermal loads of heating and cooling. The building element, modelled with homogeneous and heterogeneous surfaces, was simulated for three Brazilian cities, considering extreme summer day (São João do Piauí - PI), extreme winter day (Urubici - SC), and for the whole year (São Paulo - SP). The results obtained for these simulations indicated a good approximation for the cities of Urubici and São Paulo. For São João do Piauí, where there is a high incidence of direct solar radiation on the element, the values presented an average variation of 23 %, evidencing the influence of this factor on the heat exchanges through the thermal bridges.

Keywords: Building Components. EnergyPlus. Thermal Bridges.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de energia elétrica na rede 2004 – 2017	21
Figura 2 - Distribuição das classes de consumo de energia elétrica	22
Figura 3 – Detalhamento das etapas do método proposto.....	39
Figura 4 – Modelo de referência e modelo equivalente de um bloco cerâmico.....	40
Figura 5 - Compensação de material no modelo de referência.....	43
Figura 6 – Modelo de referência de uma cobertura de telha cerâmica e laje pré-moldada	44
Figura 7 – Espessuras equivalentes de componente construtivo.....	50
Figura 8 – Modelo equivalente de uma cobertura com telha cerâmica e laje pré-moldada	50
Figura 9 – Flutuações da temperatura externa ao longo de 24 horas.....	53
Figura 10 – Métodos de modelagem de um componente construtivo no <i>Energyplus</i>	55
Figura 11 – Geometria do caso base modelado no programa Sketchup	56
Figura 12 – Fluxo de calor total através da superfície externa	64
Figura 13 – Fluxo de calor total através da superfície interna	64
Figura 14 – Fluxo de calor por área através dos modelos computacionais.....	66
Figura 15 – Variação da temperatura média das superfícies do modelo de referência	67

Figura 16 – Variação da temperatura média das superfícies do modelo equivalente	67
Figura 17 – Elemento Homogêneo de uma parede de bloco de concreto 9x19x39 cm	70
Figura 18 – Elemento heterogêneo de uma parede de bloco de concreto 9x19x39 cm	71
Figura 19 – Variação da taxa de troca de calor por área entre a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São João do Piauí.....	74
Figura 20 – Variação da taxa de troca de calor por área entre a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de Urubici.....	76
Figura 21 – Variação mensal da carga de aquecimento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade São Paulo	78
Figura 22 – Variação mensal da carga de resfriamento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade São Paulo	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessuras das paredes elementos construtivos.....	42
Tabela 2 – Propriedades térmicas dos materiais	45
Tabela 3 – Propriedades térmicas de componentes construtivos de paredes	59
Tabela 4 - Propriedades térmicas de componentes construtivos de pisos.....	60
Tabela 5 - Propriedades térmicas de componentes construtivos de coberturas	61
Tabela 6 – Caracterização do componente e do elemento construtivo para a modelagem da superfície homogênea	70
Tabela 7 – Caracterização do componente e do elemento construtivo para a modelagem da superfície heterogênea	71
Tabela 8 – Resultados da taxa de condução térmica por área para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São João do Piauí.....	72
Tabela 9 – Resultados da taxa de condução térmica por área para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de Urubici.....	75
Tabela 10 – Resultados da carga de aquecimento e resfriamento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São Paulo.	77

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAVA	Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado e Aquecimento
ANEEL	Associação Brasileira de Energia Elétrica
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning
BEN	Balanço Energético Nacional
BEU	Balanço de Energia Útil
CA	Consumo de Aquecimento
CR	Consumo de Resfriamento
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética
DOE	Department Of Energy
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
GHR	Grau Hora de Resfriamento
GWh	Giga Watts hora
IDF	Intermediate Data Format
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
ISO	International Organization of Standardization
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma Brasileira
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OIE	Oferta Interna de Energia
OIEE	Oferta Interna de Energia Elétrica
ONU	Organização das Nações Unidas

PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PBEE	Programa Brasileiro de Etiquetagem Edifica
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações
TMY	Typical Meteorological Year
TRY	Teste Reference Year
TWh	Tera Watts hora

LISTA DE SIMBOLOS

U_T	Transmitância térmica total (W/m ² .°C)
ϕ_q	Fluxo de calor total (W)
ΔT	Varição entre a temperatura interna e externa (°C)
h	Comprimento da superfície analisada (m)
C_T	Capacidade térmica total (kJ/m ² .°C)
e	Espessura da camada (m)
c	Calor específico (kJ/kg °C)
ρ	Densidade de massa aparente (Kg/m ³)
R_T	Resistência térmica total (m ² .°C /W)
λ	Condutividade térmica (W/m.°C)
b	Largura (m)
T_{ext}	Temperatura externa (°C)
T_{int}	Temperatura interna (°C)
A	Amplitude térmica (°C)
t	Tempo (s)
TBS_{ext}	Temperatura externa do Bulbo Seco (°C)
$Rd_{inc.}$	Radiação Solar direta incidente sobre a superfície (W/m ²)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	17
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 O CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL	19
2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL.....	24
2.3.1 Programas de Eficiência Energética	24
2.3.2 Normas e Regulamentos de Eficiência Energética de Edificações	26
2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	31
2.4.1 Pontes Térmicas	35
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
3 MÉTODO	38
3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA	42
3.1.1 Componentes Construtivos	42
3.1.2 Modelagem do Componente Construtivo	43
3.1.3 Propriedades Térmicas dos Materiais	44
3.1.4 Resistência Térmica da Câmara de Ar	46
3.2 SIMULAÇÃO EM REGIME PERMANENTE NO PROGRAMA <i>QUICKFIELD</i>	46
3.3 DEFINIÇÃO DO MODELO EQUIVALENTE	48
3.3.1 Modelagem Computacional	49
3.4 SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSIENTE NO PROGRAMA <i>QUICKFIELD</i>	51
3.4.1 Análise de Pontes Térmicas no Programa <i>Quickfield</i>	54
3.5 ANÁLISE DA TROCA DE CALOR NO PROGRAMA <i>ENERGYPLUS</i>	54
3.5.1 Modelagem da Edificação	56
3.5.2 Simulação Computacional	58

4 RESULTADOS	59
4.1 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS	59
4.2 BIBLIOTECA DE MODELOS EQUIVALENTES DE COMPONENTES CONSTRUTIVOS.....	62
4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PONTES TÉRMICAS NO PROGRAMA <i>QUICKFIELD</i>	63
4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PONTES NO PROGRAMA <i>ENERGYPLUS</i> ...	69
4.4.1 Parâmetros de Avaliação	72
5 CONCLUSÕES	80
5.1 LIMITAÇÕES	83
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS	85
APÊNDICE A – IDENTIFICAÇÃO E DESCRIÇÃO DE COMPONENTES CONSTRUTIVOS DE PAREDES, PISOS E COBERTURAS	90
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DE COMPONENTES CONSTRUTIVOS EQUIVALENTES DE PAREDES, PISOS E COBERTURAS SIMULADOS NO PROGRAMA <i>QUICKFIELD</i>.	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Durante muito tempo, o homem retirou do meio ambiente os recursos necessários para produzir energia para o seu conforto e desenvolvimento tecnológico, sem maiores preocupações com os impactos gerados em médio e longo prazo, em decorrência destas ações. No aspecto do conforto ambiental, ainda na Roma antiga, a sociedade utilizava um sistema de aquecimento artificial proveniente de fornalhas subterrâneas que queimavam carvão e madeira, aquecendo o ambiente interno. Contudo, este processo exigia grandes quantidades de matéria prima para a queima que, em certo momento, se tornou escasso na região, obrigando os romanos a buscarem outras fontes de energia mais sustentáveis (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013 apud Espí, 1999).

De forma mais abrangente e mais agressiva do que ocorreu com os antigos romanos, a partir principalmente da revolução industrial, o uso de recursos ambientais para produção de energia para suprir as diversas necessidades energéticas que surgiram no período, em conjunto com o aumento exponencial da população mundial e do rápido desenvolvimento dos países, obrigou a humanidade a procurar formas mais eficientes e sustentáveis de energia. Esta exploração de recursos naturais de forma desenfreada despertou preocupação em alguns países em meados do século XX, devido às mudanças climáticas que poderiam estar ligadas a antropização, e a finitude dos recursos energéticos. Em consequência, realizou-se em 1972 a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano (ONU, 1972), em Estocolmo, na Suécia, sendo a primeira do gênero, e considerada um marco importante na ecopolítica mundial (PASSOS, 2009).

Os debates sobre a preservação ambiental, e o desenvolvimento tecnológico da humanidade ficaram mais evidentes a partir da conferência realizada em Estocolmo. Além deste evento, a crise do petróleo ocorrida na década de 70, devido à escassez do produto e a alta elevação do preço dos barris, fez com que houvesse mudanças no cenário mundial quanto ao desenvolvimento mais sustentável, incentivando a criação de estudos e mecanismos para obtenção de energia de fontes alternativas, e de sistemas mais eficientes (MENDES et al., 2005).

Segundo Mendes et al. (2005), as edificações, compostas pelos setores residencial, comercial e público, ganharam grande atenção nas questões de eficiência energética, devido a sua grande parcela no consumo de energia elétrica na maioria dos países. Percebeu-se que era mais economicamente e ambientalmente viável produzir edificações mais eficientes, do que aumentar a matriz energética para suprir as necessidades de construções convencionais. Neste cenário, no início dos anos 90, surgiu o termo arquitetura sustentável, evidenciando as construções como as principais fontes de degradação dos recursos ambientais, sendo em contrapartida, indispensável para a renovação dos mesmos (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013).

Uma das principais razões para o consumo de energia elétrica em edificações está relacionada ao conforto térmico do usuário, o qual reflete o estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico (ASHRAE, 2017a). Desta maneira, cabe aos profissionais e empresas responsáveis pela concepção de projetos de edificações, avaliarem quais devem ser os mecanismos e estratégias de condicionamento do ambiente implementadas para um melhor aproveitamento dos recursos naturais. Por parte do usuário, deve haver maior conscientização e entendimento quanto à operação dos sistemas que compõe a edificação, buscando a otimização dos mesmos. Entretanto, como Mendes et al. (2005) destaca, a avaliação do desempenho térmico de edificações é uma tarefa complexa, pois envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares, tornando-se necessário em alguns casos, o uso de ferramentas computacionais capazes de representar o comportamento térmico e energético de edificações em diferentes cenários.

Os primeiros programas de simulação termoenergética surgiram na década de 70, diante do cenário de preocupação com os recursos energéticos nos Estados Unidos, devido à crise do petróleo. Um dos primeiros e principais programas desenvolvidos para esta finalidade foi o *DOE-2*, desenvolvido pelo departamento de energia dos Estados Unidos (DOE), e que serviu de base para o desenvolvimento de programas mais sofisticados e precisos, como o *EnergyPlus*, desenvolvido na década de 90, e que contempla praticamente todos os sistemas que compõe uma edificação.

No Brasil, o uso destes programas de simulação computacional na área acadêmica e em institutos de pesquisa surgiram ainda na década de 80, com a

importação de programas de simulação desenvolvidos no exterior por países que enfrentavam problemas energéticos devido a grande dependência do petróleo para geração de eletricidade (MENDES et al., 2005).

Embora os estudos sobre eficiência energética em edificações no país tenham iniciado nos anos 80, suas aplicações na área da construção civil são relativamente recentes, já que políticas de redução do consumo de energia e a normatização da eficiência energética surgiram após o racionamento de energia elétrica em 2001. Este acontecimento foi um dos principais fatores para a aplicação de recursos e políticas no âmbito da eficiência energética nos anos que viriam a seguir, com a promulgação da lei nº 10.259/2001 (BRASIL, 2001a), e sua posterior regulamentação pelo decreto nº 4.059 (BRASIL, 2001b). Estas ações serviram como ponto de partida para a criação de normas e regulamentos de eficiência energética no Brasil, estabelecendo requisitos máximos de consumo de energia, e mínimos de desempenho energético para equipamentos, máquinas e edificações. Destacam-se para estes fins, as normas técnicas NBR 15220 (ABNT, 2005a) e a NBR 15575 (ABNT, 2013), além do Regulamento Técnico de qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos – RTQ-C (INMETRO, 2010), e do Regulamento Técnico de qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – RTQ-R (INMETRO, 2012).

Para a avaliação do nível de eficiência energética de uma edificação, tanto os RTQ's, quanto a NBR 15575 utilizam dois métodos de cálculo. Nos RTQ's, eles se dividem entre o método prescritivo e o método de simulação, já na NBR 15575, a avaliação é realizada através do método simplificado e do método de simulação. Embora o método prescritivo e o método simplificado forneçam resultados de maneira mais rápida, sua aplicação por vezes fica limitada a edificações pouco complexas. Além disso, estudos de Sorgato, Melo e Lamberts (2013), e de Silva, Almeida e Ghisi (2013), concluíram que a escolha pelo método de avaliação pode influenciar no nível de energética da edificação, tornando-a mais ou menos eficiente.

Na avaliação pelo método de simulação, o Brasil utiliza ainda programas computacionais desenvolvidos em sua maioria no exterior. Como consequência, a importação de programas de outros países pode induzir avaliações errôneas do desempenho energético de edificações pelos usuários, uma vez que as configurações padrão do programa estão relacionadas às normas, características bioclimáticas e construtivas do país de origem. Além disso, muitas vezes, a falta de

conhecimento do usuário quanto à inserção dos dados de entrada para a concepção do modelo computacional, e a interpretação dos dados de saída, tende a gerar avaliações equivocadas. No programa *EnergyPlus*, por exemplo, a modelagem dos elementos construtivos é realizada através da inserção de materiais com camadas paralelas entre si e perpendiculares ao fluxo de calor. Desta forma, cálculos prévios devem ser realizados para que o modelo computacional desenvolvido possua as mesmas características térmicas do elemento construtivo real. Soma-se a isto, que o modelo desenvolvido para aplicação no programa *Energyplus* deve levar em consideração fatores pouco estudados, e que não são abordados pelas normas de desempenho térmico brasileiras, como as pontes térmicas.

Assim, com o objetivo de se minimizar erros envolvidos na etapa de modelagem dos sistemas construtivos de edificações nos programas de simulação computacional, fica evidente a necessidade do desenvolvimento de uma biblioteca de materiais e componentes construtivos adequados à realidade brasileira.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo para avaliação de propriedades térmicas equivalentes de componentes construtivos que apresentam câmara de ar em seu interior. A partir deste método, pretende-se elaborar uma biblioteca de componentes construtivos adequados à realidade brasileira para aplicação no programa computacional *EnergyPlus*.

1.2.2 Objetivos Específicos

A seguir, são listados os objetivos específicos que serão apresentados no decorrer deste trabalho:

- Caracterização dos componentes construtivos de referência adequados à realidade brasileira;
- Elaboração de modelos equivalentes de componentes construtivos;
- Comparação do comportamento termoenergético para um modelo de referência e para um modelo equivalente no programa *Quickfield*;

- Comparação do comportamento termoenergético de um elemento construtivo em função do método de modelagem no programa *EnergyPlus*.
- Validação dos modelos de referência e equivalentes;

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

A apresentação deste trabalho é realizada em cinco capítulos.

No primeiro capítulo, é apresentada a introdução ao tema abordado, bem como as justificativas e motivações obtidas para o desenvolvimento desta pesquisa, e os objetivos pretendidos.

O segundo capítulo introduz o embasamento teórico realizado ao longo da pesquisa sobre temas relacionados a este trabalho. Nesta revisão bibliográfica são apresentados dados sobre a matriz energética brasileira, estudos sobre o uso final da energia elétrica no país, a normatização quanto à eficiência energética em edificações, a influência do envelope construtivo e de pontes térmicas no desempenho termoenergético, e o uso de programas de simulação computacional para avaliação energética aplicada a construção civil.

O terceiro capítulo consiste na apresentação do método proposto para o desenvolvimento de modelos computacionais equivalentes para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos, e para a análise de pontes térmicas através dos programas utilizados.

No quarto capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais quanto ao desenvolvimento da pesquisa. Nesta etapa são realizadas as análises do comportamento termoenergético do modelo de referência e equivalente nos programas *Quickfield* e *Energyplus*.

No último capítulo são apresentadas as conclusões sobre o trabalho, as limitações do método, e as dificuldades encontradas durante o desenvolvimento desta pesquisa. Por fim, são abordadas sugestões para trabalhos futuros sobre o tema em questão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre os estudos, trabalhos e pesquisas de diversos autores relacionados aos temas abordados, e necessários para concepção deste trabalho. Os tópicos abrangem o cenário energético nacional e a eficiência energética no Brasil, levantando dados governamentais e de alguns pesquisadores sobre os temas ligados a questões energéticas no país, sobretudo a energia elétrica. No âmbito da construção civil, são apresentadas as normas e regulamentos relacionados à eficiência energética de edificações. Neste aspecto, são apresentados ainda estudos sobre o envelope construtivo e a sua influência no desempenho térmico e energético de edificações. Por fim, são abordados os assuntos referentes à simulação computacional para avaliação do desempenho energético do ambiente construído, introduzindo os programas computacionais utilizados neste trabalho.

2.2 O CENÁRIO ENERGÉTICO NACIONAL

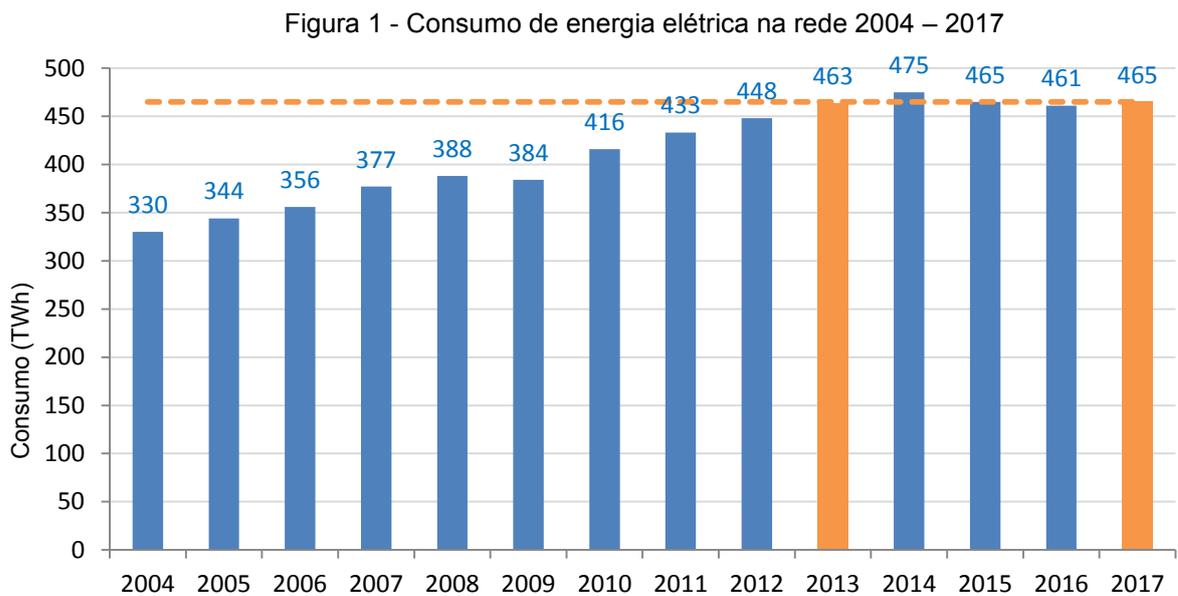
O Brasil se destaca no cenário energético mundial por possuir uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo industrializado. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (MME, 2017a), o país possui uma oferta de energia composta por 43,5% de sua produção proveniente de fontes renováveis, como a geração hidráulica, a biomassa e o etanol, frente a 9,5% dos países membros da OCDE (Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico), formado em sua maioria por países desenvolvidos, e 14,2% em relação à média mundial. No que tange o aspecto da energia elétrica do setor energético nacional, a oferta interna, soma da energia elétrica que é produzida no país mais o que é importado, é composta em sua maioria por fontes de energias sustentáveis (81,7%), com predomínio da geração hidráulica. As usinas hidrelétricas representaram no ano de 2017, 68,1% da geração total de energia elétrica no país, valor 5,1% maior comparado ao ano anterior, segundo o relatório do Balanço Energético Nacional de 2017 (MME, 2017b). Percebe-se ainda, um crescente aumento das fontes sustentáveis, como a energia eólica e a energia solar. No Brasil, a geração de

energia elétrica através de fontes eólicas e solar obteve um crescimento de 54,9% e 44,7%, respectivamente, na comparação entre os anos de 2016 e 2015. Destaca-se a geração eólica que obteve uma participação total de 6,6% na Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) no ano de 2015.

Durante a maior parte do crescimento socioeconômico do Brasil no século XX, as principais fontes da matriz energética nacional eram de origem não renovável, como a lenha, petróleo e seus derivados. Segundo dados da EPE - Empresa de Pesquisa Energética - vinculado ao MME, em 1940, a oferta interna de energia era composta em mais de 80% pela lenha e o carvão vegetal, percentual este que diminuiu consideravelmente até o final da década de 70, devido à utilização da energia produzida através do Petróleo e de seus derivados (MME, 2017b). Embora o Brasil utilizasse fontes de energia hidráulica como principais meios para geração de energia elétrica, a crise do petróleo provocou um alerta sobre as consequências da escassez de recursos energéticos para suprimento da demanda de energia e desenvolvimento do país, já que o país era grande dependente do uso do petróleo para outros fins, como o transporte e a indústria.

O que se observa em países em desenvolvimento como no caso do Brasil em comparação a nações desenvolvidas, é uma inter-relação mais evidente entre o aspecto socioeconômico do país e o consumo de energia. Segundo consta no Atlas de Energia Elétrica no Brasil (ANEEL), estes fatores podem ser explicados pelo fato de grande parte das indústrias que consomem grande quantidade de energia estarem instaladas nos países em desenvolvimento, como as indústrias energointensivas. Outro fator que corrobora para isto está na maior aquisição de equipamentos e aparelhos consumidores de energia, e automóveis. Estes casos são claramente demonstrados nos anos de 1994 e 1995, onde se observou um aumento de 4,55% e 6,51% no consumo de energia elétrica no país, respectivamente, devido à venda de eletrodomésticos e eletroeletrônicos, impulsionados pela baixa inflação e estabilização da moeda na época. Já entre os anos de 2006 e 2007, o aumento da renda da população e do maior prazo de financiamento provocaram recordes de vendas de automóveis e conseqüentemente, maior consumo de combustíveis, como a gasolina e o etanol (ANEEL, 2008). Além disso, durante o período de expansão econômica do Brasil no século XXI, a aquisição de aparelhos de ar condicionado se tornou mais frequente, contribuindo para o aumento do consumo de energia elétrica. De acordo com a resenha mensal de mercado de energia elétrica de fevereiro de

2014, a partir do ano de 2010 houve um aumento considerável no número de vendas de ar condicionado no país. Segundo a ABRAVA (Associação Brasileira de Refrigeração, Ar condicionado e Aquecimento), as unidades de condicionadores de ar somadas no período de 2010 a 2013 são maiores do que as vendas totais da primeira década dos anos 2000 (EPE, 2014). A Figura 1 apresenta a evolução no consumo de energia elétrica no Brasil no período de 2004 a 2017.



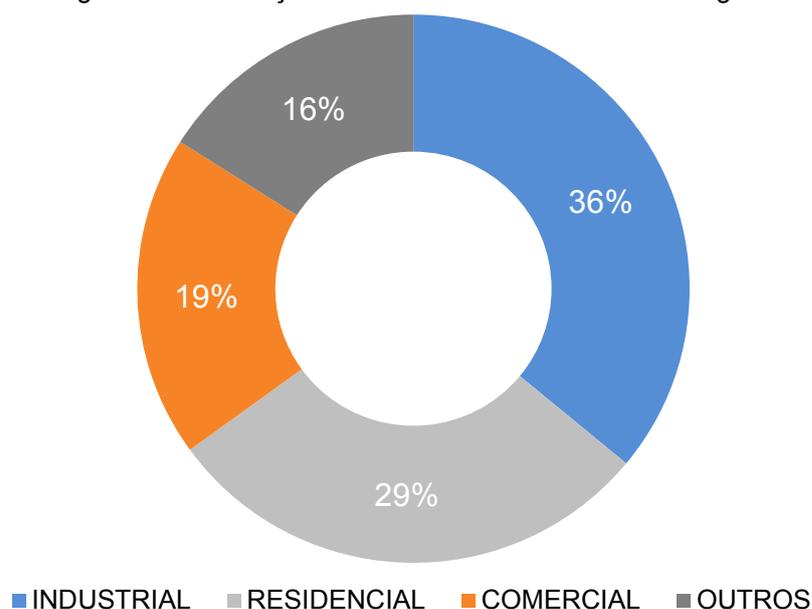
Fonte: Adaptado de EPE (2018a)

A partir da Figura 1 é possível verificar como as questões socioeconômicas afetaram o consumo da eletricidade no país. De acordo com o Caderno de Demanda de Eletricidade de 2017 (EPE, 2018a), a estabilização da moeda, o elevado preço das commodities exportadas pelo Brasil e o grande investimento de capital no país fez com que houvesse um cenário favorável para expansão, aumentando o consumo de energia elétrica de forma gradativa até o ano de 2008. A pequena queda no consumo de energia elétrica registrada no período de 2009 foi em decorrência da crise internacional que ocorreu no ano anterior, refletindo principalmente nas indústrias de mineração e siderurgia que se recuperam no ano seguinte. A partir de 2014 é possível verificar outro ponto de inflexão no consumo de energia elétrica no Brasil, causado pela crise política e econômica que o país enfrenta. O desempenho da indústria foi um dos mais afetados, revertendo a valores do ano de 2003, na construção civil os valores equiparam-se ao ano de 2009. Observa-se que no geral o consumo de energia elétrica na rede em 2017 voltou a patamares próximos aos de

2013. Como visto, o aumento do consumo de energia elétrica está estritamente ligado aos aspectos socioeconômicos do país, desta forma, busca-se continuamente a expansão do setor energético a fim de suprir as necessidades de demanda das principais classes consumidoras, compostas pelos setores industrial, comercial e residencial.

Segundo a resenha mensal do mercado de energia elétrica de março de 2018, desenvolvido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2018b), responsável pelo planejamento energético do país, o crescimento acumulado do consumo de energia elétrica no ano atingiu 1,2% e no período dos últimos 12 meses, 0,8%. Estes avanços foram influenciados fortemente pelo aumento do consumo do setor industrial que registrou acréscimo de 1,5% no acumulado dos 12 meses anteriores. Para o mesmo período, o setor residencial apresentou um crescimento leve de 0,9%, fato este que pode estar relacionado a uma melhora gradual da economia ocorrida neste intervalo. A classe comercial e de serviços obteve pequena variação no consumo de energia elétrica, com valor 0,1%. No país, o consumo de energia elétrica na rede no ano de 2017 foi de 465 TWh, com maior participação do setor industrial (35,9%), frente ao setor residencial (28,8%), o setor comercial e de serviço (19,0%) e outros (16,4%) – composto pelos setores público, energético, agropecuário e de transportes - como mostra a Figura 2, abaixo.

Figura 2 - Distribuição das classes de consumo de energia elétrica.



Fonte: Adaptado de EPE (2018a)

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2017 (MME, 2017b), o consumo de energia elétrica em edificações, no qual inclui a classes residencial, comercial e público, consumiram no ano de 2016, 42,8% do total no país. A composição do uso final da energia elétrica nestes setores apresenta uma grande variabilidade. O setor comercial, por exemplo, é composto por shoppings centers, restaurantes e prédios comerciais. Já o setor público, abrange hospitais, escolas, serviços e órgãos públicos. Desta maneira, a caracterização do uso final de energia elétrica é bastante distinta entre estas edificações, devido às necessidades específicas de cada uma delas. Para a classe residencial, a determinação do uso final de energia elétrica pode ser mais facilmente analisada, devido a maior semelhança entre os sistemas que a compõe, os equipamentos utilizados e os padrões de uso do usuário.

Segundo um estudo de Ghisi, Gosh e Lamberts (2007) onde foram analisados mais de 17 mil casos nos períodos de 1997 a 1999, estimou-se que a maior parte da demanda média de energia elétrica em residências está no uso conjunto da geladeira e freezer (42%), chuveiro elétrico (20%) e iluminação (11%). Este trabalho mostrou ainda que há uma variabilidade no uso final de energia elétrica por parte dos equipamentos dependendo das estações consideradas no período de estudo. Por exemplo, para os meses de verão, a quantidade de energia destinada ao chuveiro elétrico diminui para 18%, enquanto a demanda para o ar-condicionado passou de 10% em média para 16% no verão. Nos meses de inverno, a pesquisa apresentou um acréscimo na parcela de eletricidade para o chuveiro, 22% e para a iluminação, 13%. A parcela de energia elétrica para Geladeira e freezer se manteve constante no decorrer do ano, em 42%. Contudo, os valores apresentados pelo trabalho de Ghisi, Gosh e Lamberts (2007) refletem o consumo de energia elétrica em um cenário antigo, anterior a normatização da eficiência energética de equipamentos no Brasil.

Dados mais recentes, obtidos de fontes oficiais do governo, disponíveis no relatório de pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso (ELETROBRÁS e PROCEL, 2007) que tem como base o ano de 2005, mostraram que o consumo final médio na carga residencial no Brasil é composto majoritariamente pela geladeira e freezer com 27%, chuveiro elétrico com 24% e condicionamento do ambiente, com 20% do valor total. Estes valores em comparação aos resultados apresentados no estudo de Ghisi, Gosh e Lamberts (2007) mostram um aumento no uso de aparelhos

condicionadores de ar para condicionamento do ambiente, tanto para resfriamento, quanto para aquecimento.

Isto evidencia a grande influência que o conforto térmico do usuário tem sobre o aspecto econômico e ambiental no que diz respeito aos gastos de energia elétrica para o condicionamento do ambiente interno. Desta maneira, a concepção de edificações deve ser realizada de forma a buscar a minimização no consumo de energia elétrica, através da aplicação de estratégias bioclimáticas que utilizam mecanismos passivos e naturais para condicionamento e iluminação do ambiente, trazendo consigo o conceito de eficiência energética.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL

2.3.1 Programas de Eficiência Energética

Desde os fatos ocorridos na década de 70, devido, sobretudo, a crise do petróleo e as preocupações crescentes com a exploração dos recursos energéticos e do meio ambiente, diversas pesquisas e ações, especialmente nos países desenvolvidos foram realizadas em prol da eficiência energética. Segundo consta no Plano Decenal de Energia 2030 (MME, 2007), a eficiência energética pode ser interpretada como a economia de energia gerada para execução de uma mesma atividade através do uso de equipamentos mais eficientes (característica técnica), tecnologias desenvolvidas, ou pelo uso racional da energia (característica comportamental). No Brasil, programas de eficiência energética começaram a ser implantados de forma mais abrangentes ainda na década de 80, tendo em vista a economia de energia gerada para obtenção do mesmo serviço de energia, e consequentemente diminuição da expansão da matriz energética.

O exemplo mais expressivo destas ações foi a criação do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica) em 1985. Ligado ao Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás, o PROCEL atua em projetos de eficiência energética e programas que tem por objetivo disseminar a informação, e orientar os consumidores dos mais diversos setores quanto ao consumo consciente de energia elétrica (ELETROBRÁS e PROCEL, 2017). Entretanto, medidas mais eficientes só foram implementadas a partir do racionamento de energia elétrica que ocorreu no ano de 2001. Em 1999, através do

Plano Decenal de Expansão, já era possível prever um alto risco de racionamento de energia elétrica no país, evidenciando que o baixo investimento na expansão da matriz elétrica no país, não supriria a demanda por eletricidade crescente nos anos 2000 em diante. Contudo, as chuvas que ocorreram no período acabaram adiando o racionamento de energia elétrica, já que a maior parte da geração desta energia no país era produzida por hidrelétricas. Com a intenção de diversificar as fontes produtoras, o governo focou na implantação de termelétricas de gás natural e term nuclear a partir do ano 2000 (BARDELIN, 2004).

Segundo Bardelin (2004), embora as medidas de diversificação da matriz energética tenham sido interessantes, a fim de minimizar a dependência de uma só fonte produtora, os resultados obtidos com elas não foram os esperados, dada o rápido aumento no consumo de energia elétrica, aliado ao baixo período de chuvas no ano de 2001. O racionamento de energia elétrica ocorreu em junho de 2001 a fevereiro de 2002 em todas as regiões do Brasil, excetuando-se a região sul. Cada uma destas regiões, dentre suas particularidades quanto ao racionamento de energia, tiveram que reduzir em média, 20% do consumo de energia elétrica. Como consequência deste fato, em 2002 o consumo de energia elétrica verificado no país foi de 321 TWh (ANEEL, 2008), valor próximo aos encontrados nos anos de 1999 e 2000.

Durante o período de racionamento de energia no ano de 2001, o governo sancionou a lei nº 10.259 (BRASIL, 2001a) e a regulamentou pelo decreto nº 4.059 (BRASIL, 2001b). Para implementar regras e diretrizes quanto a eficiência energética de máquinas, aparelhos consumidores de energia e edificações foi criado no mesmo ano o CGIEE (Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética) (BRASIL, 2001b).

Em 2003 foi criado um Grupo Técnico para discutir questões de eficiência energética relacionadas especificamente às edificações do país, conhecido como GT-Edificações. Em 2005 o GT-Edificações criou a Secretaria Técnica de Edificações (ST-Edificações) com competência para discutir as questões técnicas envolvendo os indicadores de eficiência energética. No mesmo ano, o Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, passou a integrar o processo através da criação da CT-Edificações, Comissão Técnica onde é discutido e definido o processo de obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

(ENCE) e da Etiqueta do Programa Brasileiro de Etiquetagem Edifica (PBEE), para Edificações (CGIEE, 2017).

No âmbito da eficiência energética de edificações, o PROCEL Edifica, subprograma ligado ao PROCEL, é o principal mecanismo criado a fim de minimizar a demanda energética no setor. De acordo com o relatório PROCEL 2017 (ELETROBRÁS e PROCEL, 2017), desenvolvido pela Eletrobrás, os objetivos do programa são o desenvolvimento de atividades de divulgação e estímulo à aplicação dos conceitos de eficiência energética em edificações. Além disso, o PROCEL Edifica apoia a viabilização da Lei de Eficiência Energética 10.295/2001 (BRASIL, 2001a), contribuindo para a expansão, de forma energeticamente eficiente, do setor de edificações do país. O subprograma atua por meio de atividades ligadas ao Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBEE) e à Secretária Técnica de Edificações do Grupo de Trabalho de Edificações do MME.

O PBEE atua na concessão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) que classifica equipamentos, veículos e edificações de acordo com sua eficiência energética em “A” (mais eficiente) a “E” (menos eficiente) seguindo métodos e diretrizes aplicados para cada área. De acordo com o relatório PROCEL (ELETROBRÁS e PROCEL, 2017), para a área da construção civil, já foram classificados 193 edificações públicas, de serviço e comercial, e 4739 edificações residenciais em todo o país. Em 2016, o PBEE estimou uma redução no consumo de energia elétrica acumulado de 8,19 GWh, referente ao Selo Procel Edificações concedidos as 14 edificações em fase de projeto e a outras 29 já construídas. Estas medidas são importantes, pois servem de parâmetro para verificar como o ramo da construção civil atua frente às questões ambientais e energéticas por meio da concepção de edificações energeticamente eficientes.

2.3.2 Normas e Regulamentos de Eficiência Energética de Edificações

Até meados dos anos 2000, o Brasil não possuía legislação quanto ao desempenho energético de edificações. A falta de normatização e regulamentos que definissem valores mínimos de eficiência energética e máximos de consumo de energia elétrica, dificultava a implementação de medidas neste aspecto. Após a crise energética enfrentada no início do século XX, houve a necessidade da elaboração de normas e diretrizes, definindo-se parâmetros que pautariam a concepção de

projetos de edificações, visando à diminuição do consumo de energia elétrica pelo aumento da eficiência energética.

Partindo desta premissa, foi publicada no ano de 2005 a NBR 15220 (ABNT, 2005a), destinada ao desempenho térmico de Edificações e aplicada a habitações de interesse social. A NBR 15220 (ABNT, 2005a) é dividida em cinco partes, que compreendem as definições, símbolos e unidades (NBR 15220-1); os métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (NBR 15220-2); apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro e as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social (NBR 15220-3); Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida (NBR 15220-4) e pelo método fluximétrico (NBR 15220-5). A publicação desta norma foi importante, pois além de ser a primeira com enfoque no desempenho energético de edificações, a partir dela foi possível a elaboração e adequação de projetos de edificações unifamiliares de interesse social de acordo com as diretrizes construtivas referentes a cada uma das oito zonas bioclimáticas definidas para o território brasileiro. O zoneamento bioclimático e a determinação de materiais e componentes construtivos aplicados na construção civil no Brasil, também serviram como parâmetros para aplicação de outras normas e regulamentos desenvolvidos posteriormente.

No ano de 2008 foi publicada a norma de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2008), denominada de Edificações habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Atualizada em 2013, a NBR 15575 (ABNT, 2013) passou a ser aplicada para qualquer edificação habitacional, independente do número de pavimentos. De acordo com a NBR 15575 (ABNT, 2013), o foco da norma está na adequação às exigências do usuário quanto ao comportamento em uso dos sistemas e do próprio edifício habitacional, e não nas suas especificações construtivas. Assim, a norma de desempenho visa determinar requisitos qualitativos dos usuários em critérios objetivos, avaliando cada um dos sistemas em níveis mínimos (M), intermediários (I) e superiores (S). Divida em 6 partes, a NBR 15575 trata do desempenho da edificação em diversos sistemas, os quais contemplam: os requisitos gerais (NBR 15575-1); os requisitos para os sistemas estruturais (NBR 15575-2); os requisitos para os sistemas de pisos internos (NBR 15575-3); os requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (NBR 15575-

4); os requisitos para os sistemas de cobertura (NBR 15575-5); e os requisitos para os sistemas hidrossanitários (NBR 15575-6).

Para determinação do nível de desempenho térmico da edificação, a NBR 15575 (ABNT, 2013) utiliza o procedimento simplificado e o procedimento de simulação. No procedimento simplificado, a NBR 15575 atua de forma conjunta a NBR 15220, utilizando os métodos de cálculo das propriedades térmicas dos componentes construtivos, e o zoneamento bioclimático brasileiro. Para avaliação do nível de desempenho térmico são estabelecidos limites máximos de transmitância térmica, e mínimos de capacidade térmica e área de ventilação das aberturas em ambientes de permanência prolongada (salas, cozinhas e dormitórios). Caso o sistema analisado não atenda as especificações da norma para o procedimento simplificado, a mesma indica que deve ser realizado o procedimento de simulação. Neste caso, a avaliação do nível de desempenho térmico é determinada pelos valores máximos e mínimos da temperatura interna em relação à temperatura externa, obtidos através de simulação computacional para um dia típico de verão e de inverno, respectivamente.

Contudo, segundo Sorgato, Melo e Lamberts (2013), os métodos simplificados, apesar de fornecerem um resultado expedito na avaliação do desempenho térmico da edificação, podem gerar incertezas consideráveis quanto a ele. Completam ainda, avaliando que o procedimento de simulação, apesar de analisar cada fator isoladamente, o que nem sempre é possível para um caso real, exige um conhecimento muito amplo e completo por parte do usuário.

Chvatal (2014), em seu estudo, avaliou o procedimento simplificado da NBR 15575 através da comparação do nível de desempenho térmico de uma edificação unifamiliar de interesse social para três zonas bioclimáticas em relação ao método de simulação utilizando o programa *EnergyPlus*. A edificação, composta por dois dormitórios, uma sala e uma cozinha, possui área útil de 37,1m². As cidades escolhidas pertencem a zona bioclimática mais fria (Urubici, zona 1), uma entre as mais quentes (Manaus, zona 8) e uma intermediária (São Paulo, zona 3). Para a envoltória, foram definidas diversas combinações de valores de transmitância térmica e absorvância das paredes exteriores e da cobertura. Além disso, Chvatal (2014) também investigou a influência de paredes externas com alta capacidade térmica. Dos resultados, verificou que a influência da transmitância térmica e absorvância dos elementos construtivos obtidas nas simulações não foi observada

através do procedimento simplificado. Para a cidade de Urubic (SC), localizada na zona 1, o parâmetro de absorvância, desconsiderado na avaliação pelo método simplificado, influenciou no nível de desempenho térmico da edificação. Neste caso simulado, coberturas com maior absorvância, permitiram valores de transmitância térmica maiores do que apresentados na NBR 15575. Desta forma, Chvatal (2014) conclui que, mesmo sendo importante o uso do procedimento simplificado para uma análise rápida de habitações com baixa complexidade, ele deve ser mais representativo, avaliando os parâmetros que mais influência no comportamento térmico de edificações.

Em 2009, a partir do trabalho conjunto entre as instituições públicas, e sob a responsabilidade do GT-Edificação foi publicado o RTQ - C (Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos), e em 2010 o RTQ - R (Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais), além de seus documentos complementares que incluem os Requisitos de Avaliação da Conformidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações (RAC) e os Manuais para aplicação do RTQ-C e do RTQ-R (CGIEE, 2017).

Para classificação do nível de eficiência energética de edificações o PBEE utiliza o Regulamento Técnico de Qualidade (RTQ) para etiquetagem de edifícios, classificando-os em A (mais eficiente) a E (menos eficiente). Os níveis de eficiência energética são obtidos pelo cumprimento de requisitos mínimos parciais de diversos parâmetros que compõe a edificação. Estes parâmetros são divididos em sistemas construtivos, que variam de acordo com a classe consumidora, em:

- Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C): Envoltória, Sistema de Iluminação e Sistema de Condicionamento de ar.
- Edificações Residenciais (RTQ-R): Envoltória, Sistema de aquecimento de água.

Para a determinação dos parâmetros de eficiência energética, o RTQ apresenta o método prescritivo e o método de simulação. No método prescritivo, a classificação do parâmetro analisado é determinada pela aplicação de equações analíticas e tabelas obtidas por regressão linear através de um número de casos simulados, onde os dados de entrada referem-se às características do sistema da edificação. No método de simulação, a classificação da edificação ou de parâmetros

específicos dela, é determinada pela comparação do desempenho termoenergético de um modelo computacional da própria edificação, e de um modelo de referência.

Silva, Almeida e Ghisi (2013) investigaram a influência do método prescritivo e do método de simulação na determinação do nível de eficiência energética da envoltória de habitações de interesse social através do RTQ-C. Para as edificações, foram escolhidas cinco tipologias diferentes, baseadas em auditorias realizadas na cidade de Florianópolis-SC. Para a avaliação do nível de eficiência energética pelo método prescritivo, foram utilizadas equações de regressão linear, as quais utilizaram generalizações das características da edificação analisada, como por exemplo, o clima, definido como parâmetros gerais para a zona 3. A partir das equações de regressão, foram determinados os índices de Grau Hora de Resfriamento (GHR), Consumo de Aquecimento (CA) e Consumo de Resfriamento (CR). Utilizando o programa *EnergyPlus* para o método de simulação, Silva, Almeida e Ghisi (2013) desenvolveram dois modelos base para cada uma das tipologias adotadas. O modelo 1 foi determinado com ventilação natural, e o modelo 2 foi determinado com ventilação natural diurna e condicionamento artificial noturno, seguindo padrões de operação e rotina de acordo com o RTQ-R. Os modelos computacionais foram avaliados para climas utilizando os arquivos TMY – *Typical Meteorological Year* e TRY - *Test Reference Year*.

Como dados de saída, foram avaliadas as temperaturas horárias operativas de cada ambiente analisado, e determinados o GHR, CA e CR por meio de equações. A comparação entre os métodos foi realizada através do Equivalente numérico para cada um dos parâmetros definidos. Nos resultados apresentados verificou-se que as simulações utilizando os arquivos climáticos TMY apresentaram os piores níveis de eficiência energética em todos os casos. Além disso, no consumo de aquecimento, o método prescritivo apresentou altos níveis de eficiência, diferente do encontrado no método de simulação, que apresentaram baixos níveis. Concluiu-se que os métodos discordaram entre si na maioria dos casos, o que implica que a escolha por determinado procedimento influencia na avaliação do nível de eficiência energética.

Na aplicação do RTQ-C, Rosa, Brandalise e Silva (2013) compararam o nível de eficiência energética entre o método prescritivo e o método de simulação para duas edificações. A primeira delas foi uma edificação institucional de uma escola ainda em fase de projeto na cidade de pelotas, a outra, foi um modelo base de um

edifício de escritórios elaborados para uma situação hipotética. Para o clima, o método prescritivo adotou a zona 3 para a escola, e a zona 2 para o edifício de escritórios. Para o método de simulação foram utilizados, respectivamente, os dias típicos para a cidade de Porto Alegre e Santa Maria, através da utilização do programa *DesignBuilder*. A caracterização dos componentes do edifício de escritórios considerou uma transmitância térmica de $0,99 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para coberturas, e $3,13 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ para paredes, com absorptância de 0,3 para ambos. Para a escola, o valor adotado para a transmitância térmica da cobertura foi de $0,49 \text{ W/m}^2$, com absorptância de 0,2. Para as paredes, estes mesmos parâmetros foram de $0,74 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ e 0,3, respectivamente. Além desses valores, foram definidos os *setpoint* do condicionamento do ambiente interno, os padrões de ocupação, a densidade de potência de iluminação e a eficiência do sistema de ar condicionado. Dos resultados obtidos para o modelo de escola, ambos os métodos obtiveram o nível de eficiência energética A. Para o modelo de escritórios, verificou-se que o método prescritivo apresentou avaliações do nível de desempenho energético piores do que o método de simulação, atuando a favor da segurança. Segundo os autores, o fato de não considerar a orientação solar da edificação pode ser um dos fatores que contribuíram para a discrepância dos resultados. De acordo com Rosa, Brandalise e Silva (2013), o método de simulação é mais preciso, contudo, mais complexo e restrito.

Como pode ser visto, o método empregado para a avaliação do nível de eficiência energética e do desempenho térmico pode apresentar resultados divergentes, qualificação ou não, uma edificação. Os métodos analíticos, apesar de apresentam maior rapidez na determinação dos resultados, não são representativos para todos os casos. Contudo, os métodos de simulação computacional necessitam de maior compreensão do usuário na inserção dos dados de entrada e configuração do programa, que nem sempre apresentam os mesmos parâmetros aplicados pelas normas.

2.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional, como instrumento para avaliação do desempenho termoenergético de edificações, se apresenta como uma importante ferramenta na concepção de um projeto habitacional. Através dela, se torna possível

a avaliação de diferentes alternativas relacionados ao diversos sistemas que compõe uma edificação, seus padrões de uso, e das características e propriedades térmicas dos componentes do envelope construtivo. Entretanto, Mendes et al. (2005) destaca que devido à complexidade da utilização destas ferramentas, o uso de simulação de edificações no Brasil ainda está concentrado nas instituições de ensino e pesquisa, com pouca transferência da tecnologia para o setor privado.

Dentre os principais programas de simulação computacional utilizados atualmente para avaliação do desempenho energético de edificações, destaca-se o uso do programa *EnergyPlus*. Distribuído pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), o programa foi desenvolvido a partir dos programas *BLAST* e *DOE-2* com o objetivo de simular as cargas térmicas e realizar a análise energética de edificações e de seus sistemas (MELO et al., 2009). Desenvolvido em 1997, o programa historicamente baseou-se na análise do desempenho energético de edificações comerciais. Entretanto, com a melhora dos modelos de transferências de calor pelo solo, infiltração de ar e equipamentos residenciais, como os aquecedores de água e condicionadores de ar, o programa expandiu suas capacidades para a análise de edificações residenciais (DOE, 2018). A validação do programa *EnergyPlus* é realizada de acordo com o a metodologia aplicada pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2017b), sendo capaz de simular grandezas físicas relacionadas à transferência de calor, de umidade e de ar. Além disso, o programa possibilita o cálculo de parâmetros relativos à iluminação, sombreamento, conforto visual e térmico do usuário, permitindo a simulação em intervalos de fração de hora.

Entretanto, a importação de programas desenvolvidos no exterior trouxe consigo alguns problemas relacionados à sua aplicabilidade no Brasil. Segundo Ordenes et al. (2003), os problemas mais frequentes estão relacionados ao fato de programas de simulação importados reproduzirem as características construtivas e configurações padrões baseadas na normatização do país em que foram desenvolvidos. Isto implica que o usuário adote procedimentos para adaptação destes dados ao seu local de pesquisa. Além disso, o programa *EnergyPlus* apresenta algumas simplificações na caracterização geométrica dos componentes construtivos modelados, já que dispõe os materiais que compõe o componente em camadas paralelas entre si e perpendiculares ao fluxo de calor.

Com o objetivo de solucionar estas duas limitações, Ordenes et al. (2003) propôs em seu trabalho, a elaboração de uma biblioteca de componentes

construtivos com propriedades térmicas adequadas a realidade brasileira, e o desenvolvimento de um método de cálculo para implantação no programa dos principais componentes construtivos apresentados na NBR 15220 – 3 (ABNT, 2005b). O método descrito por Ordenes et al. (2003) baseia-se no desenvolvimento de modelos equivalentes para cada componente construtivo. Neste método, os componentes elaborados apresentam espessuras e densidades de massa aparente equivalentes para as camadas dos materiais que o compõe, sendo mantidas constantes as propriedades térmicas totais do modelo. Para desenvolvimento do método, Ordenes et al. (2003) utilizou as propriedades térmicas dos materiais, os métodos de cálculo para determinação da transmitância térmica e capacidade térmica total, descritos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). No total, a biblioteca de componentes construtivos elaborada por Ordenes et al (2003) é composta por 24 modelos de paredes, 24 modelos de coberturas, 20 modelos de pisos, 2 modelos de divisórias e 4 modelos de forros. Contudo, um fator importante no desenvolvimento de componentes construtivos equivalentes com camadas paralelas entre si, como na biblioteca elaborada por Ordenes et al (2003), é analisar as trocas de calor através do modelo computacional para verificar a influência da disposição dos materiais na transferência de calor.

Um estudo conduzido por Kossecka e Kosny (2002) através de simulação computacional utilizando o programa *DOE-2.1E*, analisou seis configurações diferentes de paredes para determinação das demandas de energia para aquecimento e resfriamento do ambiente interno de uma edificação ao longo do ano. Os seis modelos desenvolvidos eram compostos pelos mesmos materiais e proporções – concreto e isolantes térmicos, arranjados de maneira diferente em cada um dos casos. Desta forma, apesar das grandezas térmicas de resistência e capacidade total serem iguais entre os modelos, buscou-se verificar a influência da disposição de cada material no desempenho térmico da parede. Os resultados apresentados mostraram que os casos simulados foram diferentes entre si, afetando de forma significativa o consumo de energia para o condicionamento do ambiente interno. O valor máximo entre a melhor configuração dos materiais (totalmente isolado na camada interna), e a pior configuração (totalmente isolado na camada externa), no que concerne o consumo de energia entre os casos simulados, foi de aproximadamente 11%. Kossecka e Kosny (2002) concluíram que a influência da configuração da parede estava relacionada aos fatores estruturais térmicos (*Thermal*

structure factors), os quais dependem da distribuição dos materiais com maior capacidade térmica e maior resistência térmica no componente construtivo. Este estudo mostra a importância da correta modelagem do componente construtivo, uma vez que este elemento é parte integrante e indissociável do envelope construtivo.

O envelope construtivo, o qual representa a barreira física que separa os ambientes interno e externo da edificação deve ser projetado visando à redução da demanda de energia elétrica para condicionamento interno do ambiente. A envoltória pode ser comparada à pele da edificação. Trata-se do conjunto de elementos construídos que compõem os fechamentos dos ambientes internos em relação ao ambiente externo. Todos os elementos que estão acima do nível do solo e com contato com o exterior ou com outro edifício pertencem à envoltória (MMA, 2015). Uma das principais diretrizes no que se refere à eficiência energética de edificações relacionadas ao envelope construtivo está na caracterização dos componentes construtivos utilizados na sua concepção.

Pereira (2009) apresentou um estudo sobre a influência do envelope construtivo no desempenho térmico da edificação. O trabalho tem como base uma residência unifamiliar, sendo feito um estudo de campo (para calibração do modelo) e simulação computacional para aferir as variações nas horas de conforto em um ano, resultantes das alterações dos componentes construtivos do envelope. Para as simulações dos casos, foram selecionados sete opções de paredes, com variação da transmitância térmica de 1,21 a 5,04 W/(m².°C) e variação da capacidade térmica de 55 a 430 kJ/(m².°C). Com relação às coberturas, foram escolhidos cinco tipos diferentes, variando os parâmetros de transmitância térmica e capacidade térmica total de 0,95 a 4,55 W/(m².°C) e 18 a 458 KJ/(m².°C), respectivamente. Os resultados indicaram que a capacidade térmica do envelope está estritamente ligada às horas de conforto dos usuários na edificação, tanto para o modelo com ventilação natural quanto para o modelo sem ventilação natural, tendo, portanto, uma grande influência no desempenho térmico-energético. Com relação à transmitância térmica, foi constatada pouca correlação com as horas de desconforto do modelo em ambos os casos de ventilação natural ou não. Concluindo assim que a transmitância térmica dos componentes possui pouca influência no desempenho térmico desta edificação.

A capacidade térmica e a transmitância térmica são umas das principais propriedades térmicas que balizam a determinação do nível de eficiência de uma

edificação através do envelope construtivo. A NBR 15220-1 (ABNT, 2005d) define a capacidade térmica, como sendo a quantidade de calor necessária para a variação de uma unidade de temperatura de um sistema. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2013), esta propriedade reflete uma maior ou menor capacidade do componente construtivo em reter o calor. Quanto a Transmitância térmica, a NBR 15220-1 (ABNT, 2005d) a define como sendo o inverso da resistência térmica, parâmetro este que representa a propriedade do material em resistir à passagem do calor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2013).

2.4.1 Pontes Térmicas

Outro fator relacionado ao envelope construtivo, entretanto, não considerado nas normas e regulamentos vigentes no Brasil, são as pontes térmicas. Segundo Freitas et al. (2016) a existência de pontes térmicas nas edificações tende a aumentar as trocas de calor entre o ambiente interno e externo, pois são pontos fracos dos elementos construtivos, onde o fluxo de calor passa com maior facilidade.

De acordo com Gioelli et al. (2015) as consequências negativas das pontes térmicas são reconhecidas a muito tempo no âmbito internacional, sobretudo, nos países com climas predominantemente frios. As normas europeias EN ISO 14683 (ISO, 2017a) e a EN ISO 10211 (ISO, 2017b) descrevem os métodos de cálculo para determinação do fluxo de calor através de pontes térmicas lineares, e bidimensionais e tridimensionais, respectivamente. De acordo com a EN ISO 10211 (ISO, 2017a) as pontes térmicas são partes do envelope construtivo onde a resistência térmica muda sua direção de forma significativa, devido à presença de materiais com diferentes condutividades térmicas, variações das espessuras das camadas e através da diferença entre área internas e externa da edificação, como ocorre nas junções paredes, pisos e tetos.

A fim de analisar a influência das pontes térmicas na avaliação da eficiência energética de paredes de edificações residenciais, Freitas et al (2016) realizou simulações computacionais para as oito zonas bioclimáticas. A tipologia da edificação residencial é composta por quatro pavimentos, com dimensões de (23x8,5) m. No caso simulado sem a presença de pontes térmicas foi considerado um sistema autoportante de cerâmica. Para a situação com pontes térmicas, foi elaborado um sistema construtivo utilizando uma estrutura de concreto armado. A

simulação foi realizada no programa *DesignBuilder*, utilizando as configurações recomendadas pelo RTQ-R. No trabalho foram realizadas 32 composições diferentes para o elemento construtivo de parede, alterando as espessuras e a absorvância solar. Para aplicação dos componentes no programa de simulação utilizado, os autores desenvolveram modelos equivalentes com as mesmas propriedades térmicas em ambos os casos, de acordo com os procedimentos descritos por Ordenes et al. (2003). Como parâmetro de avaliação foi considerado o consumo total de energia para aquecimento e resfriamento das zonas térmicas. Os resultados mostraram que a cor da parede foi o principal fator que alterou o consumo de energia nas comparações. Para as zonas bioclimáticas 1 e 2, onde o clima é mais frio, os resultados indicaram um maior consumo de energia em paredes que possuíam pontes térmicas. Contudo, estes resultados não foram observados para outras seis zonas bioclimáticas, onde o consumo total para paredes com pontes térmicas foi menor.

Outro estudo semelhante, conduzido por Gioelli et al. (2015), avaliou e comparou o consumo de energia total para um hotel considerando, ou não, a presença de pontes térmicas na composição do envelope construtivo. As simulações foram realizadas para as zonas bioclimáticas de 1 a 4, utilizando o programa *DesignBuilder*. A edificação de cinco pavimentos (52x17 m cada) foi modelada com base em um estudo de Carlo (Gioelli et al. 2015 apud Carlo, 2008), variando a densidade de carga interna, a densidade de potência, e o percentual de aberturas nas fachadas. A parede sem pontes térmicas foi modelada para um componente equivalente, conforme o método descrito por Ordenes et al. (2003). Para a parede com a presença de pontes térmicas, o modelo desenvolvido foi obtido por meio da sobreposição de três camadas que simulam os pilares e as vigas (parede pesada), uma parede leve de aglomerado e concreto, e uma parede interna. Dos resultados obtidos através das simulações, constatou-se que para o consumo de energia para aquecimento, as paredes com pontes térmicas apresentaram um consumo em média 40% maior em relação às paredes sem pontes térmicas. Contudo, para a zona bioclimática 1, a presença de pontes térmicas obteve maior redução no consumo de energia anual, o qual envolve o aquecimento e resfriamento do ambiente. De acordo com Gioelli et al. (2015), para a zona bioclimática 1, o menor consumo de energia se deve ao fato de que, a presença de pontes térmicas facilitou as trocas de calor entre os ambientes, propiciando uma perda de calor para o

ambiente externo de maneira natural, contribuindo principalmente para seu resfriamento, responsável por mais de 95% do consumo total.

Segundo Giollo et al. (2015), os resultados obtidos mostraram a importância na consideração das pontes térmicas no cálculo do desempenho termenergético de edifícios, tendo em vista que a influência deste parâmetro pode gerar um aumento no consumo de energia elétrica final. Além disso, Freitas et al. (2016) afirma que, a falta de clareza quanto a consideração de elementos estruturais na composição do envelope construtivo pelo RTQ, pode gerar valores grandes para o consumo de energia elétrica. Embora o regulamento recomende que a transmitância térmica de elementos construtivos heterogêneos de fechamento sejam ponderadas, ela não especifica procedimentos quanto ao sistema estrutural.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou diversos trabalhos relacionados aos temas ligados a eficiência energética no Brasil, especialmente nos aspectos que envolvem o envelope construtivo de edificações e o uso de simulação computacional.

A grande preocupação pelo consumo de energia elétrica no país ficou evidente pelas medidas políticas tomadas após o racionamento de energia elétrica no ano de 2001, com maiores investimentos, e a criação de setores responsáveis pela aplicação de programas de eficiência energética no país.

Foram apresentadas as normatizações e os regulamentos vigentes quanto à determinação do nível de eficiência energética e desempenho térmico de edificações, apresentando alguns estudos comparativos quanto ao seu método de aplicação. Além disso, neste capítulo foram apresentados trabalhos ligados à influência do envelope construtivo no desempenho termoenergético de edifícios, relacionados à caracterização dos componentes construtivos em programas de simulação computacional e a presença de pontes térmicas.

O uso de programas de computador permite a análise de diversos cenários simultaneamente, auxiliando o usuário na determinação dos parâmetros que mais influenciam no desempenho termoenergético da edificação, além da facilidade na aplicação de medidas para adequação às normas e regulamentos vigentes.

Por fim, a utilização de programas computacionais demonstra a importância da simulação como uma ferramenta para concepção de edificações mais eficientes.

3 MÉTODO

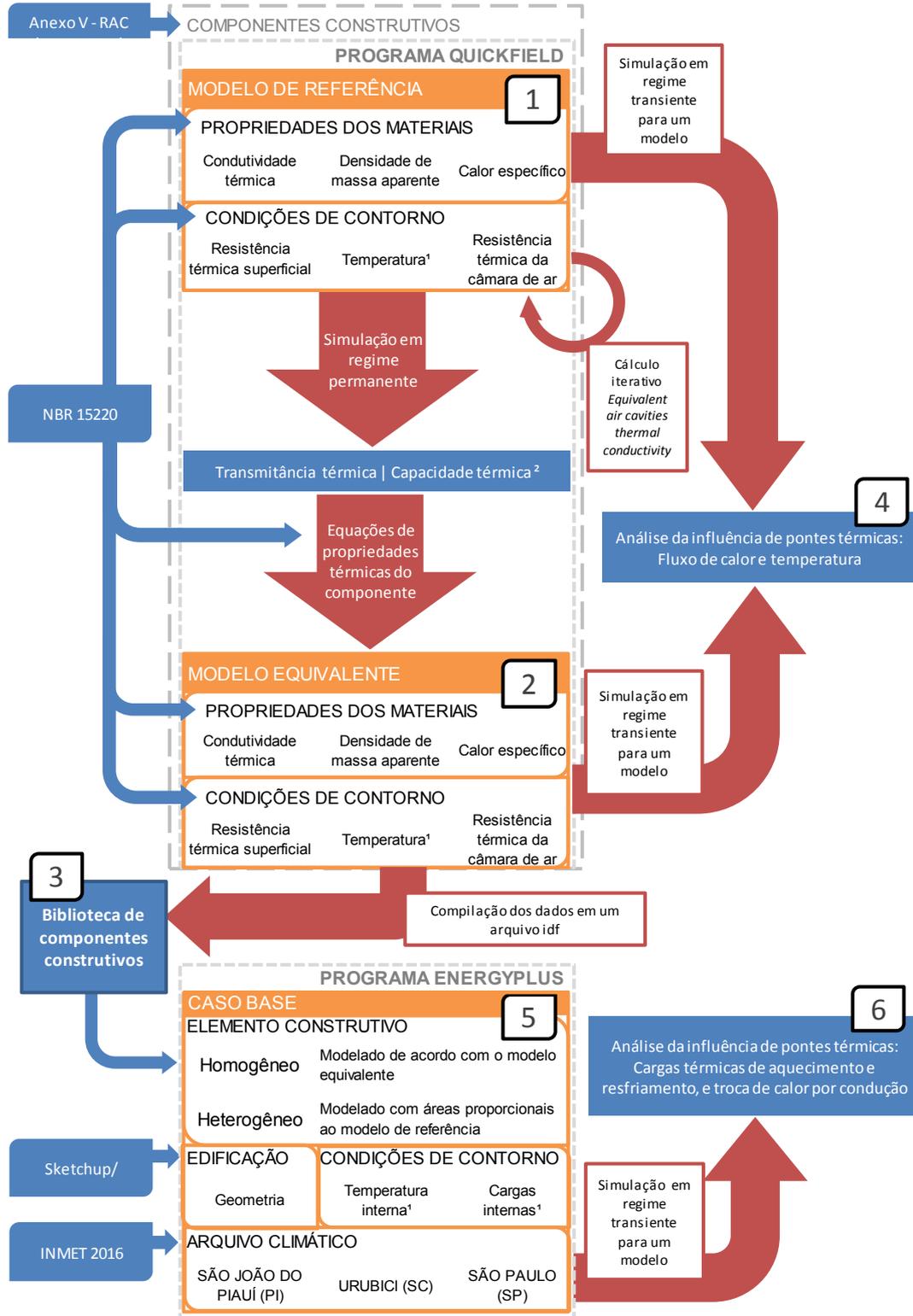
Este trabalho apresenta uma proposta para a determinação de um modelo equivalente para avaliação das propriedades térmicas de componentes construtivos de paredes, pisos e coberturas que apresentam câmara de ar no seu interior. A partir do método apresentado é elaborada uma biblioteca de componentes construtivos para a análise energética de edificações no programa *EnergyPlus*. A influência de pontes térmicas na modelagem dos componentes também foi analisada.

Para a determinação dos modelos desenvolvidos, o método emprega o uso de ferramentas computacionais que utilizam cálculos para a simulação baseados no método dos elementos finitos. A ferramenta escolhida para a elaboração dos modelos foi o programa *Quickfield Student* (2017) na versão 6.3, desenvolvida pela TERA Analysis Ltda (2018). As simulações no programa *Energyplus* (2018) foram realizadas na versão 8.7.0. A validação dos modelos desenvolvidos foi realizada através da comparação das propriedades térmicas obtidas pelas simulações e pelo método de cálculo descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). O método proposto pode ser dividido nas seguintes etapas:

1. Caracterização e elaboração de modelos computacionais no programa *Quickfield* (Modelos de referência), desenvolvidos a partir da descrição dos componentes presentes no Anexo V do RAC (INMETRO, 2013), e das propriedades térmicas apresentadas na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c);
2. Elaboração de modelos de componentes construtivos com propriedades térmicas equivalentes aos seus respectivos modelos de referência no programa *Quickfield*;
3. Elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos equivalentes.
4. Análise da influência de pontes térmicas entre um modelo de referência e um modelo equivalente em simulações em regime transiente no programa *Quickfield*;
5. Modelagem de um elemento construtivo homogêneo e heterogêneo para simulação computacional considerando três casos no programa *EnergyPlus*; e
6. Análise da influência de pontes térmica em relação ao método de modelagem de um elemento construtivo no programa *EnergyPlus*.

A Figura 3 apresenta um fluxograma detalhado contendo as etapas e os aspectos considerados.

Figura 3 – Detalhamento das etapas do método proposto



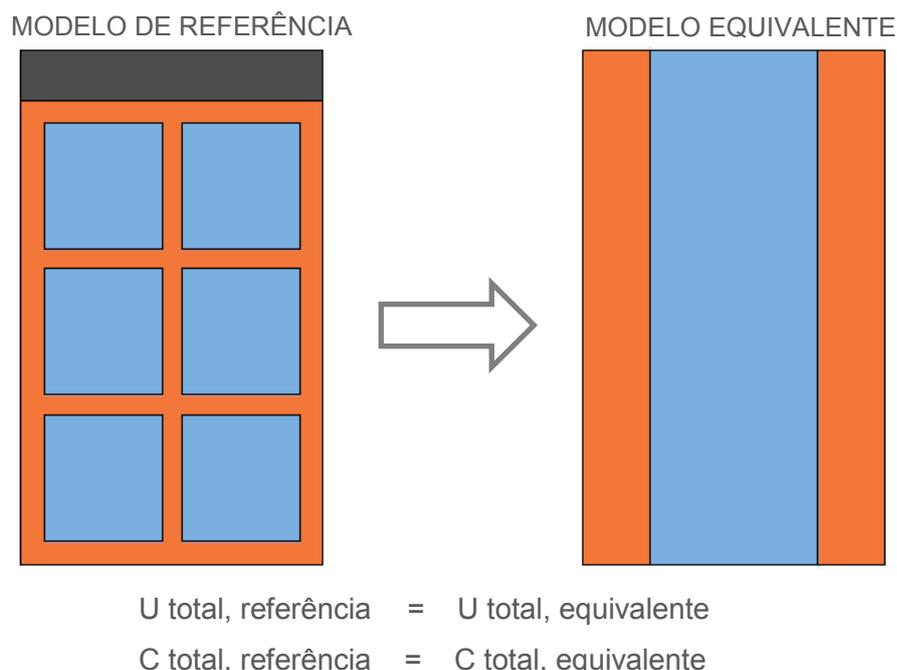
¹ Parâmetros definidos pelo autor;

² Capacidade térmica determinada pelo procedimento de cálculo descrito na NBR 15220-2;

A primeira etapa do método consiste na caracterização dos componentes construtivos que serão modelados no programa computacional *Quickfield*, denominados neste trabalho de modelos de referência. A elaboração destes componentes é feita com base nos modelos presentes no Anexo V do RAC (INMETRO, 2013), e que apresentam câmara de ar no seu interior. As propriedades térmicas descritas na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) foram utilizadas para a modelagem dos materiais destes modelos, excetuando-se a resistência térmica da câmara de ar que foi obtida por meio de cálculo iterativo utilizando uma ferramenta computacional disponível no programa *Quickfield*. Nessa etapa foi possível realizar as simulações para os modelos em regime permanente em condições de verão. A simulação em regime permanente teve por objetivo fornecer os dados necessários para a elaboração de um modelo que possa ser utilizado no programa *EnergyPlus*.

A segunda parte do método consiste no desenvolvimento de modelos que possam ser aplicados no programa *EnergyPlus*, chamados de modelos equivalentes. Estes modelos apresentam a mesma capacidade térmica total (C_t), e a mesma transmitância térmica (U_t) total do respectivo modelo de referência, mas com uma disposição diferente dos materiais. A Figura 4 apresenta um exemplo para um bloco cerâmico de seis furos.

Figura 4 – Modelo de referência e modelo equivalente de um bloco cerâmico



A elaboração destes modelos equivalentes foi realizada inserindo os valores das propriedades térmicas obtidas pelas simulações em regime permanente para os modelos de referência nas equações de transmitância térmica, capacidade térmica e resistência térmica do componente construtivo, apresentados na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). Na modelagem dos componentes equivalentes no programa *Quickfield*, os valores das propriedades térmicas seguiram os mesmos valores definidos para o modelo de referência, contudo, a resistência térmica da câmara de ar, antes obtida por meio de simulação computacional, foi determinada através da equação da resistência térmica presente na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c).

A terceira etapa consiste na compilação dos dados obtidos para todos os modelos equivalentes simulados em um arquivo com extensão *idf* (*Intermediate Data Format*). Através deste arquivo foi possível realizar a importação das características geométricas e das propriedades do modelo, possibilitando a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos no programa *EnergyPlus*.

Para a análise da influência da presença de pontes térmicas no comportamento entre os modelos desenvolvidos foram realizadas simulações em regime transiente. Nesta quarta etapa, foram comparados os valores de fluxo de calor e temperatura da superfície interna e externa para um modelo de referência e um modelo equivalente. Considerou-se flutuações da temperatura externa em um período de 24 horas para as simulações em regime transiente.

A quinta parte do método apresenta a modelagem para um elemento construtivo modelado de forma homogênea, segundo o método proposto, e de forma heterogênea, proporcional às camadas do componente de referência. Os modelos foram inseridos em uma edificação hipotética, e simulados para três cidades: São João do Piauí (PI), Urubici (SC) e São Paulo (SP). Os dados climáticos para as cidades escolhidas foram obtidos através dos arquivos climáticos INMET 2016 (2018).

A última etapa verificou a influência do método de modelagem de elementos construtivos no programa *EnergyPlus* para as três cidades escolhidas. Nas simulações, considerou-se a troca de calor somente por uma superfície, definida com base na carta solar de cada uma das cidades. Como parâmetro de avaliação, foram analisados as taxas de troca de calor por condução para as superfícies internas nas simulações de dias extremos, São João do Piauí (Verão) e Urubici

(Inverno), e as cargas de aquecimento e resfriamento para a simulação anual para a cidade de São Paulo.

3.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

3.1.1 Componentes Construtivos

A escolha dos modelos de referência foi realizada com base na descrição dos componentes presentes no Anexo V do RAC (INMETRO, 2013), e são apresentadas no Apêndice A deste trabalho. Foram elaborados 34 modelos de paredes, 3 modelos de pisos e 21 modelos de coberturas que apresentam câmara de ar no seu interior.

Contudo, a descrição dos modelos apresentada no Anexo V do RAC (INMETRO, 2013) não especifica alguns parâmetros geométricos necessários para a modelagem computacional do componente no programa *Quickfield*, como as espessuras das paredes dos blocos de cerâmica e de concreto, e das lajotas cerâmicas de lajes pré-moldadas. Com base na NBR 6136 (ABNT, 2016), que descreve os requisitos de blocos de concreto, e no Regulamento Técnico Metrológico definido pela portaria Inmetro nº 16, de 05 de janeiro de 2011 (INMETRO, 2011), que especifica as condições e parâmetros de comercialização de blocos e tijolos cerâmicos de alvenaria, optou-se por definir as espessuras das paredes dos componentes construtivos de acordo com os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Espessuras das paredes elementos construtivos

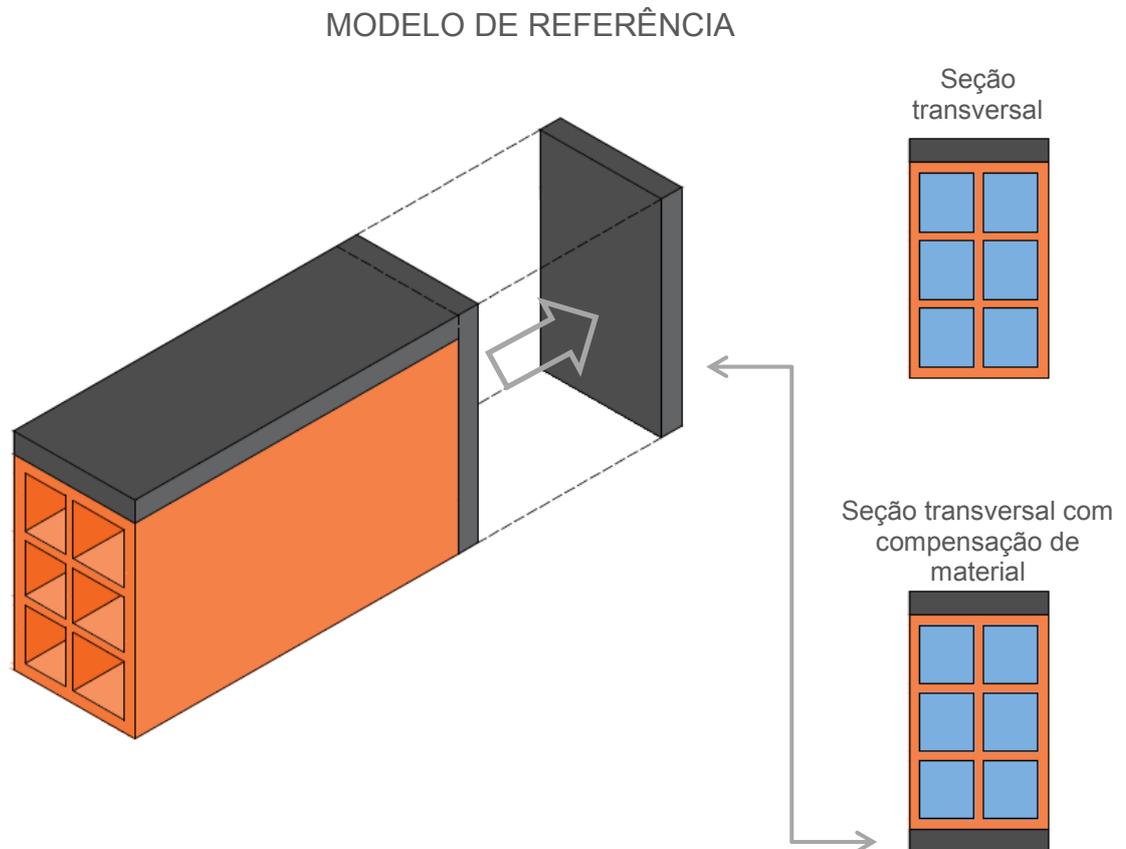
Componente construtivo	Espessura (cm)	
	Parede Interna	Parede Externa
Cerâmico	0,6	0,7
Concreto largura \geq 14cm	2,5	2,5
Concreto largura $<$ 14 cm	1,5	1,5

Para a modelagem das lajotas cerâmicas da laje pré-moldada no programa *Quickfield*, optou-se por usar os mesmos valores descritos para os blocos de cerâmica apresentados na Tabela 1.

3.1.2 Modelagem do Componente Construtivo

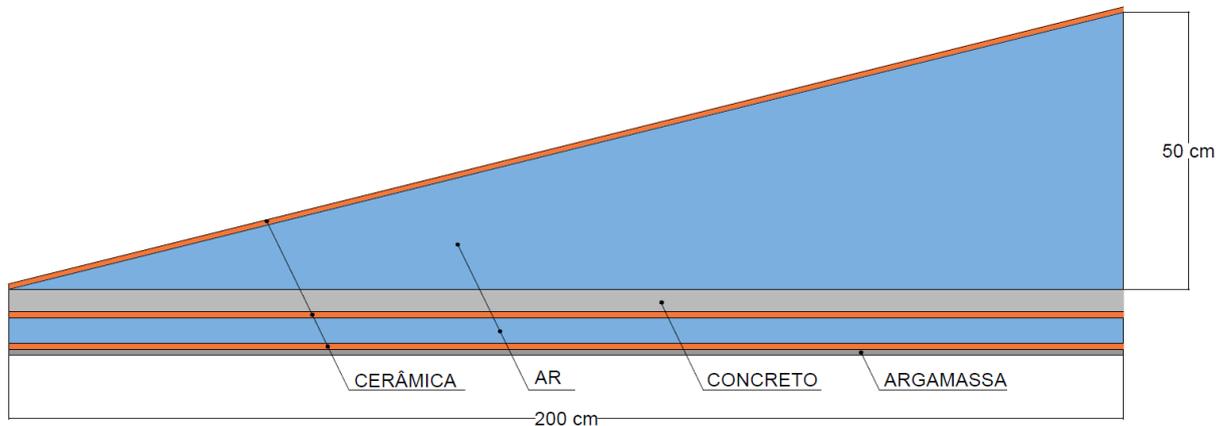
Na etapa de modelagem dos componentes construtivos, verificou-se se a representação do modelo em duas dimensões (seção transversal) no programa computacional *Quickfield*, omitiria algum dos materiais que compõe o componente. A simplificação geométrica na elaboração de modelos em duas dimensões pode gerar dados divergentes dos resultados obtidos pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), que calcula a transmitância e capacidade térmica total dos componentes considerando três dimensões. A Figura 5 exemplifica um modelo de parede, onde a argamassa da parte posterior do componente não é modelada. Para corrigir esta limitação foi realizada uma compensação do material que não poderia ser representado em duas dimensões, transferindo-se o volume correspondente para regiões em que pudesse ser modelado.

Figura 5 - Compensação de material no modelo de referência



Para a modelagem dos componentes construtivos de coberturas, consideraram-se as dimensões do telhado de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). O telhado é simples, de duas águas, com dimensões de 7x4 m, altura da laje a cumeeira de 50 cm e com abertura de ventilação de 5 cm. Contudo, a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) não estabelece procedimentos de cálculo para telhados inclinados, indicando que a espessura da câmara de ar do ático deve ser constante para a determinação da resistência térmica total do componente. Para fins comparativos, optou-se por modelar o componente de referência de acordo com uma situação real, com telhado inclinado. Para estes casos, o telhado modelado corresponde a uma água, já que possui simetria em relação a um de seus eixos em um corte transversal. Para as lajes da cobertura que possuam câmara de ar, foi necessário realizar primeiramente a determinação de um modelo equivalente, visando à diminuição do número de nós da malha, e otimização da simulação pelo método dos elementos finitos no programa *Quickfield*. A Figura 6 apresenta um exemplo de uma cobertura com telha de cerâmica com laje pré-moldada.

Figura 6 – Modelo de referência de uma cobertura de telha cerâmica e laje pré-moldada



3.1.3 Propriedades Térmicas dos Materiais

Para a caracterização dos materiais dos componentes construtivos, foram utilizadas as propriedades térmicas apresentadas na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). Contudo, a norma em questão apresenta faixas de valores das propriedades térmicas de alguns materiais, cabendo ao usuário à inserção correta destes valores de acordo com o material no qual se deseja simular.

Os valores das propriedades térmicas dos materiais utilizados neste trabalho foram baseados no estudo de Ordenes et al (2003). A Tabela 2 apresenta os materiais utilizados na composição dos modelos de paredes, pisos e coberturas, bem como as propriedades necessárias para a modelagem dos componentes construtivos no programa *Quickfield*.

Tabela 2 – Propriedades térmicas dos materiais

Material	ρ (kg/m³)	λ (W/m.°C)	c (kJ/kg.°C)
Argamassas			
argamassa comum	2100	1,15	1,00
argamassa de gesso (ou cal comum)	1200	0,70	0,84
Cerâmicas			
tijolos	1600	0,90	0,92
telha de barro	2000	1,05	0,92
Fibrocimento			
placas de fibrocimento	1900	0,95	0,84
Concreto (com agregados de pedra)			
concreto normal	2200	1,75	1,00
blocos	2400	1,75	1,00
Gesso			
placa de gesso; gesso acartonado	900	0,35	0,84
Isolantes térmicos			
lã de rocha	100	0,45	0,80
poliestireno expandido moldado	35	0,04	1,40
espuma rígida de poliuretano	40	0,035	1,42
Madeiras e derivados			
carvalho, feijó, pinho, cedro, pinus	600	0,15	1,34
Metais			
alumínio	2700	230	0,88
Pedras (incluindo junta de assentamento)			
granito, geisse	2600	3,00	0,80
Plásticos			
policloreto de vinila (PVC)	273	0,071	0,96

ρ = densidade de massa aparente;

λ = condutividade térmica;

c = calor específico

3.1.4 Resistência Térmica da Câmara de Ar

Os modelos de referência desenvolvidos no programa *Quickfield* se dividem em dois grupos principais quanto às características de ventilação da câmara de ar: as paredes e os pisos, que apresentam componentes construtivos com câmara de ar sem ventilação natural, como blocos de concreto e laje pré-moldada de lajotas cerâmicas; e as coberturas, compostas por componentes construtivos com câmaras de ar com ventilação natural, devido à presença do ático.

A principal diferença entre estes dois grupos está na determinação da resistência térmica da câmara de ar. Isto porque, a ferramenta utilizada para o cálculo deste parâmetro foi desenvolvida para câmaras de ar sem ventilação, ou com pouca ventilação. Contudo, de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) a ventilação dos áticos das coberturas presentes neste trabalho são do tipo “*muito ventilada*”, e, portanto, não estão compreendidas na ferramenta de cálculo utilizada.

Dessa maneira, para a determinação da resistência térmica dos áticos, optou-se por seguir os valores adotados pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), considerando o valor $0,21 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$ para o fluxo de calor na direção descendente para as coberturas. Para as paredes e os pisos, a resistência térmica da câmara de ar foi obtida através da ferramenta “*Equivalent air cavities thermal conductivity calculator*” no programa *Quickfield*.

Cabe ressaltar que no programa *Quickfield* as câmaras de ar são consideradas como um material sólido hipotético, e apresentam uma condutividade térmica equivalente. Entretanto, este parâmetro reflete o somatório dos coeficientes de trocas de calor por radiação e convecção através das câmaras. A validação da ferramenta iterativa de cálculo é realizada de acordo com a ISO 10077 (ISO, 2012) – *Thermal performance of windows, doors and shutters*, que apresenta um método de cálculo para determinação da resistência térmica de câmaras de ar.

3.2 SIMULAÇÃO EM REGIME PERMANENTE NO PROGRAMA QUICKFIELD

Para a determinação das propriedades térmicas dos modelos de referência no programa *Quickfield* foram realizadas simulações em regime permanente, considerando as condições de contorno apresentadas na sequência.

A simulação em regime permanente, onde as propriedades dos materiais são constantes ao longo do tempo, foi realizada para a validação dos modelos de referência, já que a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) realiza os cálculos considerando este tipo de abordagem. Além disso, a determinação da transmitância térmica total para os modelos de referência obtidas nas simulações em regime permanente foi necessária para a elaboração dos modelos equivalentes.

As condições de contorno aplicadas nas simulações dos modelos computacionais de referência foram: a resistência térmica superficial, e a temperatura interna e externa do ambiente, definidos a seguir.

De acordo com a NBR 15220-1 (ABNT, 2005d), a resistência térmica superficial refere-se à resistência térmica de uma camada de ar adjacente a superfície de um componente, na qual há transferência de calor por meio da radiação e/ou convecção. Para fins de cálculo, a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) estabelece valores da resistência superficial interna e externa de componentes de acordo com os parâmetros de direção e sentido do fluxo de calor.

Neste trabalho, adotou-se os valores de 0,04 m².°C/W para a resistência térmica superficial externa, e os valores de 0,13 m².°C/W (horizontal) e 0,17 m².°C/W (descendente) para a resistência térmica superficial interna. O sentido do fluxo de calor foi determinado pela diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo.

Os componentes construtivos de referência modelados no programa *Quickfield* foram simulados para um período de verão, considerando um ganho de temperatura para o ambiente interno. Em todos os casos simulados, a temperatura interna e a temperatura externa do ambiente se mantiveram constantes e iguais a 21°C e 30°C, respectivamente.

As simulações em regime permanente no programa *Quickfield*, fornecem como dados de saída a quantidade de calor que passa através da superfície analisada. Para a determinação da transmitância térmica total através do componente foi utilizada a Equação (1), adotando uma variação da temperatura de 9°C e o comprimento total da superfície interna perpendicular ao fluxo de calor.

$$U_T = \frac{\phi_q}{\Delta T \cdot h}$$

Equação (1)

Onde,

ϕ_q = fluxo de calor (W);

ΔT = variação da temperatura externa e interna (°C);

h = Comprimento da superfície analisada (m).

Para a determinação da capacidade térmica total (C_T) do modelo de referência foram realizados os procedimentos de cálculo apresentados na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), utilizando a Equação (2) e as propriedades dos materiais descritas no item 3.1.3.

3.3 DEFINIÇÃO DO MODELO EQUIVALENTE

A elaboração dos modelos equivalentes foi realizada por meio da Equação (2), Equação (3) e Equação (4), que determinam, respectivamente, a Capacidade Térmica Total (C_T), a Transmitância Térmica Total (U_T) e a Resistência Térmica Total (R_T) do componente construtivo. Estas equações estão descritas na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c).

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad \text{Equação (2)}$$

$$U_T = \frac{1}{R_T} \quad \text{Equação (3)}$$

$$R_T = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

e_i = espessura da camada do material (m);

c = calor específico (kJ/kg. °C);

ρ = densidade de massa aparente (kg/m³);

λ = condutividade térmica (W/m. °C);

i = camada do material;

n = número total de camadas.

A premissa para a determinação dos componentes equivalentes é que estes possuam as mesmas propriedades térmicas de seus respectivos modelos de referência. Desta forma, adotou-se no modelo de equivalente, o mesmo valor obtido

através de simulação computacional para a transmitância térmica total, e o mesmo valor calculado para a capacidade térmica total para o modelo de referência.

3.3.1 Modelagem Computacional

A modelagem dos componentes equivalentes no programa *Quickfield* seguiu o mesmo procedimento adotado para os modelos de referência, apresentados no item 3.1, exceto pela determinação da resistência da câmara de ar e pela definição das espessuras equivalentes dos materiais.

Para a determinação das espessuras equivalentes das camadas dos materiais para os modelos de paredes e pisos, foi utilizada a Equação (5). Desconsiderando a capacidade térmica da câmara de ar (devido à densidade de massa aparente (ρ) ter valor desprezível), e igualando as capacidades térmicas totais dos modelos de referência ($C_{T,ref.}$) e equivalente ($C_{T,eq.}$) foi possível determinar as espessuras equivalentes das camadas dos materiais.

$$C_{T,eq.} = \sum_{i=1}^n e_{eq,i} \cdot c_i \cdot \rho_i = C_{T,ref.} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde,

e_{eq} = espessura equivalente da camada do material (m);
 c = calor específico (kJ/kg. °C);
 ρ = densidade de massa aparente (kg/m³);
 i = camada do material;
 n = número total de camadas.

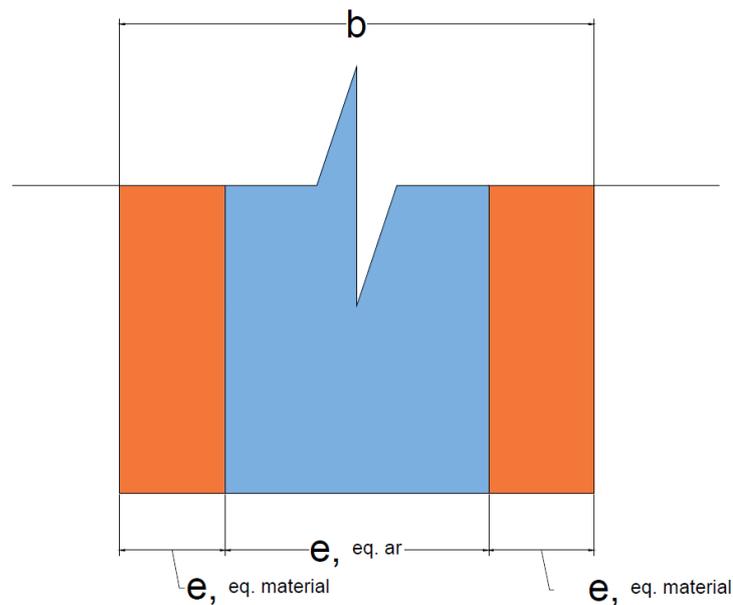
A espessura da câmara de ar do componente construtivo equivalente é obtida pela subtração das espessuras equivalentes do material ($e_{eq,mat.}$) da largura total do componente (b), como pode se observar na Equação (6) e na Figura 7.

$$e_{eq,ar} = b - 2 \cdot e_{eq,material} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde,

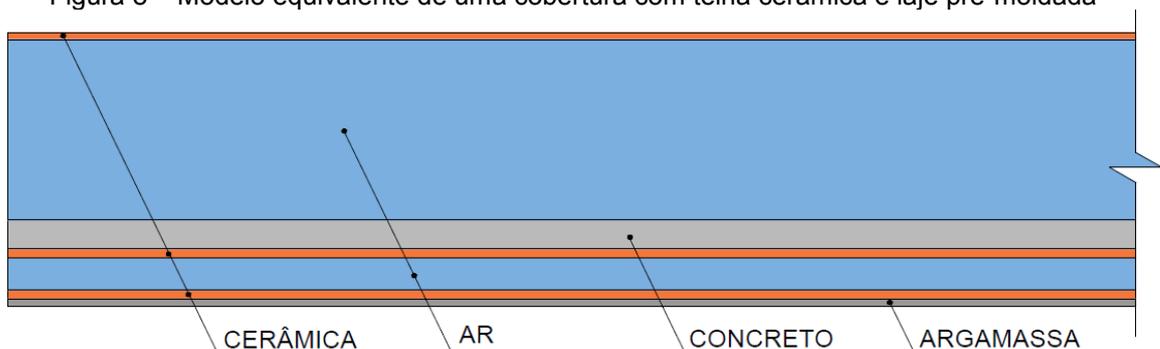
$e_{eq,ar}$ = espessura equivalente da câmara de ar (m);
 $e_{eq,material.}$ = espessura equivalente do material (m);
 b = largura total do componente (m).

Figura 7 – Espessuras equivalentes de componente construtivo



Para as coberturas, a NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) estabelece um modelo equivalente de cálculo, onde a espessura do ático é constante ao longo da seção transversal do componente. De acordo com esta norma, a espessura equivalente do ático é igual à metade da altura entre a laje e a cumeeira, adotada neste trabalho como 50 cm. Portanto, a espessura equivalente do ático para as coberturas simuladas foi de 25 cm. Para coberturas compostas somente por ático e pisos sem câmara de ar, a elaboração de um modelo equivalente foi idêntica à determinada pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). No caso de coberturas com lajes com câmara de ar, optou-se por determinar primeiramente um modelo equivalente para estas lajes para otimização do processo de modelagem. A Figura 8 apresenta um modelo equivalente para uma cobertura com telha de cerâmica e laje pré-moldada.

Figura 8 – Modelo equivalente de uma cobertura com telha cerâmica e laje pré-moldada



A determinação da resistência da câmara de ar (R_{ar}) para os modelos equivalentes de paredes e pisos foi obtida de forma analítica utilizando Equação (7), considerando como resistência térmica total (R_T) o valor obtido através da simulação computacional no programa *Quickfield* para o modelo de referência.

$$R_T = 2 \cdot \frac{e_{eq,material}}{\lambda_{material}} + R_{ar} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde,

$e_{eq,material}$ = espessura da câmara de ar (m);

$\lambda_{material}$ = condutividade equivalente da câmara de ar (W/m. °C).

Para as coberturas, a resistência da câmara de ar seguiu os valores apresentados na NBR 15220-2 (ABNT, 2005b), considerando 0,21 m².°C/W. Como a determinação da resistência térmica da câmara de ar (R_{ar}) no programa *Quickfield* é realizada através da inserção de uma condutividade térmica equivalente, foi utilizada a Equação (4) para o cálculo deste parâmetro. Isolando-se a condutividade equivalente da câmara de ar, obteve-se a Equação (8).

$$\lambda_{eq,ar} = \frac{e_{eq,ar}}{R_{ar}} \quad \text{Equação (8)}$$

Onde,

$e_{eq,ar}$ = espessura da camara de ar (m);

R_{ar} = Resistência térmica da câmara de ar (m². °C/W).

3.4 SIMULAÇÃO EM REGIME TRANSIENTE NO PROGRAMA QUICKFIELD

Na simulação em regime transiente, ou seja, quando há variação de uma ou mais propriedades do modelo computacional no decorrer do tempo, foi realizada uma análise da influência da presença de pontes térmicas para um dos componentes de paredes desenvolvidos. Esta análise foi obtida pela determinação e comparação do atraso térmico e da quantidade de calor através do modelo de referência e do modelo equivalente.

Nestas simulações, considerou-se um intervalo de tempo de 72 horas, sendo considerados como dados de saída apenas às últimas 24 horas simuladas. A

simulação ao longo de 72 horas permitiu que as variações do fluxo de calor e da temperatura através dos componentes construtivos se tornassem periódicas, eliminando ou minimizando as diferenças nos valores dos parâmetros analisados, em relação ao mesmo período do dia anterior.

As condições de contorno consideradas nas simulações em regime transiente foram as mesmas descritas nas simulações em regime permanente, contudo, com variações de seus parâmetros em função do tempo. Para realizar as variações destas condições nas simulações em regime transiente, foram inseridas funções no programa *Quickfield* que permitissem a alteração destes parâmetros ao longo do período simulado.

Os valores adotados para a resistência térmica superficial foram os mesmos aplicados para as simulações em regime permanente, apresentados no item 3.2. Para o componente construtivo de parede analisado, os valores dos parâmetros de resistência superficial interna e externa apresentados pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) permaneceram iguais, independente do sentido do fluxo de calor, portanto, não foi necessária a inserção de funções que representem sua variação ao longo do tempo no programa *Quickfield*.

Nas simulações em regime transiente, as condições de temperatura adotadas refletem um ganho e perda de calor do ambiente interno, considerando uma situação hipotética com alta amplitude térmica. A temperatura interna adotada foi de 21°C, representando um ambiente interno condicionado artificialmente. Para simular flutuações da temperatura externa, adotou-se uma equação senoidal em função do tempo, Equação (9). Como o programa *Quickfield* calcula o tempo em segundos e a função seno em graus foi necessário dividir o valor de 90° (referente ao valor máximo) por 21600 segundos (equivalente a seis horas, que corresponde aos quadrantes da função), resultando no valor de $4,1667 \times 10^{-3}$. A diferença de temperatura entre os ambientes, denotada pela amplitude (A), e a temperatura interna (T_{int}) foram consideradas como coeficientes.

$$T_{ext}(t) = A \cdot \text{sen}(4,1667 \times 10^{-3} \cdot t) + T_{int} \quad \text{Equação (9)}$$

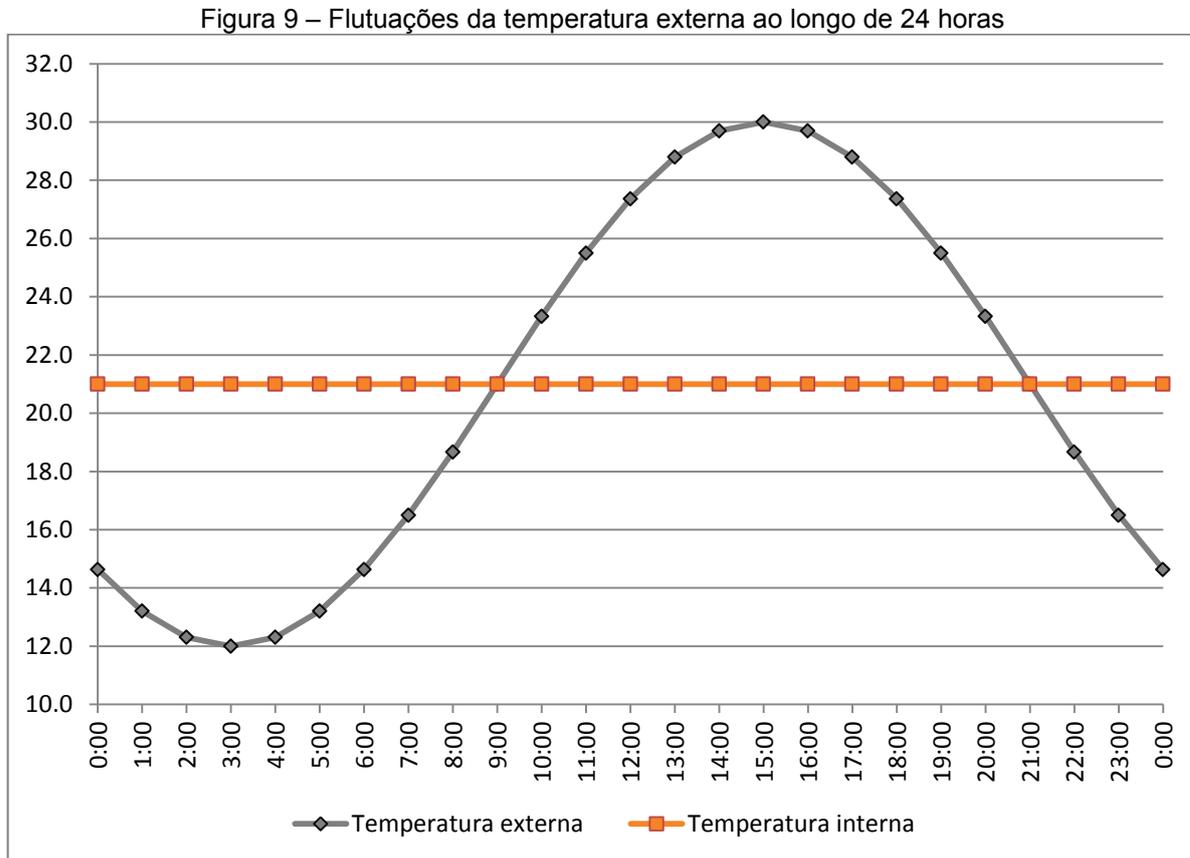
Onde,

A = Amplitude térmica (°C)

t = tempo (s)

T_{int} = Temperatura do ambiente interno (°C)

A amplitude (A) considerada nas simulações foi de 9°C , e a temperatura interna (T_{int}) foi de 21°C . Para o período de 24 horas de simulação é possível obter as flutuações de temperatura externa, como apresentado na Figura 9.



Através da Figura 9 é possível verificar o comportamento das flutuações da temperatura externa ao longo de um dia nas simulações realizadas no programa *Quickfield*. A menor temperatura é registrada às 3 horas, tendo valor mínimo de 12°C , enquanto a máxima temperatura ocorre às 15 horas, com o valor de 30°C . Portanto, a amplitude térmica, definida pela variação da temperatura externa máxima e mínima, foi de 18°C . Por fim, observa-se o registro de temperaturas iguais entre os ambientes interno e externo às 9 horas e às 21 horas, com 21°C . A determinação da temperatura externa fornece um parâmetro importante para a determinação do atraso térmico, verificando-se o intervalo de tempo entre a maior temperatura na superfície externa, e a maior temperatura na superfície interna do modelo.

3.4.1 Análise de Pontes Térmicas no Programa *Quickfield*

Para a análise da influência de pontes térmicas no comportamento termodinâmico de um modelo equivalente em comparação ao um modelo de referência, analisou-se os dados de saída de uma simulação em regime transiente no programa *Quickfield*.

O componente construtivo adotado foi o bloco de concreto 9x19x39 cm com argamassa interna e externa de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm, correspondente ao ID 20, presente no Apêndice A. A escolha do modelo foi realizada com base na caracterização do componente construtivo. O material utilizado na composição do bloco é o concreto, o qual apresenta alta condutividade térmica em relação aos outros materiais presentes neste componente de parede. Além disso, a menor espessura do componente em relação a outros blocos semelhantes permite trocas de calor entre os ambientes em um menor intervalo de tempo, devido a sua menor inércia térmica. Este fator tem influência sobre as pontes térmicas, uma vez que tem a capacidade de armazenar o calor no interior do componente durante um determinado intervalo de tempo, liberando-o posteriormente.

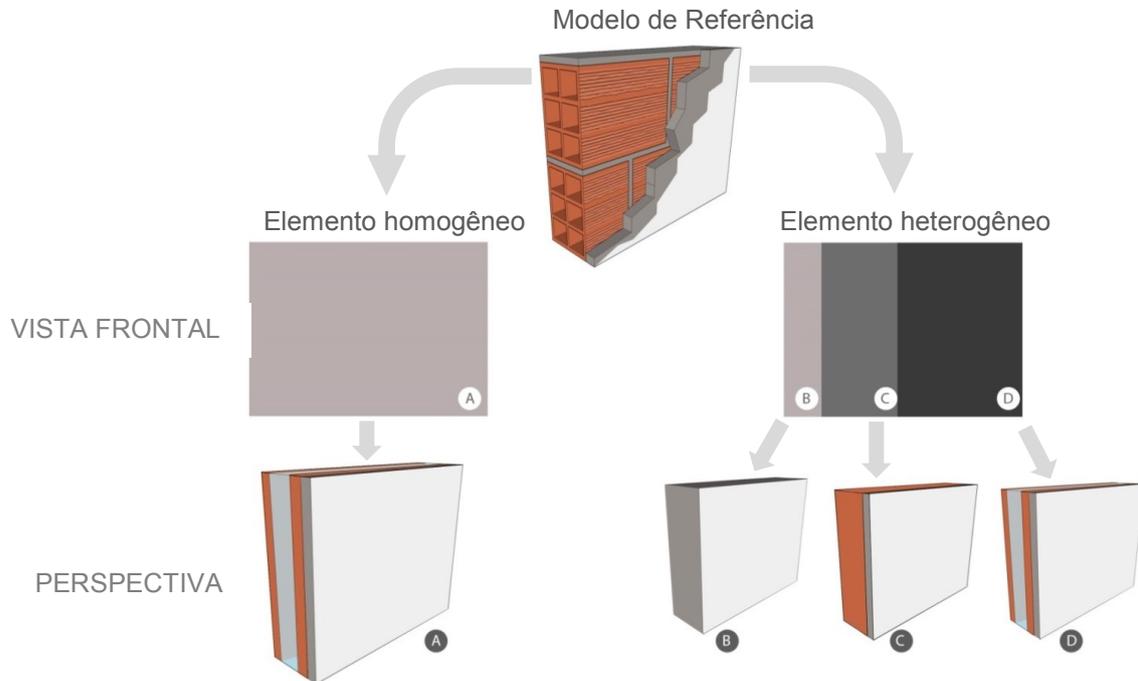
Como parâmetros de avaliação foram definidos o fluxo de calor total, e a temperatura pela superfície interna e externa dos modelos de referência e equivalente. Nestas análises foi possível verificar a influência de pontes térmicas através da comparação do atraso térmico entre os modelos elaborados no programa *Quickfield*, e dos valores máximos de fluxo de calor e temperatura. A determinação do atraso térmico foi realizada analisando o tempo decorrido entre o pico de temperatura da superfície externa e o pico de temperatura da superfície interna.

3.5 ANÁLISE DA TROCA DE CALOR NO PROGRAMA *ENERGYPLUS*

O programa *EnergyPlus* permite que a modelagem computacional de elementos construtivos seja realizada de duas maneiras: considerando um modelo de um elemento construtivo com superfícies homogêneas; e um modelo de um elemento construtivo com superfícies heterogêneas. A Figura 10 apresenta um exemplo de um bloco de cerâmica modelado através de um elemento homogêneo, e através de um elemento heterogêneo. Neste último caso, o modelo é composto por

diversos subelementos que representam as diversas seções transversais do componente construtivo de referência.

Figura 10 – Métodos de modelagem de um componente construtivo no *Energyplus*



Para a modelagem de elemento construtivo homogêneo, deve-se seguir a abordagem descrita no método proposto neste trabalho, através da elaboração de um modelo equivalente, com camadas dos materiais dispostas de forma paralela em toda a superfície do elemento, conforme o Item (A) da Figura 10.

Na modelagem de um elemento construtivo através do desenvolvimento de um modelo heterogêneo, cada parte, ou subelemento, representa de forma proporcional ao componente de referência, as seções transversais com camadas paralelas entre si, como o Item (B), Item (C) e Item (D) da Figura 10. Neste método, a presença de materiais sólidos e com alta condutividade térmica na composição do elemento heterogêneo, tende a criar regiões com maior fluxo de calor, originando as pontes térmicas.

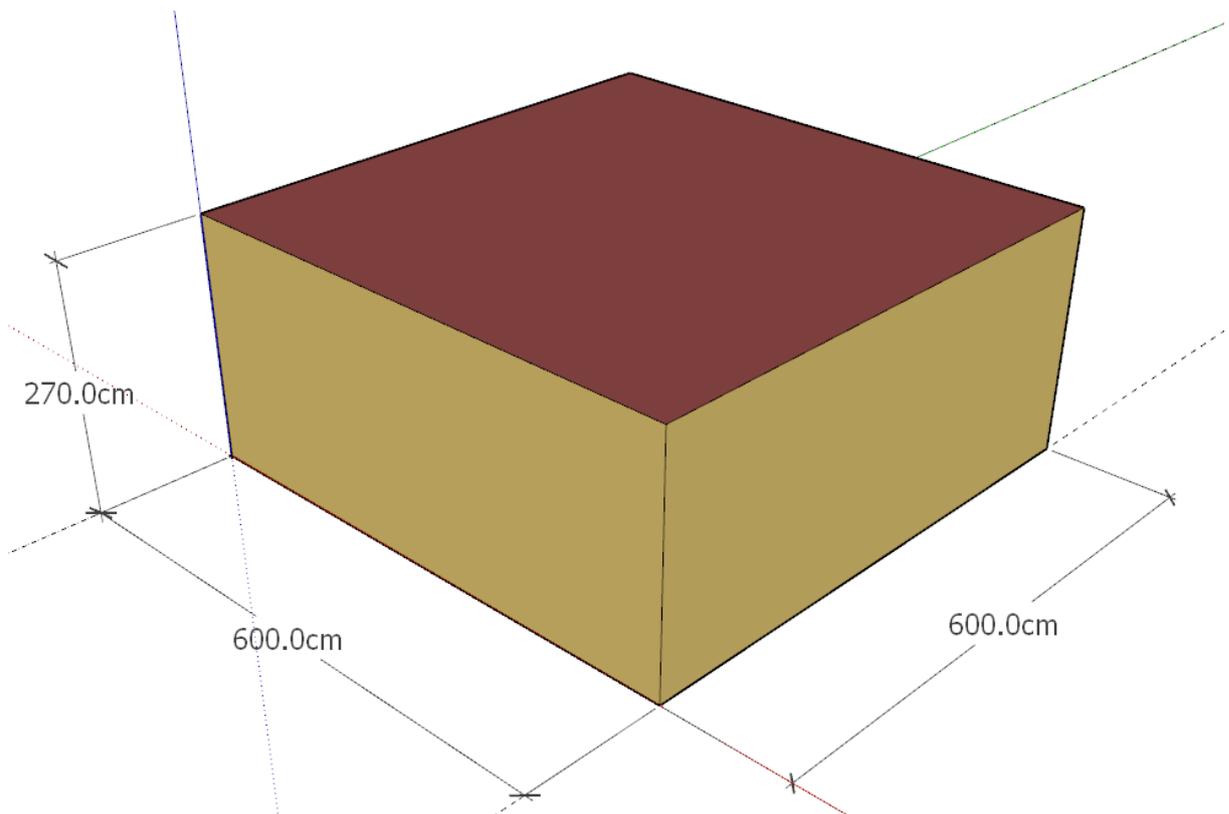
Para verificar a influência do método de modelagem de elementos construtivos no programa *EnergyPlus* foram realizadas simulações para uma edificação hipotética para dias extremos de verão e inverno, e para uma simulação

anual, em três cidades brasileiras. Como parâmetro de avaliação, foram analisadas as taxas de troca de calor por condução e as cargas de aquecimento e resfriamento.

3.5.1 Modelagem da Edificação

A edificação simulada no programa *EnergyPlus* é composta por apenas uma zona térmica com dimensões de 6 m x 6 m, pé direito de 2,70 m, e sem a presença de aberturas ou paredes internas, como é apresentado na Figura 11. A modelagem da edificação e a inserção dos componentes construtivos foi realizada através da utilização do programa *SketchUp* (TRIMBLE, 2018), em conjunto com o *plugin Euclid* (BIG LADDER, 2018).

Figura 11 – Geometria do caso base modelado no programa Sketchup



Para as simulações realizadas no programa *EnergyPlus* foi considerada apenas uma parede para a troca de calor, mantendo adiabáticas as demais superfícies. A orientação da parede da edificação analisada foi determinada para três situações: orientada para a direção que apresentou maior incidência de

radiação solar direta nas simulações de dia extremo de verão; orientada para a direção que apresentou menor incidência de radiação solar direta para a simulação realizada para o dia extremo de inverno; e orientada para o norte nas simulações anuais. Com base nos resultados das simulações de dias extremos, pretende-se analisar a influência da radiação solar direta incidente sobre a superfície, e a diferença de temperatura entre os ambientes no comportamento termodinâmico dos elementos.

A fim de se avaliar a influência do método de modelagem na concepção de modelos computacionais no programa *EnergyPlus*, optou-se por não considerar os parâmetros relacionados às rotinas de ocupação, operação de aberturas, sistemas de iluminação e equipamentos, infiltrações de ar e transferência de calor através do solo. Contudo, o modelo considerou um ambiente condicionado artificialmente com temperatura interna de 24°C para o dia extremo de verão, e 18°C para o dia extremo de inverno. Na simulação anual, os valores de *set point* de aquecimento e resfriamento configurados para operação do sistema de condicionamento de ar foi de 18°C e 24°C, respectivamente.

Para a modelagem do elemento construtivo analisado no programa *EnergyPlus*, optou-se também pela utilização do bloco 9x19x39 cm com argamassa externa e interna de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm (ID 20). A escolha do mesmo componente construtivo utilizado nas simulações no programa *Quickfield* permite realizar uma comparação do comportamento termodinâmico entre os programas, auxiliando na análise da influência de pontes térmicas através dos modelos.

Os valores de absorvância solar e emissividade foram mantidos na configuração padrão do programa, em 0,70 e 0,90, respectivamente. Segundo o Anexo V do RAC (INMETRO, 2013), uma absorvância de 0,70 é semelhante a tintas na cor concreto. Ainda, de acordo com um estudo de Yao e Yan (2011), que investiga a influência do coeficiente de fator solar de paredes externas no consumo de energético da edificação, os revestimentos argamassados a base de cimento apresentam coeficiente de absorvância solar de 0,70. Assim, concluiu-se que a determinação deste valor foi condizente com a proposta do modelo desenvolvido.

3.5.2 Simulação Computacional

Para as simulações no programa *EnergyPlus* foram considerados três diferentes climas, considerando o dia extremo de verão e inverno, e anual. As cidades escolhidas são: São João do Piauí (PI), Urubici (SC) e São Paulo (SP), determinadas com base nos dados de temperatura e radiação solar obtidos através dos arquivos climáticos INMET 2016 (INMET, 2018). As cidades escolhidas estão localizadas na zona 1 (Urubici) caracterizada por temperaturas baixas ao longo do ano; zona 7 (São João do Piauí), apresentando altas temperaturas e radiação solar; e zona 3 (São Paulo) com temperaturas amenas e estações mais definidas, de acordo com as zonas bioclimáticas apresentadas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005c).

Para a simulação de dia extremo de verão para a cidade de São João do Piauí (PI), a parede que mais recebeu incidência de radiação solar direta foi a parede leste. Geralmente a orientação Oeste apresenta maior incidência da radiação solar, contudo, no arquivo climático utilizado foi considerada a nebulosidade, fato este que pode ter contribuído para que a parede leste apresentasse resultados maiores. Para a simulação de dia extremo de inverno para a cidade de Urubici (SC) foi considerada a parede sul, que não apresentou incidência de radiação solar direta. Para a cidade de São Paulo (SP) foi considerada a parede norte para a simulação anual.

A partir dos resultados, foram analisados os parâmetros de entrada para aferir se o método de modelagem altera de forma significativa as trocas de calor e o desempenho energético de elementos construtivos. Como parâmetro de avaliação das simulações de dia extremo de verão e inverno foi definido a taxa de troca de calor por condução através da superfície interna do elemento. Nos elementos heterogêneos, este valor foi obtido pela média ponderada da área de cada superfície homogênea. Os resultados foram analisados para cada intervalo de hora, sendo também analisados os dados de saída relacionados à diferença de temperatura externa e interna, e a radiação solar direta incidente sobre a superfície. Para a simulação anual, foi considerado como parâmetro de avaliação as cargas térmicas de aquecimento e resfriamento mensais, e a carga total em kWh de aquecimento e resfriamento. Para avaliar a influência de pontes térmicas decorrentes do método de modelagem de elementos construtivos foram comparados os parâmetros de avaliação citados anteriormente.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas no programa *Quickfield* para determinação do modelo de referência e do modelo equivalente, e para a verificação da influência de pontes térmicas no comportamento termoenergético destes componentes no programa *Quickfield* e *EnergyPlus*.

4.1 PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS COMPONENTES CONSTRUTIVOS

A determinação das propriedades térmicas dos modelos simulados em regime permanente no programa *Quickfield* estão apresentadas na Tabela 3, Tabela 4 e Tabela 5. A comparação entre o modelo de referência, o modelo equivalente e os valores obtidos pelo método de cálculo apresentado na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), baseiam-se nos resultados obtidos para a capacidade térmica total e transmitância térmica total de paredes, pisos e coberturas.

Para o cálculo da capacidade térmica total dos componentes construtivos de referência e equivalente foi utilizado o procedimento de cálculo descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), assim, os valores apresentados para esta propriedade térmica são os mesmos para os todos os modelos.

Tabela 3 – Propriedades térmicas de componentes construtivos de paredes

(continua)

ID	Transmitância térmica total (W/m ² .°C)			Capacidade térmica total (kJ/m ² .°C)		
	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente
1	2,99	2,93	2,93	42	42	42
2	2,43	2,39	2,39	152	152	152
3	2,19	2,21	2,21	115	115	115
4	2,56	2,55	2,55	99	99	99
5	2,61	2,72	2,72	98	98	98
6	0,65	0,75	0,75	122	122	122
7	0,31	0,32	0,32	134	134	134
8	1,63	1,61	1,61	121	121	121
9	0,40	0,41	0,41	125	125	125
10	2,36	2,39	2,39	210	210	210
11	1,25	1,27	1,27	195	195	195
12	0,63	0,68	0,68	199	199	199
13	2,37	2,35	2,35	56	56	56
14	2,39	2,37	2,37	151	151	151

Tabela 3 – Propriedades térmicas de componentes construtivos de paredes
(conclusão)

ID	Transmitância térmica total (W/m ² .°C)			Capacidade térmica total (kJ/m ² .°C)		
	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente
15	2,24	2,13	2,13	155	155	155
16	1,85	1,83	1,83	161	161	161
17	1,70	1,68	1,68	123	123	123
18	1,93	1,80	1,80	108	108	108
19	1,96	2,02	2,02	106	106	106
20	2,74	2,79	2,79	183	183	183
21	2,47	2,53	2,53	147	147	147
22	2,89	2,90	2,90	133	133	133
23	2,95	3,01	3,01	131	131	131
24	2,67	2,68	2,68	245	245	245
25	2,42	2,44	2,44	208	208	208
26	2,81	2,78	2,78	193	193	193
27	2,86	2,87	2,87	192	192	192
28	0,69	0,79	0,79	196	196	196
29	0,32	0,32	0,32	200	200	200
30	1,81	1,75	1,75	214	214	214
31	0,42	0,42	0,42	218	218	218
32	2,61	2,62	2,62	302	302	302
33	1,42	1,40	1,40	383	383	383
34	0,69	0,70	0,70	387	387	387

Analisando os resultados obtidos para a transmitância térmica total dos componentes construtivos de paredes, pode-se observar uma boa concordância com os valores calculados através do método apresentado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). A maior discrepância entre todos os modelos analisados foi para o ID 28 (bloco de concreto 14x19x39 cm com camada interna de ar de 5 cm e placa de alumínio composto) com uma diferença de 0,10 W/m².°C. A diferença percentual média em módulo para a comparação entre todos os casos foi de 2%.

Tabela 4 - Propriedades térmicas de componentes construtivos de pisos

ID	Transmitância térmica total (W/m ² .°C)			Capacidade térmica total (kJ/m ² .°C)		
	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente
35	2,95	2,89	2,89	167	167	167
36	2,22	2,35	2,35	278	278	278
37	2,48	2,78	2,78	369	369	369

Para os modelos de pisos e lajes a diferença percentual média para transmitância térmica nos três casos analisados foi de 7%. A maior diferença encontrada entre os modelos simulados no programa *Quickfield* e calculados pelo método descrito na NBR 15220-2 (ABNT, 2005c) foi verificada para o ID 37, referente à laje protendida alveolar, com $0,3 \text{ W/m}^2\cdot\text{°C}$.

A partir da Tabela 5 é possível observar duas situações para os resultados de transmitância térmica obtidos para coberturas em simulações no período de verão. Na primeira, puderam ser comparados os valores entre os modelos de referência e equivalentes. A diferença básica entre os dois componentes esta relacionada à modelagem de um ático com espessura constante, como adotado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), e na modelagem de uma cobertura com telhado inclinado.

Tabela 5 - Propriedades térmicas de componentes construtivos de coberturas

ID	Transmitância térmica total ($\text{W/m}^2\cdot\text{°C}$)			Capacidade térmica total ($\text{kJ/m}^2\cdot\text{°C}$)		
	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente	NBR 15220	Modelo de referência	Modelo equivalente
38	2,05	2,24	2,05	238	238	238
39	1,79	1,89	1,77	185	185	185
40	1,75	1,86	1,75	21	21	21
41	2,02	2,18	2,02	26	26	26
42	1,94	2,08	1,94	37	37	37
43	2,06	2,24	2,06	233	233	233
44	1,79	1,89	1,77	180	180	180
45	1,76	1,86	1,76	16	16	16
46	2,02	2,18	2,02	21	21	21
47	1,95	2,09	1,95	32	32	32
48	1,55	1,61	1,61	237	237	237
49	1,75	1,93	1,81	268	268	268
50	1,82	1,92	1,80	169	169	169
51	0,55	0,84	0,55	230	230	230
52	0,53	0,77	0,53	176	176	176
53	0,68	0,88	0,68	229	229	229
54	0,65	0,80	0,64	179	179	179
55	2,18	2,18	2,18	363	363	363
56	1,88	1,86	1,86	310	310	310
57	0,96	0,96	0,96	791	791	791
58	0,90	0,90	0,90	738	738	738

Nesta primeira situação verifica-se boa concordância entre os resultados para 17 casos de coberturas analisados, com diferença percentual abaixo de 9%. Para cinco destes casos, nenhuma diferença entre o modelo de referência e o modelo equivalente foi observada. Nos outros quatro modelos comparados, houve uma diferença percentual acima de 20%. A maior discrepância encontrada foi para o modelo ID 51 (Cobertura com telha metálica sanduíche de poliuretano de 4 cm com laje maciça de concreto), com diferença de 0,29 W/m².°C. No geral, a diferença média percentual em módulo foi de 9%.

Na segunda análise foram comparados os valores entre o modelo equivalente e os valores obtidos pelo método analítico, descrito pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). Para estes dois casos, a modelagem do ático no programa *Quickfield* através das diretrizes apresentadas pela norma em questão foram iguais. Portanto, a diferença entre os dois métodos é verificada apenas na presença de lajes que possuam câmara de ar, como as lajes pré-moldadas de lajotas cerâmicas. Desta forma, os resultados comparativos apresentaram pouca variação entre si. A diferença média percentual em módulo para todos os modelos simulados foi de 1%. A maior diferença foi para o ID 48 (cobertura com telha de fibrocimento e laje nervurada 50x50x25,5 cm com câmara de ar) com variação de 4%, evidenciando que a diferença encontrada está relacionada a presença da laje nervurada que apresentou a maior diferença nos valores de transmitância térmica entre o pisos.

Um dos fatores relacionados a estas diferenças encontradas para as lajes nervuradas pode ser explicado pela grande dimensão da câmara de ar do componente construtivo. Nas simulações realizadas no programa *Quickfield*, a resistência da câmara de ar obtida pela ferramenta computacional indicou valores menores do que o apresentado pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c), desta forma, a transmitância térmica pelos modelos computacionais resultou em valores maiores.

4.2 BIBLIOTECA DE MODELOS EQUIVALENTES DE COMPONENTES CONSTRUTIVOS

A elaboração da biblioteca de componentes construtivos de paredes, pisos e coberturas foi realizada pela compilação dos dados obtidos através da aplicação do método proposto neste trabalho.

O Apêndice B apresenta a caracterização de todos os modelos equivalentes simulados no programa *Quickfield* de forma detalhada, descrevendo as especificações geométricas, e as propriedades térmicas de cada camada que compõe o componente construtivo.

Através da compilação destes dados em um arquivo *.idf*, os modelos equivalentes foram inseridos no programa *EnergyPlus*. Além disso, a determinação de um arquivo *.idf* permite a disponibilização desta biblioteca para usuários, otimizando, e minimizando os erros no processo de modelagem.

4.3 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PONTES TÉRMICAS NO PROGRAMA QUICKFIELD

Com o objetivo de verificar o comportamento termodinâmico de modelos equivalentes em relação ao seu modelo de referência, foi realizada uma simulação em regime transiente no programa *Quickfield* considerando um caso desfavorável.

O modelo utilizado para a análise termoenergética foi o bloco de concreto 9x19x39 cm com argamassa interna e externa de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm apresentado no item 3.4. A escolha deste componente leva em consideração a maior tendência para o surgimento de pontes térmicas, devido à presença de camadas de concreto e argamassa que possuem valores de condutividade térmica elevada em relação às câmaras de ar, com 1,75 W/m.°C e 1,15 W/m.°C, respectivamente.

Para verificar a influência de pontes térmicas foram utilizados como parâmetro de avaliação os fluxos de calor total, e a temperatura através da superfície externa e interna do modelo de referência e do modelo equivalente. Os resultados das simulações foram computados em um intervalo de 15 minutos para um período de 24 horas.

A Figura 12 apresenta o gráfico plotado a partir dos resultados obtidos de fluxo de calor total pela superfície interna e externa do modelo de referência. A Figura 13 apresenta estes mesmos parâmetros para o modelo equivalente.

Figura 12 – Fluxo de calor total através da superfície externa

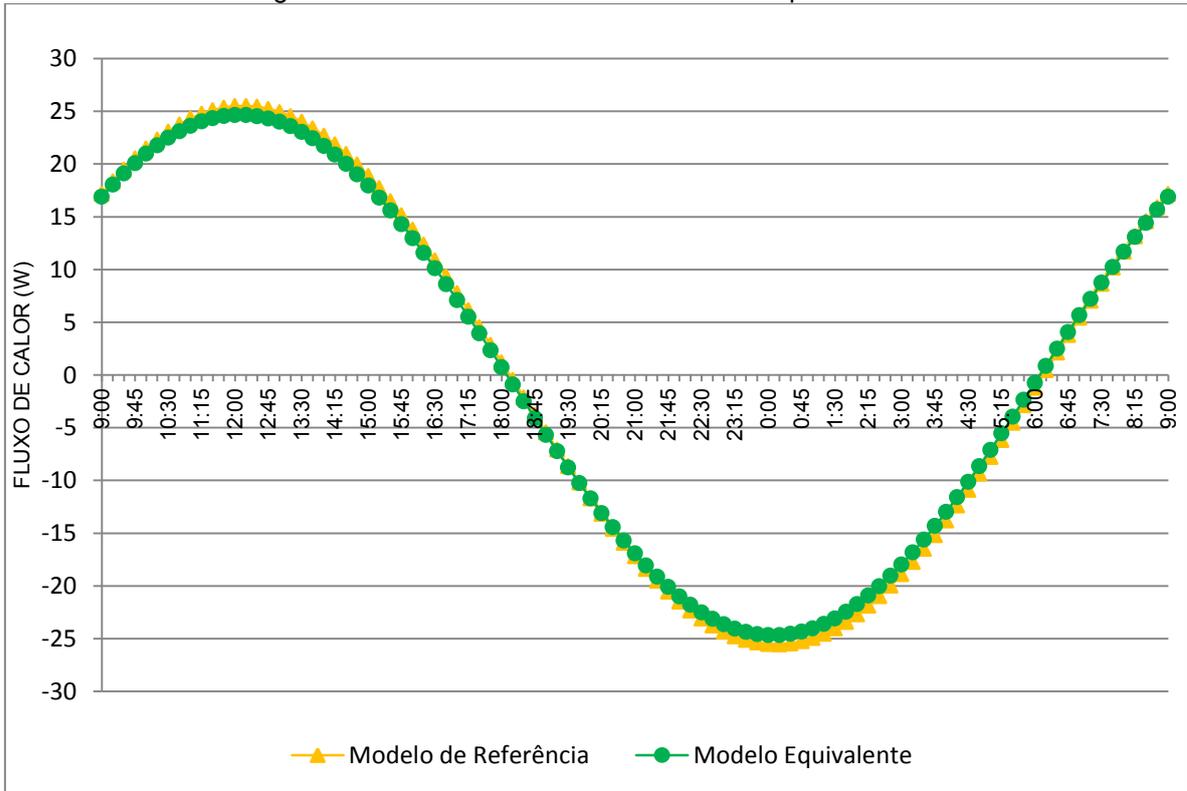
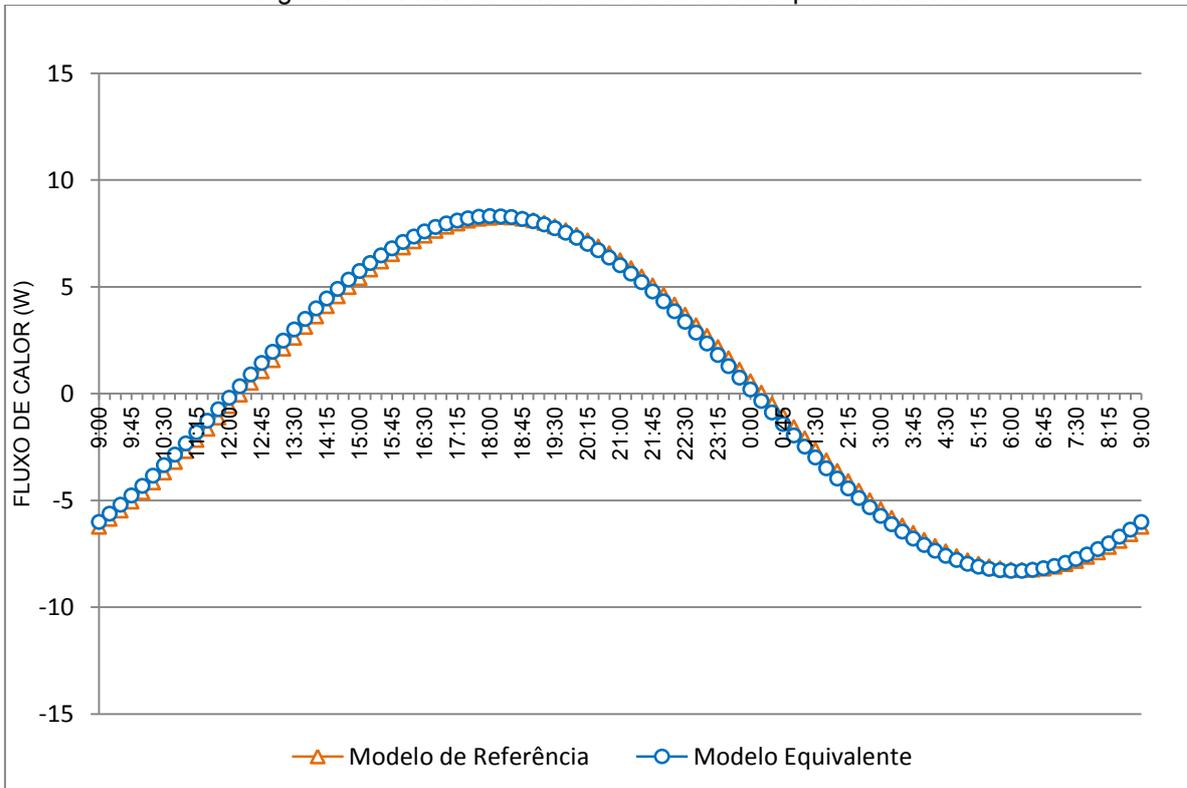


Figura 13 – Fluxo de calor total através da superfície interna



Analisando a Figura 12 e a Figura 13 é possível verificar que a diferença no comportamento termodinâmico entre o modelo de referência e o modelo equivalente para o fluxo de calor através das superfícies obtiveram boa concordância. No modelo de referência, o maior valor de fluxo de calor através da superfície externa, ocorre aproximadamente às 12h15 com valor máximo de 25,5 W. Para o modelo equivalente o pico máximo do fluxo de calor é verificado às 12h00, com valor aproximado de 24,7W, ocorrendo 15 minutos antes e 3% (0,8 W) menor na comparação com o modelo de referência. Para a superfície interna, observa-se uma diferença ainda menor, de 0,04 W. A amplitude do fluxo de calor no componente equivalente, com valor máximo de 8,30 W é verificada às 18h00. Já o valor máximo para o modelo de referência foi de 8,26 W às 18h15.

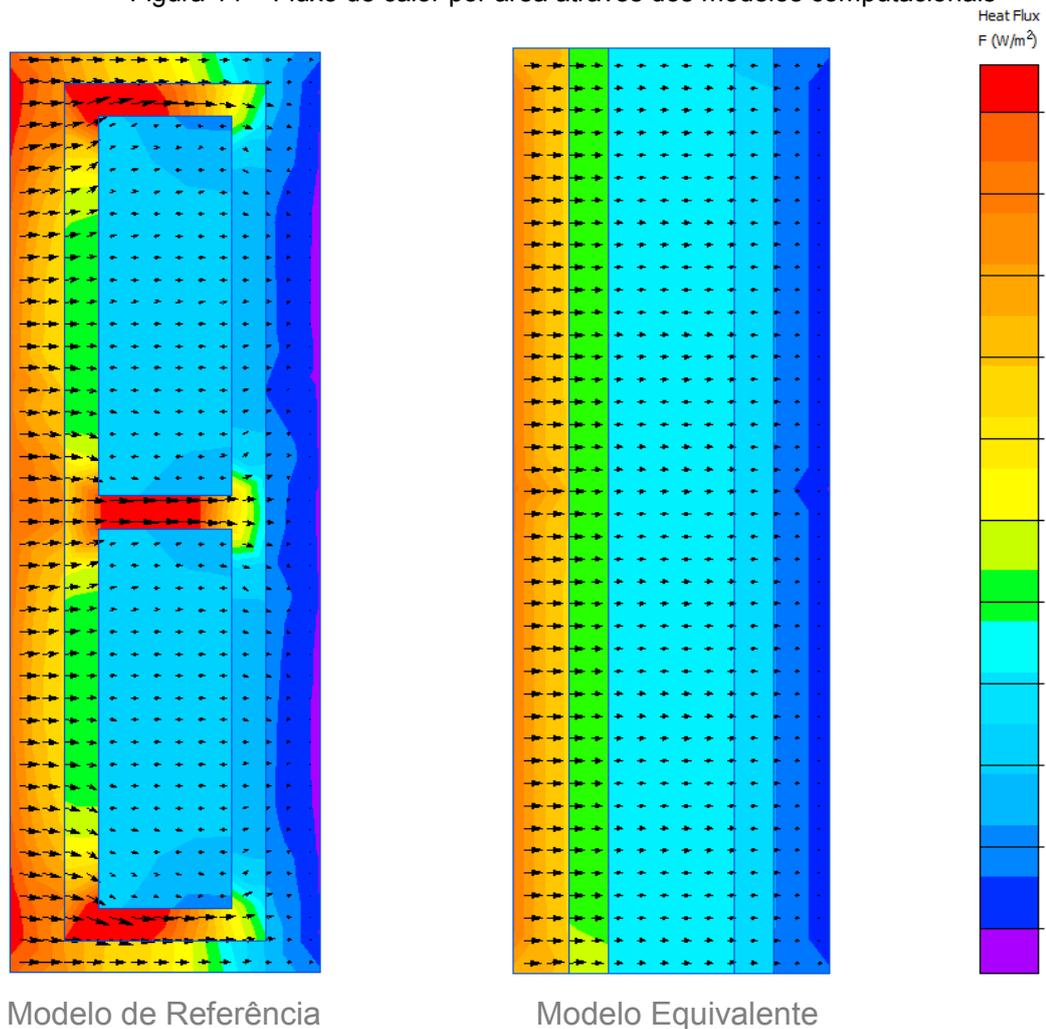
Nota-se que os valores negativos apresentados indicam que o fluxo de calor ocorre no sentido inverso, para fora da edificação. Ainda, verifica-se que os valores negativos máximos são obtidos 12 horas após os picos máximos positivos, devido a variação da temperatura externa ser simétrica em relação a temperatura interna.

Dos resultados obtidos, a variação média em módulo do fluxo de calor através da superfície externa foi de 0,61 W/m² com diferença percentual média absoluta de 7%. Para a superfície interna, a variação média foi de 0,25 W/m², com diferença percentual média em módulo de 14%. Esta maior diferença percentual em relação à superfície externa pode ser explicada em parte, pelo fato de a superfície interna apresentar fluxos de calor menores, sendo mais sensíveis as diferenças percentuais entre os modelos.

No geral, o fluxo de calor através do modelo de referência ocorreu com valores máximos e mínimos maiores em comparação ao modelo equivalente, contudo, com pequena diferença. Este comportamento indica que, a composição do modelo em camadas em série diminuiu de forma pouco significativa a quantidade de calor através do componente, devido principalmente a presença de uma câmara de paralela no interior do modelo.

A Figura 14 apresenta o comportamento do fluxo de calor através do modelo de referência e do modelo equivalente obtido através das simulações em regime transiente no programa *Quickfield*. O fluxo de calor ocorre às 12h00, período em que ocorreu o pico máximo, sendo representado por vetores indicando a direção, e um gradiente de cores, representando a intensidade.

Figura 14 – Fluxo de calor por área através dos modelos computacionais



Analisando a Figura 14 é possível verificar a influência de pontes térmicas nas trocas de calor entre os modelos. No modelo de referência, observa-se que o fluxo de calor ocorre em duas dimensões, esta mudança de direção calor é explicada pela presença de materiais com propriedades térmicas diferentes, como a condutividade térmica. As paredes horizontais de concreto do bloco, que interligam os ambientes, recebem, portanto, um maior fluxo de calor, denotado pela cor avermelhada. Já no modelo equivalente, observa-se que o fluxo de calor é unidirecional, devido à disposição paralela das camadas dos materiais. Como resultado, observa-se um fluxo de calor com intensidade máxima menor, caracterizada pela cor laranja, e distribuído de forma homogênea ao longo do componente.

Para analisar as variações da temperatura através da superfície externa e interna dos modelos, foram gerados os gráficos apresentados na Figura 15 e na Figura 16

Figura 15 – Variação da temperatura média das superfícies do modelo de referência

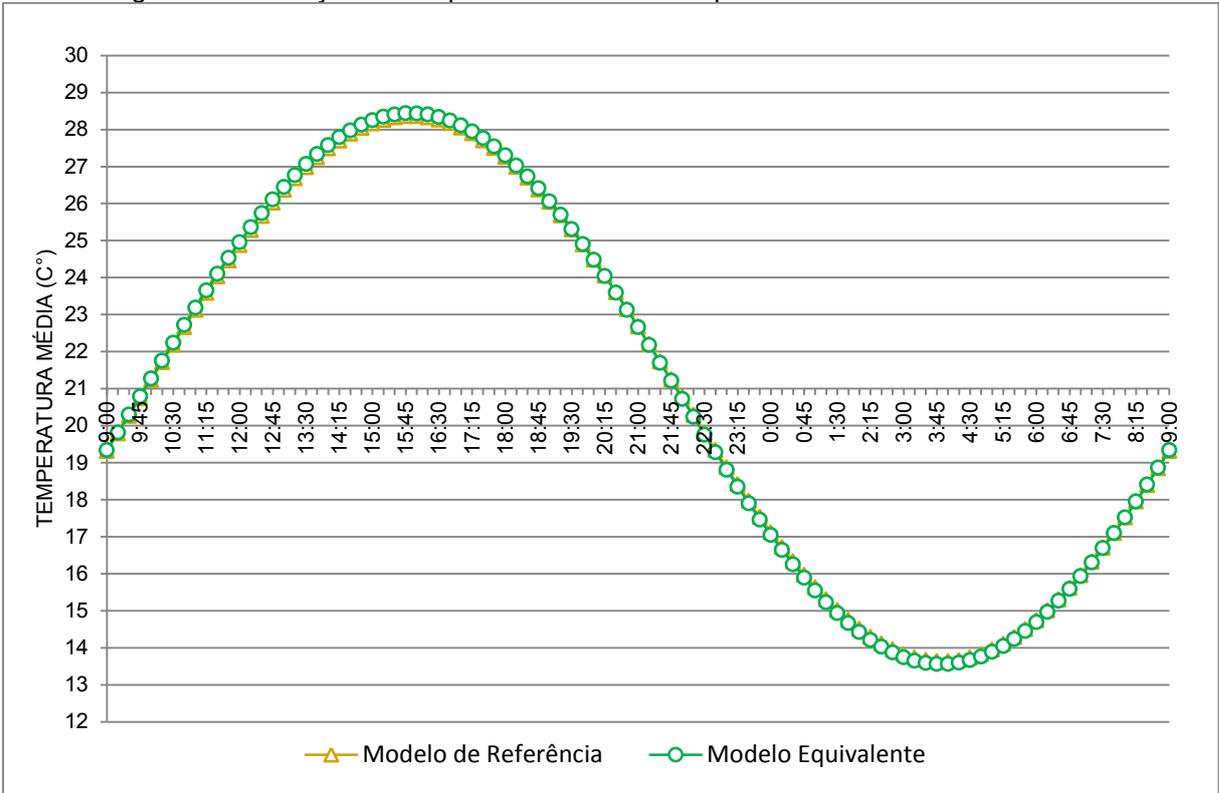
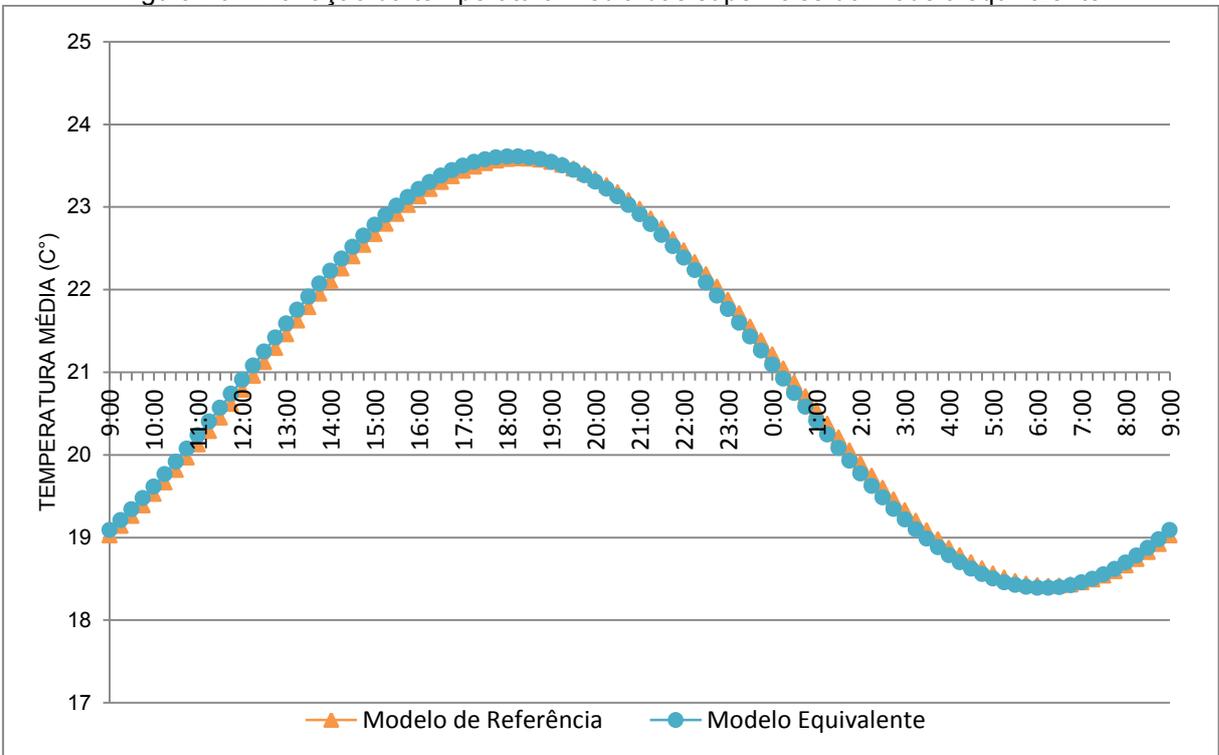


Figura 16 – Variação da temperatura média das superfícies do modelo equivalente



A partir da comparação dos resultados plotados para a temperatura média da superfície externa e interna dos modelos é possível verificar que houve boa aproximação dos valores. Para a superfície externa, a temperatura máxima para o modelo de referência foi de 28,4°C, mesmo valor encontrado para o modelo equivalente. O intervalo de tempo para ocorrência do valor máximo de temperatura da superfície externa entre os dois modelos também foi próximo, para o modelo de referência, a temperatura máxima foi registrada às 16h00, 15 minutos após o modelo equivalente, mesmo padrão verificado para o fluxo de calor. Para a superfície interna, os valores obtidos para a temperatura máxima foram os mesmos para ambos os casos simulados, ocorrendo às 18h15, com 23,6°C.

A variação média absoluta para a superfície externa foi de 0,06°C, representando uma diferença percentual de 0,3%. Para a superfície interna os valores foram de 0,08°C com variação percentual média de 0,4%. Estes resultados indicam que houve pouca influência de pontes térmicas no comportamento térmico do modelo de referência em relação ao modelo equivalente.

Além dos dados comparativos de temperatura média superficial entre os modelos simulados, a Figura 15 e a Figura 16 possibilitaram ainda a determinação do atraso térmico destes componentes. Através do intervalo de tempo entre os picos máximos de temperatura média da superfície interna e externa, foram determinados os atrasos térmicos dos modelos de referência e equivalente. A variação de tempo entre o atraso térmico entre os dois modelos foi de 15 minutos. O modelo de referência apresentou um atraso térmico de 2h15, enquanto o modelo equivalente obteve um atraso térmico de 2h30.

Como esperado, o atraso térmico do modelo de referência ocorreu em um intervalo de tempo menor, evidenciando a presença de pontes térmicas. Contudo, esta pequena diferença apresentada corrobora para a avaliação de que a presença de pontes térmicas influenciou de maneira pouco significativa no comportamento térmico do componente analisado no programa *Quickfield*, uma vez que o intervalo de tempo entre os registros dos resultados foi de 15 minutos.

Cabe ressaltar que, na análise termoenergética realizada no programa *Quickfield* foi considerado apenas a variação da temperatura interna e externa do ambiente, sendo este um dos fatores que contribuem para o surgimento de pontes térmicas, mas não o único.

4.4 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE PONTES NO PROGRAMA *ENERGYPLUS*

Como apresentado no item 3.5 do método descrito neste trabalho, a modelagem de componentes construtivos no programa *EnergyPlus* pode ser realizada de duas maneiras: considerando o elemento construtivo como uma superfície homogênea; ou como uma superfície heterogênea.

Para analisar a influência do método de modelagem no programa *EnergyPlus* foi escolhido o bloco de concreto de 9x19x39 cm, com argamassa interna e externa de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm, conforme exemplificado no item 4.2. Nesta etapa, considerou-se também a absorvância solar e emissividade da parede, definidas como 0,70 e 0,90, respectivamente.

A composição do elemento homogêneo da parede de blocos de concreto foi obtida do Apêndice B, relativa ao ID 20 (bloco de concreto 9x19x39 cm com argamassa interna e externa de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm). Como a parede é homogênea em toda sua extensão, não foi necessária a divisão em subelementos, sendo denotada por uma única superfície (A).

A determinação das dimensões de cada área das superfícies que compõe o elemento heterogêneo foi obtida de forma proporcional às seções homogêneas presentes no componente construtivo do modelo de referência. O modelo analisado foi dividido em três superfícies (B, C e D), que representam os subelementos homogêneos do componente.

A Tabela 6 e a Figura 17 apresentam a caracterização do elemento construtivo homogêneo, e a Tabela 7 e a Figura 18 apresentam a caracterização do elemento construtivo heterogêneo, modelados no programa *EnergyPlus*.

Abaixo são listados os significados dos itens presentes na Tabela 6 e na Tabela 7.

Sup. - Superfície

e – espessura (cm)

λ – condutividade térmica (W/m.°C)

c – calor específico (kJ/kg.°C)

ρ – peso específico aparente (kg/m³)

R – Resistência térmica (m².°C/W)

Tabela 6 – Caracterização do componente e do elemento construtivo para a modelagem da superfície homogênea

Bloco de concreto 9x19x39cm com argamassa interna e externa							Superfície Homogênea		
Sup.	Material	e (cm)	λ (W/m.°C)	c (kJ/kg.°C)	ρ (Kg/m ³)	R (m ² .°C/W)	Área (%)	Altura (m)	Largura (m)
	Argamassa	2,50	1,15	1,00	2000	0,022			
	Concreto	1,73	1,75	1,00	2400	0,010			
A	Ar	5,54	0,44	-	-	0,125	100	2,70	6,00
	Concreto	1,73	1,75	1,00	2400	0,010			
	Argamassa	2,50	1,15	1,00	2000	0,022			

Figura 17 – Elemento Homogêneo de uma parede de bloco de concreto 9x19x39 cm

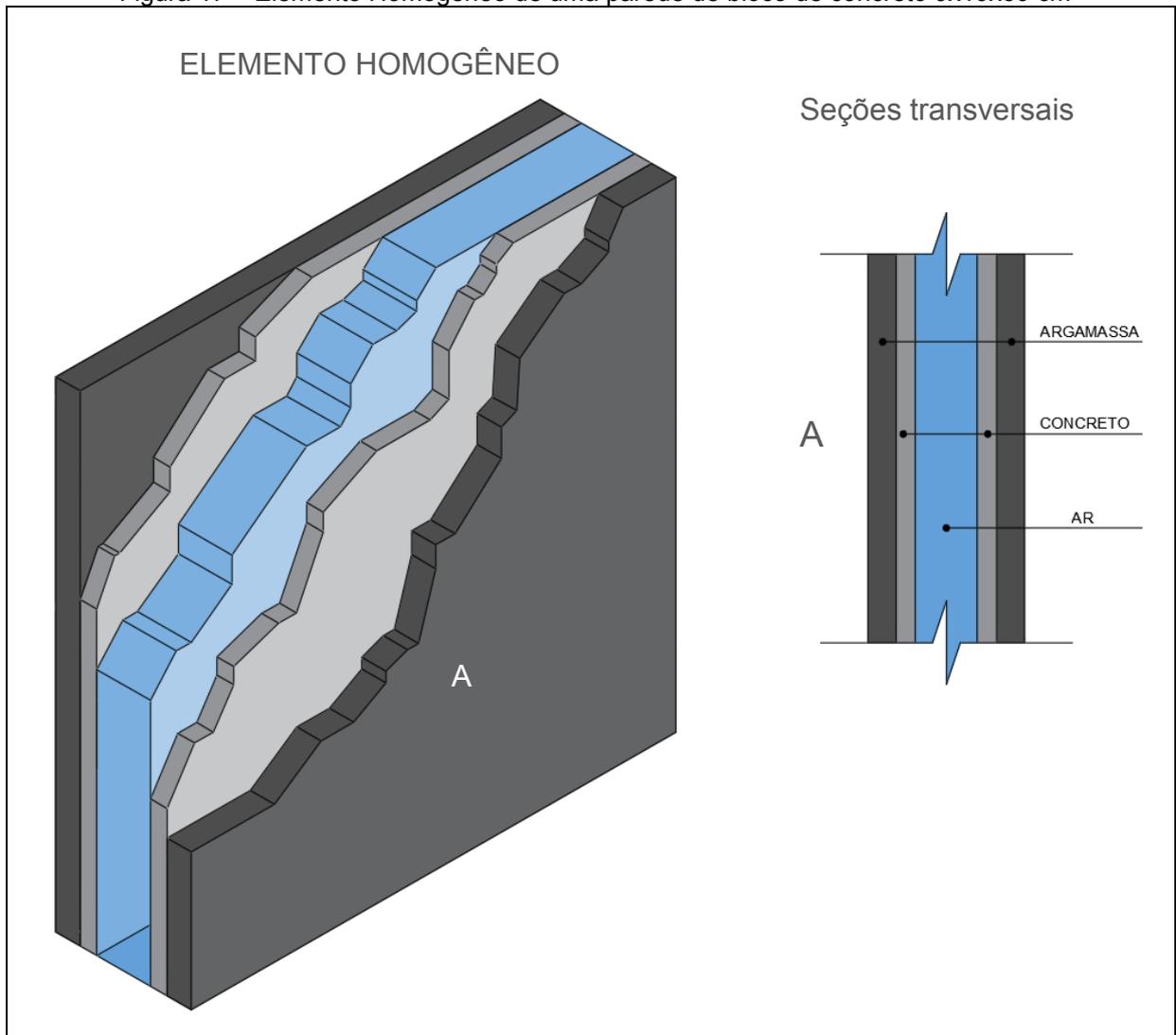
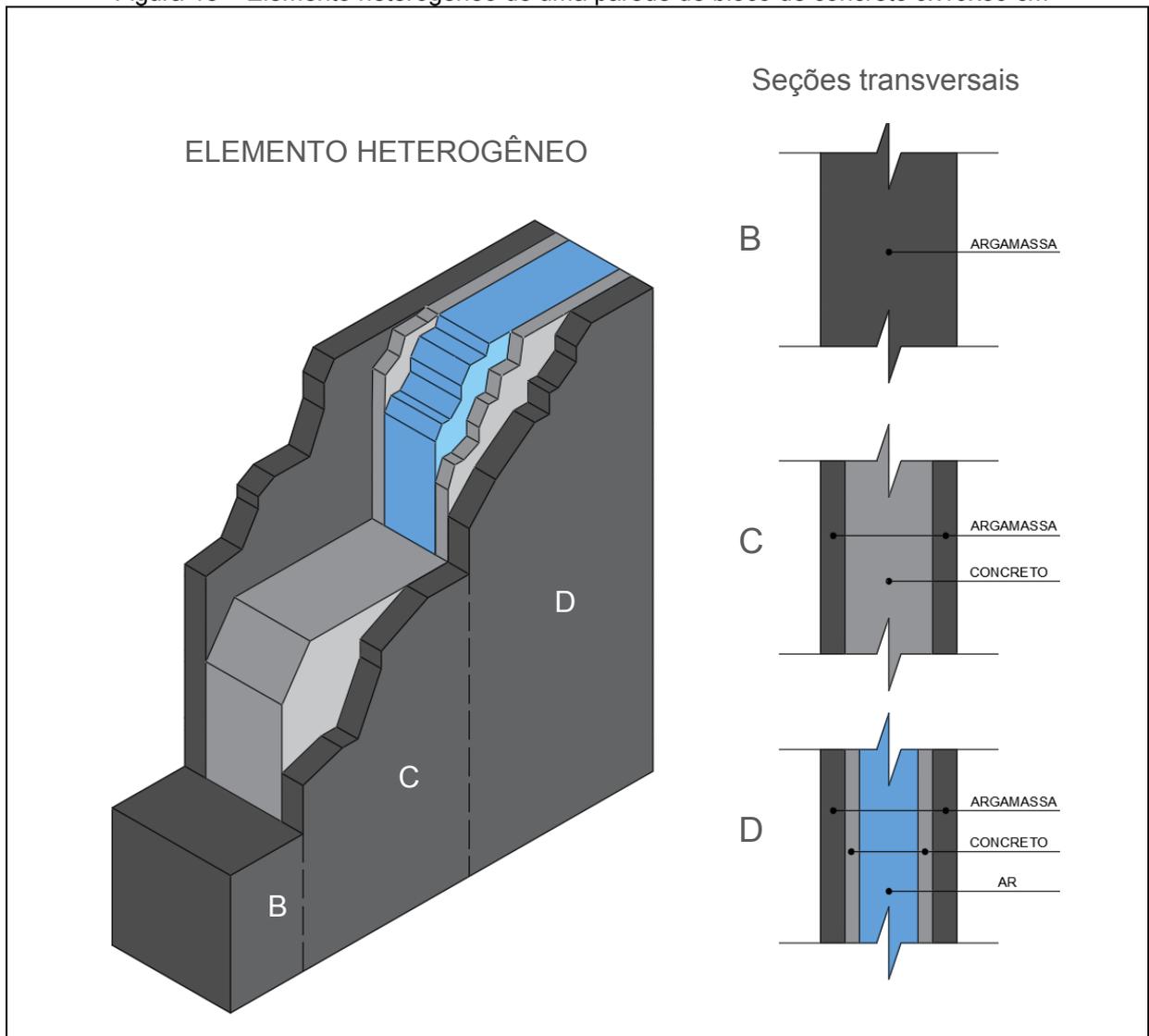


Tabela 7 – Caracterização do componente e do elemento construtivo para a modelagem da superfície heterogênea

Bloco de concreto 9x19x39 cm com argamassa interna e externa							Superfície Heterogênea		
Sup.	Material	e (cm)	λ (W/m.°C)	c (kJ/kg.°C)	ρ (Kg/m ³)	R (m ² .°C/W)	Área (%)	Altura (m)	Largura (m)
B	Argamassa	14	1,15	1,00	2000	0,12	6,88	2,70	0,41
	Argamassa	2,5	1,15	1,00	2000	0,02			
C	Concreto	9,0	1,75	1,00	2400	0,05	10,74	2,70	0,64
	Argamassa	2,5	1,15	1,00	2000	0,02			
	Argamassa	2,5	1,15	1,00	2000	0,02			
D	Ar	6,0	-	-	-	0,18	82,38	2,70	4,94
	Concreto	1,5	1,75	1,00	2400	0,01			
	Argamassa	2,5	1,15	1,00	2000	0,02			
	Argamassa	2,5	1,15	1,00	2000	0,02			

Figura 18 – Elemento heterogêneo de uma parede de bloco de concreto 9x19x39 cm



4.4.1 Parâmetros de Avaliação

A análise da influência de pontes térmicas decorrente do método de modelagem foi verificada por meio da determinação da taxa de transferência de calor através da superfície modelada para o elemento homogêneo e para o elemento heterogêneo, apresentados no item 4.4. Nestas simulações foram utilizados os dias que apresentaram temperaturas extremas para o período de verão e inverno para as cidades de São João do Piauí (PI) e Urubici (SC), respectivamente.

O objetivo desta análise é verificar o comportamento termodinâmico da parede para dois casos extremos: com a parede orientada para o leste em uma situação de temperatura externa e radiação solar direta elevada; e com a parede orientada para o sul, em uma situação de temperatura baixa e com pouca ou nenhuma incidência de radiação solar direta sobre a superfície.

A Tabela 8 apresenta os resultados comparativos para a situação extrema de verão simulados para a cidade de São João do Piauí (PI).

Tabela 8 – Resultados da taxa de condução térmica por área para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São João do Piauí

(continua)

São João do Piauí (PI)			Taxa de transferência de calor por condução por Área (W/m ²)					Variação absoluta
Data: 29/09	TBS, ext (°C)	Rd, inc. (W/m ²)	SUPERFÍCIE HOMOGÊNEA		SUPERFÍCIE HETEROGÊNEA			
Hora			PAREDE LESTE A	PAREDE LESTE B	PAREDE LESTE C	PAREDE LESTE D	PAREDE LESTE Ponderada	
01:00	26,9	0,0	20,43	25,08	28,07	13,25	15,66	4,76
02:00	25,8	0,0	17,16	21,33	24,10	10,27	12,52	4,64
03:00	27,0	0,0	14,03	17,68	20,20	7,50	9,57	4,47
04:00	27,6	0,0	11,32	14,61	16,93	5,36	7,24	4,08
05:00	27,4	0,0	9,19	12,29	14,45	3,92	5,63	3,56
06:00	26,5	42,7	7,51	10,43	12,42	2,95	4,49	3,03
07:00	27,5	140,2	6,54	9,50	11,32	3,05	4,38	2,16
08:00	29,6	275,7	7,46	11,32	13,19	5,87	7,03	0,43
09:00	31,3	407,9	11,18	16,82	19,05	12,23	13,28	2,10
10:00	33,6	500,0	17,83	25,86	28,79	21,86	22,88	5,05
11:00	35,6	387,4	27,15	37,92	41,81	33,73	34,89	7,74
12:00	37,0	183,3	36,42	48,79	53,38	43,23	44,71	8,28
13:00	37,8	146,8	42,42	54,36	58,97	47,10	48,88	6,46

Tabela 8 – Resultados da taxa de condução térmica por área para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São João do Piauí

(conclusão)

São João do Piauí (PI)			Taxa de transferência de calor por condução por Área (W/m ²)					Variação absoluta
Data: 29/09	TBS, ext (°C)	Rd, inc. (W/m ²)	SUPERFÍCIE HOMOGÊNEA		SUPERFÍCIE HETEROGÊNEA			
Hora			PAREDE LESTE A	PAREDE LESTE B	PAREDE LESTE C	PAREDE LESTE D	PAREDE LESTE Ponderada	
14:00	38,9	135,5	45,31	56,26	60,71	47,52	49,54	4,23
15:00	39,5	129,1	46,62	57,11	61,60	46,90	49,18	2,57
16:00	40,1	71,6	47,24	57,68	62,32	46,11	48,65	1,41
17:00	39,2	48,4	46,98	57,12	61,74	44,54	47,25	0,28
18:00	37,2	3,8	45,71	55,29	59,81	41,95	44,79	0,92
9:00	35,8	0,0	43,12	51,75	56,05	37,95	40,85	2,27
20:00	34,2	0,0	39,62	47,29	51,33	33,38	36,27	3,35
21:00	31,7	0,0	35,77	42,70	46,54	28,85	31,70	4,07
22:00	30,5	0,0	31,74	37,98	41,60	24,38	27,17	4,57
23:00	29,6	0,0	27,70	33,32	36,71	20,19	22,87	4,83
24:00	28,8	0,0	23,91	29,01	32,20	16,49	19,04	4,87

TBS, ext: Temperatura do Bulbo Seco externa (°C)

Rd, inc.: Radiação Solar Direta incidente sobre a superfície (W/m²)

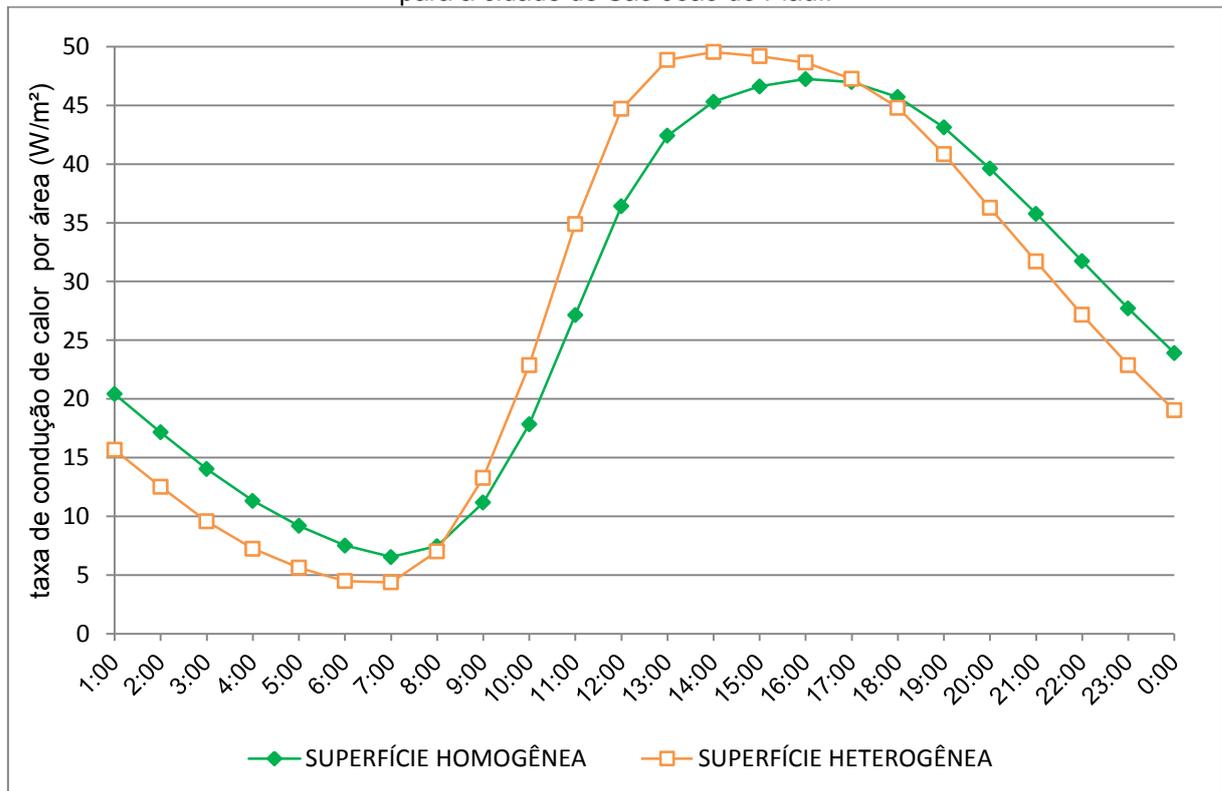
A partir da Tabela 8 é possível verificar que para a parede com superfície heterogênea, a maior transmissão de calor por condução por área ocorreu na superfície C, composta por camadas de argamassa externa, concreto e argamassa interna. Estes valores evidenciam a influência das pontes térmicas na troca de calor entre os ambientes, como é possível verificar na comparação entre a superfície C e D da parede heterogênea. Nesta situação a superfície C apresentou valores maiores que a superfície D para todo o período simulado. Contudo, a superfície D, que é composta pela parcela do componente construtivo que apresenta câmara de ar, é representada por uma área maior do que 80% de toda a superfície analisada. Portanto, na determinação da parede ponderada pela área, os valores da taxa de transferência por condução para a parede inteira são mais próximos da superfície D.

Na comparação entre a superfície homogênea e a superfície heterogênea, observou-se uma variação média absoluta de 3,76 W/m², com uma diferença máxima de 8,28 W/m² as 12h00. Na variação percentual, o valor médio absoluto entre as duas superfícies foi de 23%, com maior diferença percentual encontrada

para as taxas de transferência de calor de menor intensidade, como as registradas entre às 05h00 e às 07h00.

A Figura 19 a seguir apresenta o gráfico gerado a partir dos resultados obtidos, auxiliando na análise termodinâmica dos modelos simulados para a cidade de São João do Piauí (PI).

Figura 19 – Variação da taxa de troca de calor por área entre a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São João do Piauí.



É possível verificar as variações das taxas de troca de calor por condução através da superfície interna dos modelos. Para a superfície homogênea observa-se uma amplitude das taxas de trocas de calor menor em comparação a superfície heterogênea. Além disso, é possível verificar uma pequena translação no eixo do tempo entre a superfície homogênea e a superfície heterogênea. Estes dois comportamentos, podem ser explicados pela presença de camadas sólidas, como as camadas B e C da superfície heterogênea, responsáveis pelo surgimento de pontes térmicas. Nestes casos, o fluxo de calor através do componente flui mais depressa e com maior intensidade, pois enfrenta menor resistência em relação às câmaras de

ar, chegando à superfície interna em um intervalo de tempo menor, e com uma amplitude maior em relação ao elemento homogêneo.

Para a segunda situação analisada, considerando o dia extremo de temperatura para o período de inverno na cidade de Urubici (SC), a Tabela 9 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 9 – Resultados da taxa de condução térmica por área para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de Urubici.

Urubici (SC)			Taxa de transferência de calor por condução por Área (W/m ²)					Variação absoluta
Data: 22/06	TBS, ext. (°C)	Rd, inc. (W/m ²)	SUPERFÍCIE HOMOGÊNEA		SUPERFÍCIE HETEROGÊNEA			
Hora			PAREDE SUL A	PAREDE SUL B	PAREDE SUL C	PAREDE SUL D	PAREDE SUL Ponderada	
01:00	5,0	0,0	-35,25	-44,55	-48,57	-34,25	-36,50	1,25
02:00	6,8	0,0	-35,62	-44,88	-48,99	-33,47	-35,92	0,31
03:00	7,1	0,0	-34,53	-43,39	-47,34	-31,29	-33,85	0,68
04:00	7,8	0,0	-33,04	-41,60	-45,48	-29,21	-31,82	1,22
05:00	5,9	0,0	-31,41	-39,74	-43,53	-27,35	-29,95	1,47
06:00	3,7	0,0	-30,35	-38,71	-42,49	-26,69	-29,22	1,13
07:00	3,9	0,0	-30,43	-39,20	-43,11	-27,52	-30,01	0,42
08:00	5,2	0,0	-31,22	-40,46	-44,60	-28,77	-31,28	0,06
09:00	5,4	0,0	-31,63	-40,97	-45,20	-28,92	-31,50	0,13
10:00	5,1	0,0	-31,20	-40,26	-44,38	-28,03	-30,63	0,57
11:00	5,4	0,0	-30,34	-39,03	-43,02	-26,87	-29,44	0,89
12:00	6,5	0,0	-29,21	-37,49	-41,32	-25,50	-28,03	1,18
13:00	7,2	0,0	-27,82	-35,61	-39,25	-23,92	-26,37	1,45
14:00	7,8	0,0	-26,21	-33,50	-36,94	-22,17	-24,54	1,67
15:00	8,2	0,0	-24,33	-31,06	-34,24	-20,15	-22,42	1,92
16:00	7,3	0,0	-22,46	-28,69	-31,64	-18,41	-20,54	1,91
17:00	4,8	0,0	-21,40	-27,61	-30,49	-18,08	-20,07	1,33
18:00	2,5	0,0	-21,89	-28,69	-31,72	-19,83	-21,72	0,17
19:00	1,1	0,0	-23,75	-31,35	-34,60	-22,88	-24,72	0,97
20:00	2,5	0,0	-26,30	-34,57	-37,99	-26,27	-28,10	1,80
21:00	2,4	0,0	-28,80	-37,39	-40,94	-28,91	-30,79	1,99
22:00	2,2	0,0	-30,75	-39,37	-42,95	-30,67	-32,59	1,85
23:00	2,0	0,0	-32,40	-41,13	-44,79	-32,04	-34,04	1,64
24:00	1,4	0,0	-33,87	-42,84	-46,66	-33,22	-35,33	1,46

TBS, ext: Temperatura do Bulbo Seco externa (°C)

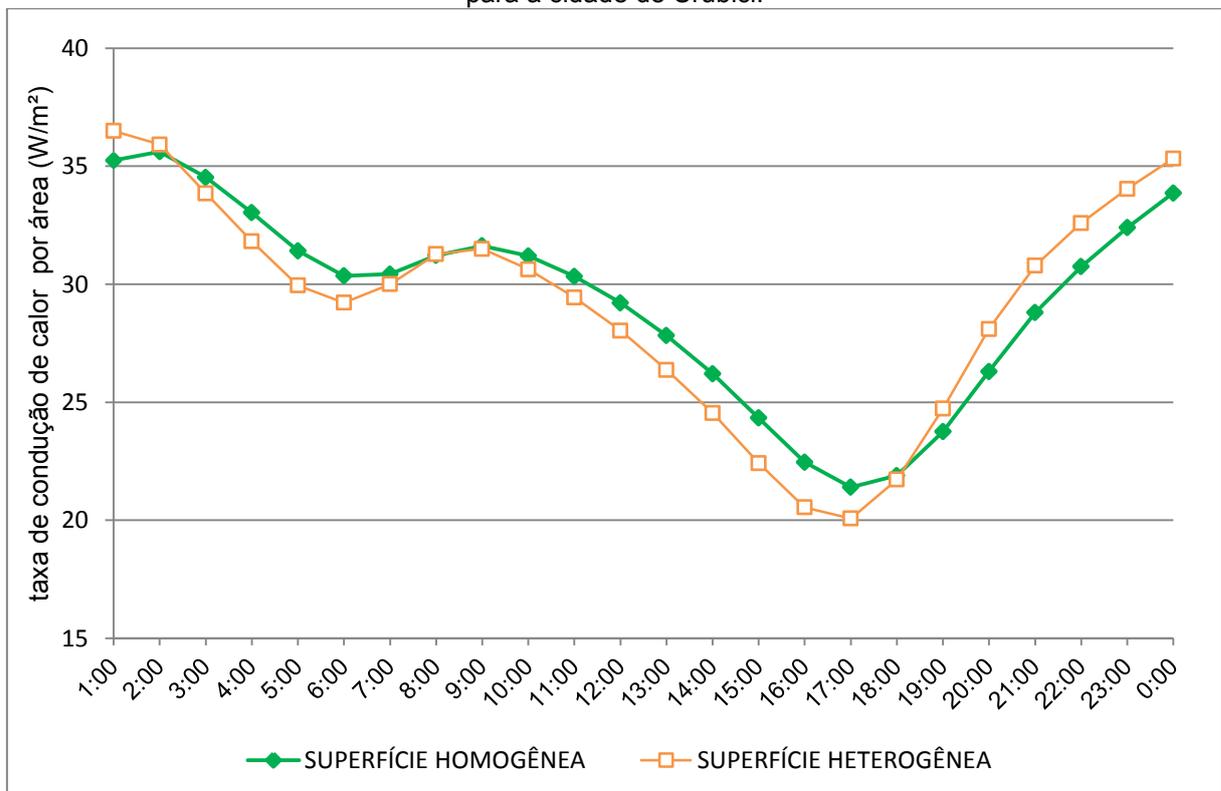
Rd, inc.: Radiação Solar Direta incidente sobre a superfície (W/m²)

Para as simulações realizadas para a cidade de Urubici (SC), o comportamento entre as superfícies heterogêneas foi mais próximo do que os valores obtidos para as simulações em São João do Piauí (PI). Contudo, as taxas de

calor para as superfícies B e C foram ainda significativamente maiores do para a superfície D. Na comparação da transferência de calor por condução considerando a parede inteira, os valores apresentados para a superfície homogênea e para a superfície heterogênea foram relativamente próximos, mostrando boa congruência. A variação média absoluta entre os dois modelos foi de $1,41 \text{ W/m}^2$. A variação percentual média total foi de 4%, sendo a maior diferença absoluta de 9,3%, às 16h00, com $- 22,45 \text{ W/m}^2$ para a superfície homogênea, e $- 20,54 \text{ W/m}^2$ para a superfície heterogênea. O valor negativo encontrado para as taxas de calor por condução indicam que o fluxo de calor ocorre de dentro do ambiente interno para o exterior.

A Figura 20 mostra o gráfico gerado a partir dos resultados obtidos através da simulação. Para fins de análise das trocas de calor, optou-se por plotar os valores absolutos para as taxas de transferência de calor por área.

Figura 20 – Variação da taxa de troca de calor por área entre a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de Urubici.



É possível verificar o comportamento das duas superfícies ao longo do período de simulação para a cidade de Urubici (SC). Apesar de apresentar variações menores entre os valores das taxas de troca de calor por condução em relação à

cidade de São João do Piauí (PI), a superfície homogênea apresentou o mesmo padrão observado na análise anterior, registrando uma amplitude menor dos valores em relação à superfície heterogênea. Este mesmo comportamento indica a presença de pontes térmicas, entretanto, com menor intensidade. As menores variações indicam que a radiação solar incidente nas superfícies influencia de forma mais significativa na ocorrência e intensidade de pontes térmicas, uma vez que a parede analisada, orientada para o sul, não recebeu incidência de radiação solar direta. Em concordância com esta afirmação, verificou-se que mesmo para cidade de Urubici (SC), que registrou uma variação média de temperatura entre o ambiente interno e externo de 13,1°C, os valores de taxa de troca de calor por condução foram menores, frente os valores encontrados para a cidade de São João do Piauí, que obteve uma variação da temperatura média de 8,5°C.

Outra maneira de verificar a influência do método de modelagem de um elemento construtivo no programa *Energyplus*, foi realizar uma simulação anual, considerando as cargas de aquecimento e resfriamento mensais em Watts (W) e da carga total anual em quilo watts hora (KWh). As simulações foram realizadas considerando o mesmo elemento analisado anteriormente.

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São Paulo (SP), considerando a orientação norte.

Tabela 10 – Resultados da carga de aquecimento e resfriamento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade de São Paulo.

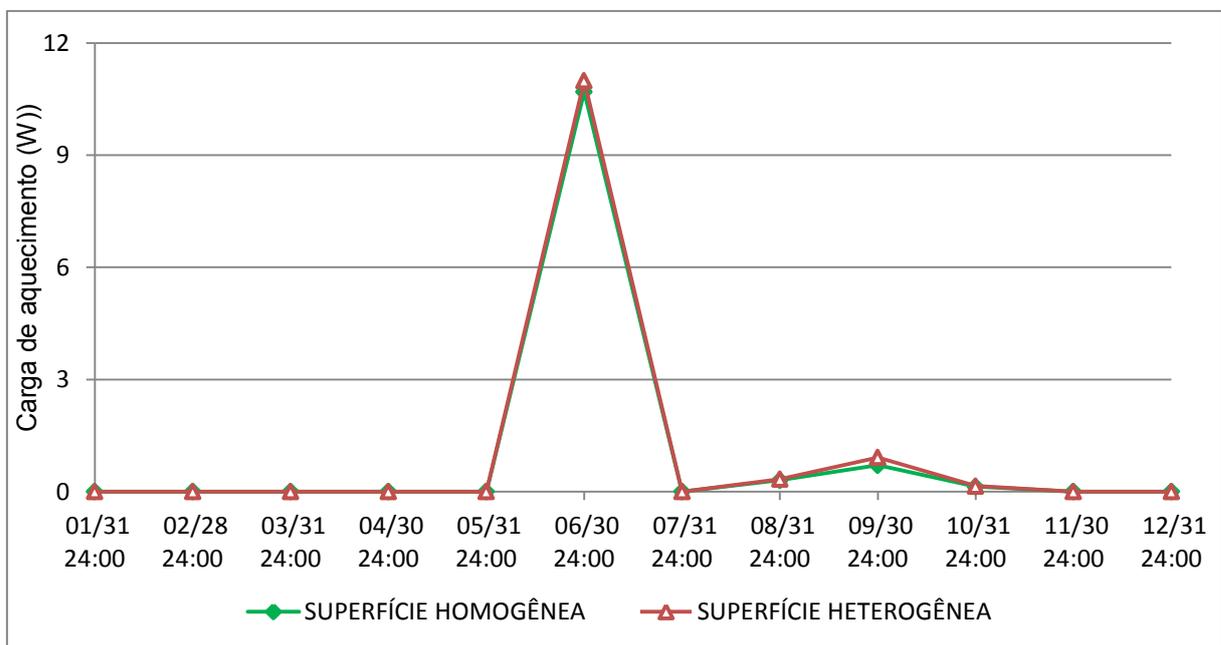
SÃO PAULO (SP)	SUPERFÍCIE HOMOGÊNEA		SUPERFÍCIE HETEROGÊNEA		
	Data e Hora	Carga de aquecimento (W)	Carga de resfriamento (W)	Carga de aquecimento (W)	Carga de resfriamento (W)
	31/01 24:00	0,00	10,60	0,00	11,85
	28/02 24:00	0,00	22,43	0,00	24,42
	31/03 24:00	0,00	47,80	0,00	48,96
	30/04 24:00	0,00	28,45	0,00	28,82
	31/05 24:00	0,00	4,81	0,00	4,89
	30/06 24:00	10,70	0,00	11,00	0,00
	31/07 24:00	0,00	6,80	0,00	7,07
	31/08 24:00	0,30	16,99	0,33	17,16
	30/09 24:00	0,71	14,20	0,91	14,21
	31/10 24:00	0,13	20,18	0,15	20,77
	30/11 24:00	0,00	0,32	0,00	0,47
	31/12 24:00	0,00	0,82	0,00	1,20
Anual (KWh)		8,54	126,4	8,93	131,0

A partir dos resultados é possível observar que para a cidade de São Paulo (SP) houve pouca necessidade do uso de cargas para o aquecimento interno da edificação. Na comparação entre os modelos, a diferença média em módulo para a carga de aquecimento foi de 0,05 W no mês, apresentando uma boa aproximação dos resultados. Para as cargas de resfriamento foi observada uma variação maior, uma vez que foram mais requeridas durante o período analisado. A diferença média em módulo calculada para esta situação foi de 0,53 W, o que indica ainda uma boa concordância entre os métodos de modelagem.

Na comparação anual, a diferença foi de 0,40 kWh para a carga total de aquecimento e 4,62 kWh para a carga total de resfriamento, totalizando uma diferença percentual de 4% para as duas situações.

A Figura 21 apresenta o gráfico obtido através dos dados apresentados na Tabela 10 para as cargas térmicas de aquecimento.

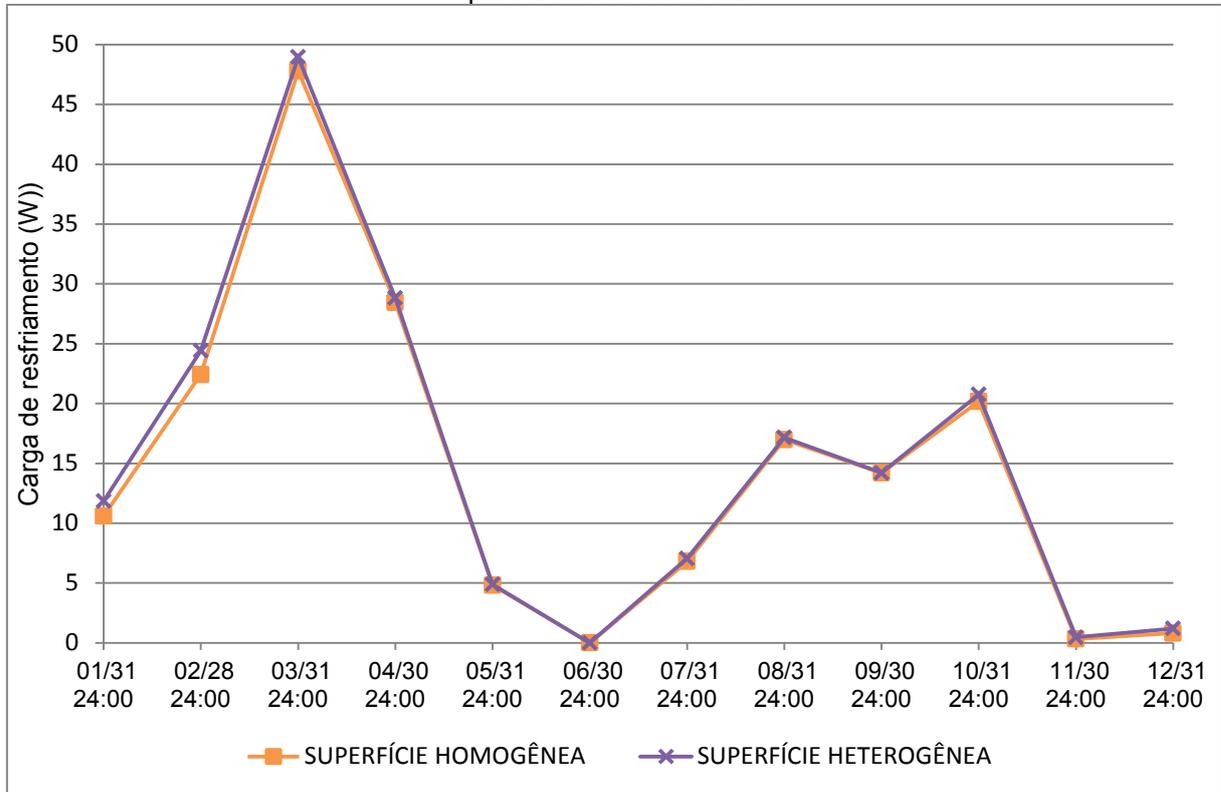
Figura 21 – Variação mensal da carga de aquecimento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade São Paulo



Na análise para as cargas térmicas de aquecimento, a maior diferença observada é para o mês de junho, onde o elemento heterogêneo obteve uma variação de 0,30 W em relação ao elemento homogêneo, representando uma diferença percentual de 2,7%.

Para as cargas de aquecimento simuladas para a cidade de São Paulo (SP), a Figura 22 apresenta o gráfico gerado através dos dados presentes na Tabela 10.

Figura 22 – Variação mensal da carga de resfriamento para a superfície homogênea e heterogênea para a cidade São Paulo



Pode-se observar pouca diferença nos valores obtidos para as cargas de resfriamento para os modelos simulados. Dos resultados, é possível verificar uma diferença mais significativa nos valores para os meses de janeiro, fevereiro e março, com uma diferença de 1,25 W, 1,99 W e 1,16 W, respectivamente. Nestes meses, a estação é predominantemente de verão, onde apresenta um clima com temperatura e radiação mais elevada, evidenciando-se pelo maior consumo de energia para resfriamento do ambiente neste período.

No cenário geral, para análise do método de modelagem no comportamento termoenergético para uma cidade com temperaturas amenas, como São Paulo, os resultados obtidos foram relativamente próximos, apresentando pouca influência decorrente da modelagem do componente.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs apresentar um método para o desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos no programa *EnergyPlus*. Para atender a este objetivo foram realizadas simulações computacionais no programa *Quickfield*, que forneceram os dados necessários para a determinação dos modelos equivalentes. Foram definidos 34 modelos de paredes, 3 modelos de lajes/pisos e 24 modelos de coberturas que apresentam câmara de ar na sua composição. Os objetivos específicos propostos no trabalho também foram atendidos, os quais verificaram a influência da presença de pontes térmicas no programa *Quickfield* e no programa *EnergyPlus*.

Para a elaboração da biblioteca de componentes construtivos equivalentes foram realizadas simulações em regime permanente para uma situação de verão, com ganho de calor para o ambiente interno. Os resultados obtidos pelas simulações para a transmitância térmica total foram comparados aos valores calculados segundo o método descrito pela NBR15220-2 (ABNT, 2005c). Para os modelos de paredes, a variação percentual média absoluta foi de 2%, e para os pisos, esta diferença foi de 7%. Para as coberturas, foram comparados os valores de transmitância térmica entre o modelo de referência, modelado com um telhado inclinado, e para o modelo equivalente, modelado de acordo com as diretrizes aplicadas pela NBR 15220-2 (ABNT, 2005c). Nesta comparação, os resultados apresentaram boa aproximação para a maioria dos casos simulados, com variação percentual média absoluta de 9%. Na comparação entre o modelo equivalente e os resultados obtidos pela NBR 15220, a variação média percentual absoluta foi de 1%.

Para a análise da influência de pontes térmicas em modelos de referências em relação a modelos equivalentes, foram realizadas simulações no programa *Quickfield* e no programa *EnergyPlus* para uma parede de bloco de concreto 9x19x39 cm com argamassa interna e externa de 2,5 cm e argamassa de assentamento de 1,5 cm. Nas simulações no programa *Quickfield* utilizou-se como parâmetro de avaliação, o fluxo de calor e temperatura através da superfície interna e externa do modelo. Os resultados obtidos mostraram que a influência da presença de pontes térmicas no comportamento termodinâmico entre os modelos foi pouco significativa. A comparação do valor máximo para o fluxo de calor através da

superfície externa foi de 3%, com um intervalo de tempo entre os modelos de 15 minutos. Para a superfície interna, os valores foram ainda mais próximos, com diferença de 0,5%, observados no mesmo período de tempo. Outro fator relacionado à presença de pontes térmicas foi o atraso térmico. Entre o modelo de referência e o modelo equivalente, a variação do atraso térmico foi de 15 minutos, com o valor respectivo de 2h15 e 2h30, indicando que houve influência de pontes térmicas no modelo de referência, mas de forma pouco significativa.

A análise da influência de pontes térmicas para o método de modelagem foi verificada também no programa *EnergyPlus*. Esta análise permitiu verificar o comportamento de uma parede modelada como uma superfície homogênea e como uma superfície heterogênea. Foram consideradas três situações: com temperatura e radiação solar direta incidente elevadas (orientação leste); com temperatura e radiação solar incidente baixas (orientação sul); e com temperatura e radiação solar médias (orientação norte), para as cidade de São João do Piauí (PI), Urubici (SC) e São Paulo (SP), respectivamente. Como parâmetro de avaliação foi analisado a taxa de transferência de calor por condução através das superfícies internas para os dois métodos de modelagem, considerando os dias extremos de temperatura para verão (São João do Piauí) e inverno (Urubici), e as cargas de aquecimento e resfriamento mensais e anuais (São Paulo).

Os resultados de taxa de transferência de calor por condução através das superfícies internas para a cidade de São João do Piauí (PI) apresentaram uma variação média absoluta de 23% (3,76 W). Para a situação de inverno na cidade de Urubici (SC), a variação percentual media obtida foi de 4% (1,14 W). Estes valores indicam que a incidência de radiação solar direta sobre a parede analisada influenciou os resultados, uma vez que a variação de temperatura média entre os ambientes foi maior para a cidade de Urubici, 13,1°C em relação a São João do Piauí, 8,5°C. Para as simulações anuais para a cidade de São Paulo (SP), os resultados apresentaram boa aproximação. Para a carga de aquecimento, a variação foi de 0,05 W. Já para as cargas de resfriamento, observadas em quase todo o período de simulação, a variação foi de 0,53 W, com maior diferença para os meses de verão, de janeiro a março. Nos resultados anuais, a variação da carga de aquecimento horária foi de 0,40 kWh, e a variação da carga de resfriamento horaria foi de 4,62 kWh, representando 4% nas duas situações.

Dos resultados obtidos para as simulações no programa *EnergyPlus*, observou-se pouca influência da presença de pontes térmicas no comportamento termoenergético de elementos construtivos, modelados considerando uma superfície heterogênea e uma superfície homogênea (método proposto) para duas das três cidades analisadas. No terceiro caso, verificou-se que a radiação solar direta foi o parâmetro que mais influenciou na diferença entre os valores dos modelos. A alta absorvância solar da parede, de 0,70, também contribuiu para que houvesse uma maior troca de calor, conforme constatado por Freitas et al (2016). No programa *Quickfield*, estes dois fatores não foram considerados nas simulações, o que explica as menores variações encontradas com relação às pontes térmicas.

Cabe ressaltar, que nos modelos simulados foram consideradas apenas as pontes térmicas provenientes do componente construtivo, desconsiderando as estruturas de concreto armado de pilares e vigas, as quais possuem grande influência nas trocas de calor através do envelope. Contudo, percebeu-se que mesmo as pontas térmicas do componente construtivo podem influenciar de forma significativa no consumo de energia para o condicionamento do ambiente.

Considerando apenas os elementos construtivos simulados neste trabalho, conclui-se que o desenvolvimento de um modelo homogêneo é indicado para simulações com radiação solar moderada, e/ou com componentes com materiais com condutividade térmica semelhantes, e/ou com coeficiente de absorvância solar medianos, visando à minimização das pontes térmicas. Além disso, a modelagem de um elemento heterogêneo no *EnergyPlus*, exige cálculos prévios para a determinação da área de cada subelemento, exigindo maior atenção do usuário e aumento das chances de erros nesta etapa. Para o modelo equivalente determinado pelo método descrito neste trabalho, sua aplicação pode ser realizada independente das dimensões do elemento construtivo, otimizando o processo de modelagem. Por outro lado, modelos com camadas em série, como os apresentados neste trabalho, podem subdimensionar os sistemas da edificação.

Por fim, conclui-se que este trabalho fornece embasamento para o desenvolvimento de outros modelos equivalentes de paredes, pisos e coberturas, permitindo uma contínua atualização da biblioteca de componentes construtivos.

5.1 LIMITAÇÕES

As principais limitações verificadas neste trabalho são decorrentes da modelagem e simulação dos modelos computacionais desenvolvidos. As limitações observadas são listadas abaixo:

- Limite de 255 nós da malha do modelo computacional do programa *Quickfield*;
- Simulação termodinâmica em 2D no programa *Quickfield*;
- Calculadora de resistência térmica da câmara de ar não considera ambientes com muita ventilação;
- Parâmetros relacionados à ventilação natural do ambiente interno;
- Quantidade de casos simulados no programa *EnergyPlus*.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou um método para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos equivalentes aplicados no programa *Energyplus*. Desta maneira, as sugestões para trabalhos futuros são decorrentes da atualização contínua da biblioteca e de sua aplicação:

- Inserção de novos componentes construtivos aplicados na construção civil brasileira;
- Verificação do comportamento termodinâmico aplicados em outros programas de simulação computacional;
- Desenvolvimento de modelos equivalentes por meio de programas que determinam a resistência térmica de câmaras de ar ventiladas;

- Análise da influência de pontes térmicas considerando outras cidades e outros elementos construtivos de paredes, lajes e coberturas.
- Comparação do desempenho energético de uma edificação modelada utilizando componentes equivalentes no programa *EnergyPlus* em relação a uma edificação real.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos** Rio de Janeiro, 2016.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220. Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro, 2005a.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-1. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro, 2005d.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-2. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro, 2005c.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15220-3. Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social**. Rio de Janeiro, 2005b.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações de até cinco pavimentos – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2008.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro, 2013.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª Ed, Brasil: ANEEL, 2008.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2017**: Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, EUA, 2017a.
- ASHRAE. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2017**, Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, EUA, 2017b.
- BARDELIN, C. E. A. **Os Efeitos do Racionamento de Energia Elétrica ocorrido no Brasil em 2001 e 2002 com ênfase no Consumo de Energia Elétrica**. 2004. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004
- BIG LADDER. **Plugin Euclid**. Disponível em: <<https://bigladdersoftware.com/projects/euclid/>>. Acesso em: 05 de mai. de 2018.

BRASIL. Lei 10.295, de 17.out.01 – “Lei de Eficiência Energética”. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. . Brasília, DF, 18.out.2001a.

BRASIL. Decreto 4.059 de 19.dez.01. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso racional de Energia. Brasília, DF, 20.dez.2001b.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC, 2008.

CHVATAL, K. M. S. **Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 119-134, out./dez. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

DOE. United States Department of Energy. Programa EnergyPlus. Disponível em: < <https://energyplus.net/> > Acesso em: 26 de abr. de 2018.

ENERGYPLUS. **Programa EnergyPlus Versão 8.7.0**. Disponível em: <https://energyplus.net/downloads>. Acesso em: 04 de mar. de 2018.

ELETROBRÁS, PROCEL. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso – Ano base 2005, Brasil, 2007.**

ELETROBRÁS, PROCEL. **Resultados PROCEL 2017**, Brasil, 2017. Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf. Acesso em: 05 de jul. de 2018

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, ano VII, n. 77, fev. 2014.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Caderno de Demanda de Eletricidade** - ano I, número 1, Abril de 2018. Rio de Janeiro: EPE, 2018a.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica**. Rio de Janeiro: EPE, ano XI, n. 126, mar. 2018b.

ESPÍ, M. V. **Uma brevíssima historia de la arquitectura solar**. In ciudades para um futuro más sostenible, Boletim CF+S. Número 9, Instituto Juan de Herrera, Madrid, Espanha, 1999.

FREITAS, J. M. R.; LEITZKE, R. K; GIOIELLI, B. I; CUNHA, E. G. **Análise da influência das pontes térmicas na simulação de eficiência energética nas paredes de edificações residenciais**. Revista de Arquitetura IMED, Passo Fundo, v. 5, n. 2, p. 24-41, dez. 2016. ISSN 2318-1109. Disponível em:

<<https://seer.imes.edu.br/index.php/arqimed/article/view/1330>>. Acesso em: 19 mai. 2018.

CGIEE - Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência - Ministério de Minas e Energia. **Relatório de Atividades 2015 – 2017**. Brasília, Brasil. 2017.

GIOIELLI, B; ALMEIDA, A; CUNHA, E; FERRUGEM, A. **Estudo do Efeito de Pontes Térmicas em Estruturas de Concreto Armado no Desempenho Energético de Edifício Hoteleiro Para 4 Zonas Bioclimáticas Brasileiras**. XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais do evento. Alagoas, 2015.

GHISI, E.; GOSCH, S.; LAMBERTS, R. **Electricity end-uses in the residential sector of Brazil**. Energy Policy, v. 35, p. 4107- 4120, 2007.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Arquivos Climáticos. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/> >. Acesso em: 05 abr. 2018.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria n° 372, de 17 de Setembro de 2010. **Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C)**. Rio de Janeiro, 2010.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria n.º 16, de 05 de janeiro de 2011. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Estabelece condições e parâmetros de comercialização de blocos e tijolos cerâmicos de alvenaria. Rio de Janeiro, 2011.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria n.º 18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade para a Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Rio de Janeiro, 2012.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA – INMETRO. Portaria n.º 50, de 01 de fevereiro de 2013. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Anexo geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidros**. Rio de Janeiro, 2013.

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

ISO 14683. **Thermal bridges in building construction** – Linear thermal transmittance – Simplified methods and default values. International Organization for standardization, 2017a.

ISO 10211. **Thermal bridges in building construction** – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations. International Organization for standardization, 2017b.

KOSSECKA, E.; KOSNY, J. **Influence of insulation configuration on heating and cooling loads in a continuously used building**. Energy and Buildings, 34. P. 321-331, 2002.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3ª edição. São Paulo: ProLivros, 2013.

MELO, A. P.; WESTPHAL, F. S.; MATOS, M. M. **Apostila de curso básico do programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf>. Acesso 01 de dez. 2017.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. W.; LAMBERTS, R.; NETO, J., A., B., C. **Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resenha Energética Brasileira: Exercício de 2016**. Brasil: MME, 2017a. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 26 de abr. de 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanço Energético Nacional 2017: Ano base 2016**. Brasil: MME, 2017b. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 25 de nov. de 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Boletim Mensal de Energia - Mês de Referência: janeiro de 2018**. Brasil: MME, 2018. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 25 de nov. de 2017.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasil: MME, 2007. <<http://www.mme.gov.br>>. Acesso em: 29 de abr. de 2018.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Eficiência energética: Guia para etiquetagem de edifícios: volume 2**. Brasília: MMA, 2015.

ONU. Organizações das Nações Unidas. **Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano**. Estocolmo, 1972. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/estocolmo.doc>. Acesso em: 07 de jun. de 2018.

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

PASSOS, P., N., C. **A Conferência de Estocolmo como ponto de partida para a proteção internacional do meio ambiente.** Revista Direitos Fundamentais e Democracia. Curitiba, UNIBRASII. v. 6, n.6, p. 7-19, Jul/dez. 2009.

PEREIRA, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente.** 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

QUICKFIELD. Programa **QUICKFIELD versão 6.3 estudante.** Disponível em: < <https://quickfield.com/>>. Acesso em: 09 de dez. de 2017.

ROSA, C.; BRANDALISE, M.; SILVA, A.C. **Análise da eficiência energética de dois prédios pelo RTQ-C: comparação entre o método prescritivo e o método de simulação através do software Design Builder e da interface S3E.** In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ENCAC) / VIII ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO (ELACAC). 2013, Brasília. Anais... Brasília: 25-27 set. 2013.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, L.S.S.; GHISI, E. **Comparação da eficiência energética da envoltória de Habitações de interesse social pelos métodos prescritivo e simulação do RTQ-R.** Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído XII ENCAC & Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído VIII ELACAC, Brasília, 25-27 Set. 2013: 1-10.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Brasília, 2013. Anais... Brasília: ANTAC, 2013

TERA ANALYSIS LTD. **Desenvolvedora de softwares de simulação computacional.** Disponível em: < <http://www.teraanalysis.com/>>. Acesso em: 29 de abr. de 2018.

TRIMBLE. **Sketchup.** Disponível em: <<http://www.sketchup.com/download>> Acesso em: 15 de mai. 2018.

YAO, J; YAN, C. **Effects of solar absorption coefficient of external wall on building energy consumption.** World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering v.5, n. 4, p. 208-210, 2011.

APÊNDICE A – Identificação e descrição de componentes construtivos de paredes, pisos e coberturas

I. Componentes construtivos de paredes

(continua)

ID	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO
1	Sem revestimento interno Bloco cerâmico (9,0 x 9,0 x 24,0 cm) Sem revestimento externo
2	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
3	Gesso interno (placa 2,0cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
4	Gesso interno (0,2cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
5	Sem Revestimento Interno Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
6	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Câmara de ar (>5cm) Placa de alumínio composto
7	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Poliestireno (8cm) Placa de alumínio composto
8	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Câmara de ar (> 5cm) Placa melamínica
9	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Poliestireno (8cm) Placa melamínica
10	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Granito (2,5cm)
11	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Câmara de ar (2 a 5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
12	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Lã de rocha (4cm) Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa externa (2,5cm)
13	Sem revestimento interno e externo Bloco cerâmico (14,0 x 9,0 x 24,0cm)
14	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (9,0 x 19,0 x 19,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
15	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (12,0 x 19,0 x 19,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
16	Argamassa interna (2,5cm) Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
17	Gesso interno (placa 2,0cm) Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
18	Gesso interno (0,2cm) Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
19	Sem revestimento interno Bloco cerâmico (14,0 x 19,0 x 29,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
20	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (9,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
21	Gesso interno (placa 2,0cm) Bloco de concreto (9,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)

I. Componentes construtivos de paredes

(conclusão)

ID	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO
22	Gesso interno (0,2cm) Bloco de concreto (9,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
23	Sem revestimento interno Bloco de concreto (9,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
24	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
25	Gesso interno (placa 2,0cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
26	Gesso interno (0,2cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
27	Sem revestimento interno Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
28	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Câmara de ar (> 5cm) Placa de alumínio composto
29	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Poliestireno (8cm) Placa de alumínio composto
30	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0 cm) Argamassa externa (2,5cm) Câmara de ar (> 5cm) Placa melamínica
31	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Poliestireno (8cm) Placa melamínica
32	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm) Granito (2,5cm)
33	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Câmara de ar (2 a 5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)
34	Argamassa interna (2,5cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Lã de rocha (4cm) Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa externa (2,5cm)

II. Componentes construtivos de pisos e lajes

ID	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO
35	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm)
36	Laje nervurada - Altura 22,5cm (altura da nervura 15cm, largura da nervura 10cm, espessura da lâmina 7,5cm, Distância entre vãos 50cm) Vazios sem preenchimento (câmara de ar) 40 x 40cm Contrapiso (2cm) Piso cerâmico (0,75cm) forro de gesso (1cm)
37	Laje protendida alveolar sem preenchimento e sem capa (15cm) Contrapiso (5cm) Piso cerâmico (0,75cm)

III. Componentes construtivos de coberturas

ID	DESCRIÇÃO DO COMPONENTE CONSTRUTIVO
38	Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica
39	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica
40	Forro PVC (1,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica
41	Forro madeira (1,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica
42	Forro gesso (3,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha cerâmica (1cm)
43	Laje maciça (10,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento
44	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento 0,8cm
45	Forro PVC (1,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento
46	Forro madeira (1,0cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento
47	Forro gesso (3,0 cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha fibrocimento
48	Forro de gesso (1cm) Laje nervurada - Altura 22,5cm (altura da nervura 15cm, largura da nervura 10cm, espessura da lâmina 7,5cm, Distância entre vãos 50cm) Vazios sem preenchimento (câmara de ar) 40 x 40cm Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha de fibrocimento
49	Laje protendida alveolar sem preenchimento e sem capa (15cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha de fibrocimento
50	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,6cm
51	Laje maciça 10,0cm Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,1cm + Poliuretano 4,0cm + Telha metálica 0,1cm
52	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,1cm + Poliuretano 4,0cm + Telha metálica 0,1cm
53	Laje maciça 10,0cm Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,1cm + Poliestireno (isopor) 4,0cm + Telha metálica 0,1cm
54	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Câmara de ar (> 5,0 cm) Telha metálica 0,1cm + Poliestireno (isopor) 4,0cm + Telha metálica 0,1cm
55	Laje maciça 10,0cm Terra argilosa seca (10cm) Vegetação
56	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Terra argilosa seca (10cm) Vegetação
57	Laje maciça 10,0cm Terra argilosa seca (40cm) Vegetação
58	Laje pré-moldada 12cm (concreto 4cm + lajota cerâmica 7cm + argamassa 1cm) Terra argilosa seca (40cm) Vegetação

APÊNDICE B – Caracterização de componentes construtivos equivalentes de paredes, pisos e coberturas simulados no programa *Quickfield*.

Abaixo seguem os significados dos itens das tabelas do Apêndice B:

Mat - Material

e – espessura (cm)

λ – condutividade térmica (W/m.°C)

ρ – peso específico aparente (kg/m³)

c – calor específico (kJ/kg.°C)

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

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

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

I. Modelos equivalentes de paredes

(continua)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
1	Cerâmica	1,43	0,90	1600	0,92	0,016	2,93	42
	Câmara de Ar	6,15	0,86	-	-	0,140		
	Cerâmica	1,43	0,90	1600	0,92	0,016		
2	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	152
	Cerâmica	1,77	0,90	1600	0,92	0,020		
	Câmara de Ar	5,47	0,91	-	-	0,166		
	Cerâmica	1,77	0,90	1600	0,92	0,020		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
3	Gesso interno	2,00	0,35	900	0,87	0,057	2,21	115
	Cerâmica	1,68	0,90	1600	0,92	0,019		
	Câmara de Ar	5,65	0,94	-	-	0,166		
	Cerâmica	1,68	0,90	1600	0,92	0,019		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
4	Placa de gesso interno	0,20	0,35	900	0,87	0,006	2,55	99
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	5,78	0,92	-	-	0,159		
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
5	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018	2,72	98
	Câmara de Ar	5,74	0,80	-	-	0,140		
	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		

I. Modelos equivalentes de paredes

(continuação)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
6	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,75	122
	Cerâmica	0,62	0,90	1600	0,92	0,007		
	Câmara de Ar	7,77	1,68	-	-	0,216		
	Cerâmica	0,62	0,90	1600	0,92	0,007		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Câmara de Ar	5,00	0,70	-	-	0,139		
	Alumínio Composto	3,10	0,04	2700	0,05	0,751		
7	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,32	134
	Cerâmica	1,02	0,90	1600	0,92	0,011		
	Câmara de Ar	6,95	0,96	-	-	0,138		
	Cerâmica	1,02	0,90	1600	0,92	0,011		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	EPS	8,00	0,04	35	1,40	2,000		
	Alumínio Composto	3,10	0,04	2700	0,05	0,751		
8	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,61	121
	Cerâmica	0,01	0,90	1600	0,92	0,000		
	Câmara de Ar	8,98	2,22	-	-	0,247		
	Cerâmica	0,01	0,90	1600	0,92	0,000		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Câmara de Ar	5,00	0,69	-	-	0,138		
	Placa Melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022		
9	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,41	125
	Cerâmica	0,01	0,90	1600	0,92	0,000		
	Câmara de Ar	8,97	1,82	-	-	0,203		
	Cerâmica	0,01	0,90	1600	0,92	0,000		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	EPS	8,00	0,04	35	1,40	2,000		
	Placa Melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022		
10	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,39	210
	Cerâmica	1,97	0,90	1600	0,92	0,022		
	Câmara de Ar	5,06	0,77	-	-	0,153		
	Cerâmica	1,97	0,90	1600	0,92	0,022		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Granito	2,50	3,00	2600	0,80	0,008		

I. Modelos equivalentes de paredes

(continuação)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
11	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,27	195
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	5,77	1,08	-	-	0,186		
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	4,00	0,52	-	-	0,129		
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	5,77	1,08	-	-	0,186		
	Cerâmica	1,61	0,90	1600	0,92	0,018		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
12	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,68	199
	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	5,75	0,85	-	-	0,148		
	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018		
	Lã de rocha	4,00	0,05	100	0,80	0,889		
	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018		
	Câmara de Ar	5,75	0,85	-	-	0,148		
	Cerâmica	1,63	0,90	1600	0,92	0,018		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
13	Cerâmica	1,90	0,90	1600	0,92	0,021	2,35	56
	Câmara de Ar	10,20	2,18	-	-	0,213		
	Cerâmica	1,90	0,90	1600	0,92	0,021		
14	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,37	151
	Cerâmica	1,73	0,90	1600	0,92	0,019		
	Câmara de Ar	5,54	0,94	-	-	0,170		
	Cerâmica	1,73	0,90	1600	0,92	0,019		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
15	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,13	155
	Cerâmica	1,87	0,90	1600	0,92	0,021		
	Câmara de Ar	8,26	1,77	-	-	0,214		
	Cerâmica	1,87	0,90	1600	0,92	0,021		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
16	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,83	161
	Cerâmica	2,07	0,90	1600	0,92	0,023		
	Câmara de Ar	9,86	2,83	-	-	0,287		
	Cerâmica	2,07	0,90	1600	0,92	0,023		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		

I. Modelos equivalentes de paredes

(continuação)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
17	Gesso interno	2,00	0,35	900	0,84	0,057	1,68	123
	Cerâmica	1,95	0,90	1600	0,92	0,022		
	Câmara de Ar	10,10	3,06	-	-	0,303		
	Cerâmica	1,95	0,90	1600	0,92	0,022		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
18	Placa gesso interna	0,20	0,35	900	0,84	0,006	1,80	108
	Cerâmica	1,92	0,90	1600	0,92	0,021		
	Câmara de Ar	10,17	3,21	-	-	0,316		
	Cerâmica	1,92	0,90	1600	0,92	0,021		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
19	Cerâmica	1,90	0,90	1600	0,92	0,021	2,02	106
	Câmara de Ar	10,20	2,66	-	-	0,261		
	Cerâmica	1,90	0,90	1600	0,92	0,021		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
20	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,79	183
	Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010		
	Câmara de Ar	5,54	0,69	-	-	0,125		
	Concreto	1,73	1,75	2400	1,00	0,010		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
21	Gesso interno	2,00	0,35	900	0,84	0,057	2,53	147
	Concreto	1,69	1,75	2400	1,00	0,010		
	Câmara de Ar	5,61	0,71	-	-	0,127		
	Concreto	1,69	1,75	2400	1,00	0,010		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
22	Placa de gesso interno	0,20	0,35	900	0,84	0,006	2,90	133
	Concreto	1,70	1,75	2400	1,00	0,010		
	Câmara de Ar	5,61	0,72	-	-	0,128		
	Concreto	1,70	1,75	2400	1,00	0,010		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
23	Concreto	1,75	1,75	2400	1,00	0,010	3,01	131
	Câmara de Ar	4,54	0,45	-	-	0,099		
	Concreto	1,78	1,75	2400	1,00	0,010		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
24	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,68	245
	Concreto	3,02	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	7,96	1,00	-	-	0,125		
	Concreto	3,02	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		

I. Modelos equivalentes de paredes

(continuação)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
25	Gesso interno	2,00	0,35	900	0,84	0,057	2,44	208
	Concreto	2,97	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,07	0,63	-	-	0,127		
	Concreto	2,97	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
26	Placa de gesso interno	0,20	0,35	900	0,84	0,006	2,78	193
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,11	0,63	-	-	0,129		
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
27	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017	2,87	192
	Câmara de Ar	8,08	0,65	-	-	0,123		
	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
28	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,79	196
	Concreto	1,92	1,75	2400	1,00	0,011		
	Câmara de Ar	10,16	0,86	-	-	0,188		
	Concreto	1,92	1,75	2400	1,00	0,011		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Câmara de Ar	5,00	0,29	-	-	0,092		
	Alumínio Composto	3,10	0,04	2700	0,05	0,751		
29	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,32	200
	Concreto	2,00	1,75	2400	1,00	0,011		
	Câmara de Ar	9,99	0,63	-	-	0,138		
	Concreto	2,00	1,75	2400	1,00	0,011		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	EPS	8,00	0,04	35	1,40	2,000		
	Alumínio Composto	3,10	0,04	2700	0,05	0,751		
30	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,75	214
	Concreto	1,94	1,75	2400	1,00	0,011		
	Câmara de Ar	10,11	0,63	-	-	0,210		
	Concreto	1,94	1,75	2400	1,00	0,011		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Câmara de Ar	5,00	0,29	-	-	0,104		
	Placa Melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022		

I. Modelos equivalentes de paredes

(conclusão)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
31	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,42	218
	Concreto	1,95	1,75	2400	1,00	0,011		
	Câmara de Ar	10,11	1,24	-	-	0,123		
	Concreto	1,95	1,75	2400	1,00	0,011		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	EPS	8,00	0,04	3,0	1,40	2,000		
	Placa Melamínica	0,60	0,27	1500	2,30	0,022		
32	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	2,62	302
	Concreto	3,13	1,75	2400	1,00	0,018		
	Câmara de Ar	7,75	0,96	-	-	0,124		
	Concreto	3,13	1,75	2400	1,00	0,018		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
	Granito	2,50	3,00	2600	0,80	0,008		
33	Argamassa interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	1,40	383
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,10	0,143	-	-	0,174		
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	4,00	0,217	-	-	0,086		
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,10	0,143	-	-	0,174		
	Concreto	2,95	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		
34	Argamassa Interna	2,50	1,15	2000	1,00	0,022	0,70	387
	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,09	0,074	-	-	1,131		
	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017		
	Lã de rocha	4,00	0,045	100	0,80	0,889		
	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017		
	Câmara de Ar	8,09	0,074	-	-	1,131		
	Concreto	2,96	1,75	2400	1,00	0,017		
	Argamassa Externa	2,50	1,15	2000	1,00	0,022		

II. Modelos equivalentes de pisos e lajes

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
	Cerâmica	1,60	1,05	2000	0,92	0,015		
35	Câmara de ar	3,79	0,51	-	-	0,074	2,89	167
	Cerâmica	1,60	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
	Piso cerâmico	0,75	1,05	2000	0,92	0,007		
	Contra piso	2,00	1,15	2000	1,00	0,017		
36	Concreto	9,85	1,75	2200	1,00	0,056	2,35	278
	Câmara de ar	12,65	1,19	-	-	0,106		
	Gesso	1,00	0,35	900	0,87	0,029		
	Piso cerâmico	0,75	1,05	2000	0,92	0,007		
	Contra piso	2,00	1,15	2000	1,00	0,017		
37	Concreto	7,16	1,75	2200	1,00	0,041	2,78	369
	Câmara de ar	0,67	0,16	-	-	0,043		
	Concreto	7,16	1,75	2200	1,00	0,041		

III. Modelos equivalentes de coberturas

(continua)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,92	0,010		
38	Câmara de ar	25,0	1,19	-	-	0,210	2,05	238
	Concreto	10,0	1,75	2200	1,00	0,057		
	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,92	0,010		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
39	Cerâmica	1,59	1,05	2000	0,92	0,015	1,77	185
	Câmara de ar	3,82	0,52	-	-	0,074		
	Cerâmica	1,59	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,92	0,010		
40	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	1,75	21
	PVC	1,00	0,071	273	0,96	0,141		
	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,92	0,010		
41	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	2,02	26
	Madeira	1,00	0,15	600	1,34	0,067		

III. Modelos equivalentes de coberturas

(continuação)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
	Cerâmica	1,00	1,05	2000	0,92	0,010		
42	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	1,94	37
	Gesso	3,00	0,35	900	0,84	0,086		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
43	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	2,06	233
	Concreto	10,00	1,75	2200	1,00	0,057		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
44	Cerâmica	1,61	1,05	2000	0,92	0,015	1,77	180
	Câmara de ar	3,78	0,51	-	-	0,074		
	Cerâmica	1,61	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
45	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	1,76	16
	PVC	1,00	0,071	273	0,96	0,141		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
46	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	2,02	21
	Madeira	1,00	0,15	600	1,34	0,067		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
47	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	1,95	32
	Gesso	3,00	0,35	900	0,84	0,086		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
48	Concreto	9,85	1,75	2200	1,00	0,056	1,61	237
	Câmara de ar	12,65	1,19	-	-	0,106		
	Gesso	1,00	0,35	900	0,84	0,029		
	Fibrocimento	0,80	0,95	1900	0,84	0,008		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
49	Concreto	5,00	1,75	2200	1,00	0,029	1,81	268
	Câmara de ar	5,00	0,74	-	-	0,068		
	Concreto	5,00	1,75	2200	1,00	0,029		
	Aço	0,60	55	7800	0,46	0,000		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
50	Cerâmica	1,07	1,05	2000	0,92	0,010	1,80	169
	Câmara de ar	4,85	0,58	-	-	0,083		
	Cerâmica	1,07	1,05	2000	0,92	0,010		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		

III. Modelos equivalentes de coberturas

(conclusão)

ID	Composição	e (cm)	λ (W/m.°C)	ρ (kg/m ³)	c (kJ/kg.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Ut (W/m ² .°C)	Ct (kJ/m ² .°C)
51	Aço + PU	4,20	0,03	136	1,67	1,333		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	0,55	230
	Concreto	10,00	1,75	2200	1,00	0,057		
52	Aço+PU	4,20	0,03	136	1,67	1,333		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
	Cerâmica	1,59	1,05	2000	0,92	0,015	0,53	176
	Câmara de ar	3,82	0,53	-	-	0,072		
	Cerâmica	1,59	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
53	Aço + PE	4,20	0,04	154	1,42	1,000		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210	0,68	229
	Concreto	10,00	1,75	2200	1,00	0,057		
54	Aço+PE	4,20	0,04	154	1,42	1,000		
	Câmara de ar	25,00	1,19	-	-	0,210		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
	Cerâmica	1,68	1,05	2000	0,92	0,016	0,64	179
	Câmara de ar	3,64	0,46	-	-	0,079		
	Cerâmica	1,68	1,05	2000	0,92	0,016		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
55	Terra argilosa seca	10,00	0,52	1700	0,84	0,192		
	Concreto	10,00	1,75	2200	1,00	0,057	2,18	363
56	Terra argilosa seca	10,00	0,52	1700	0,84	0,192		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
	Cerâmica	1,61	1,05	2000	0,92	0,015		
	Câmara de ar	3,78	0,52	-	-	0,073	1,86	310
	Cerâmica	1,61	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		
57	Terra argilosa seca	40,00	0,52	1700	0,84	0,769		
	Concreto	10,00	1,75	2200	1,00	0,057	0,96	791
58	Terra argilosa seca	40,00	0,52	1700	0,84	0,769		
	Concreto	4,00	1,75	2200	1,00	0,023		
	Cerâmica	1,60	1,05	2000	0,92	0,015		
	Câmara de ar	3,80	0,54	-	-	0,070	0,9	738
	Cerâmica	1,60	1,05	2000	0,92	0,015		
	Argamassa	1,00	1,15	2000	1,00	0,009		