

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Dissertação



**Impacto do método de modelagem de modelagem de pontes térmicas:
estudo em edifício residencial na zona bioclimática 2**

Julye Moura Ramalho de Freitas

Pelotas, maio de 2018

Julye Moura Ramalho de Freitas

**Impacto do método de modelagem de pontes térmicas:
estudo em edifício residencial na zona bioclimática 2**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Linha de Pesquisa: Conforto e Sustentabilidade do Ambiente Construído

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (UFPEL)

Pelotas, maio de 2018

Julye Moura Ramalho de Freitas

**Impacto do método de modelagem de pontes térmicas:
estudo em edifício residencial na zona bioclimática 2**

Dissertação aprovada, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 8 de maio de 2018

Banca examinadora:

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Orientador)

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Antônio Cesar Silveira Baptista da Silva

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Profa. Dra. Celina Britto Correa Doutor em arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, pelo incentivo e por me proporcionarem todas as condições necessárias para que eu concluísse mais esta etapa.

Ao meu orientador, Prof. Eduardo Grala por todo o conhecimento transmitido e por confiar na minha capacidade de trabalho.

Aos professores do PROGRAU pelos conhecimentos transmitidos nas disciplinas.

A Renata e Rui da Universidade de Aveiro, pela ajuda nos cálculos de pontes térmicas e software THERM.

Ao Rodrigo, pela sempre disponibilidade e a ajuda para solucionar qualquer problema.

Aos colegas Laboratório de Conforto e Eficiência Energética – LABCEE, pela convivência diária e troca de conhecimentos.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho.

Muito obrigada.

Resumo

FREITAS, Julye. **Impacto do método de modelagem de modelagem de pontes térmicas: estudo em edifício residencial na zona bioclimática 2**. 2018.116 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

O impacto das pontes térmicas e a sua consideração nos cálculos de transmitância térmica é um assunto que vem sendo discutido em vários países do mundo e em regiões de clima frio do Brasil. A presença de pontos vulneráveis no envelope da edificação pode influenciar no desempenho termoenergético, e ainda, podem trazer consequências a envoltória da edificação, como o favorecimento de condições para formação de fungos filamentosos. Na esfera mundial, vários países já possuem normativas ou regulamentos sobre o assunto, no Brasil, nenhuma das normativas trata desse tema. Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de pontes térmicas de estrutura de concreto armado no desempenho termoenergético de uma edificação residencial na zona bioclimática 2. A modelagem das pontes térmicas no programa de simulação *EnergyPlus* foi configurada considerando cinco abordagens. A abordagem 1 trata a modelagem do edifício como ocorre em um edifício real, separando as pontes térmicas e adotando materiais e transmitâncias térmicas diferentes para ponte térmica na estrutura e para o restante dos fechamentos verticais; a abordagem 2 considera uma modelagem simplificada, por meio de uma parede equivalente, onde os fechamentos horizontais são compostos por um único plano sem diferenciação de materiais e transmitância térmica da parede, como normalmente são modelados os edifícios para simulação computacional, a abordagem 3 considera uma modelagem simplificada, porém com a ponderação entre as áreas de estrutura e fechamentos verticais para configurar a transmitância térmica e capacidade térmica, a abordagem 4 considera uma modelagem por parede equivalente, porém com a transmitância térmica do fechamento horizontal incrementada considerando a ISO 10.211 com a ajuda do software THERM 7.4 considerando a capacidade térmica da cerâmica. A abordagem 5 utiliza os mesmos valores de transmitância adotados para a abordagem 4, porém com as capacidades térmicas do concreto e parede cerâmica ponderadas. Os resultados mostram que o tipo de modelagem influencia nos valores de consumo energético na edificação, as diferentes modelagens podem chegar a uma diferença de consumo de até 13% quando comparada a abordagem que desconsidera as pontes térmicas com as que consideram cálculo de pontes térmicas. O nível de isolamento do envelope também interfere nas diferenças de consumo entre as 5 abordagens.

Palavras-chave: Pontes térmicas; Simulação computacional; Consumo energético; Eficiência energética.

Abstract

FREITAS, Julye. **Study of the Impact of Thermal Bridges on Residential Buildings in the Bioclimatic Zone 2**. 2018. 116 f. Dissertation (Master Degree in Architecture and Urbanism) - Post-Graduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2018.

The impact of thermal bridges and its consideration in calculations of thermal transmittance is a subject that has been discussed in several countries in the world and in regions of cold climate in Brazil. The presence of vulnerable points in the envelope of the building may influence the thermal energy performance, and may also have consequences for the envelopment of the building, such as favoring conditions for the formation of filamentous fungi. Globally, several countries already have standards or regulations on the subject, in Brazil, none of the regulations deals with this topic. This work aims to evaluate the impact of thermal bridges of reinforced concrete structure on the thermal energy performance of a residential building in bioclimatic zone 2. The modeling of the thermal bridges in the EnergyPlus simulation software was configured considering five approaches. Approach 1 treats the modeling of the building as it occurs in a real building, separating the thermal bridges and adopting different materials and thermal transmittance for thermal bridge in the structure and for the rest of the vertical closures; the approach 2 considers a simplified modeling, through an equivalent wall, where the horizontal closures are composed of a single plane with no differentiation of materials and thermal transmittance between structure and wall, as buildings are usually modeled for computational simulation. Approach 3 considers a simplified modeling, but with the weighting between the structural areas and vertical closures to configure thermal transmittance and thermal capacity. Approach 4 considers an equivalent wall modeling, but with the thermal transmittance of the horizontal closure increased considering the ISO 10.211 with the help of THERM 7.4 software, considering the thermal capacity of the ceramic. And the approach 5 uses the same thermal transmittance values adopted for approach 4, but with the thermal capacities of the concrete and ceramic wall weighted. The results show that the type of model influences the values of energy consumption in the building. The different models can reach a consumption difference of up to 13% when compared to the approach that disregards the thermal bridges with those that consider thermal bridge calculation. The level of envelope insulation also interferes with differences in consumption observing the 5 approaches.

Keywords: Thermal bridges; Computer simulation; Energy consumption; Energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de pontes térmicas.....	17
Figura 2- Pontes Térmicas Tridimensionais	18
Figura 3- Pontes Térmicas Pontuais.....	18
Figura 4- Tabela padrão determinação de ponte térmica	26
Figura 5- Ponte térmica plana- Pilar intermediário	27
Figura 6- Ponte térmica plana- Viga	28
Figura 7- Sistemas de medição a) interiores b) exteriores c) interiores globais..	30
Figura 8- Etapas do método	35
Figura 9- Plantas baixas	37
Figura 10- Entrada no software THERM.....	42
Figura 11- Configurações de materiais no software THERM	43
Figura 12- Configuração condições interior- exterior no software THERM	43
Figura 13- Zonas Térmicas	46
Figura 14- Modelagem Abodagem 1	47
Figura 15- Modelagem Abordagem 2, 3, 4 e 5.....	48
Figura 16- Parede equivalente.....	48
Figura 17- Método de análise comportamento térmico das paredes	61
Figura 18- PT1 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	62
Figura 19- PT1 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	63
Figura 20- PT2 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	63
Figura 21- PT2 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	64
Figura 22- PT3 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	64
Figura 23-PT3 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	65
Figura 24- PT4 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	66
Figura 25- PT4 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	66
Figura 26- PT5 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	67
Figura 27- PT5 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	68
Figura 28- PT6 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	69
Figura 29- PT6 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	69
Figura 30- PT7 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas.....	70

Figura 31- PT7 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas	71
Figura 32- PT8 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) fluxo infravermelho	72
Figura 33- PT8 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) fluxo infravermelho	72
Figura 34- Temperaturas abordagem 1 $U=0,39\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	74
Figura 35- Temperaturas abordagem 1 $U= 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	75
Figura 36- Perfil de temperatura em 3 dias abordagem 1 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	76
Figura 37- Perfil de temperatura em 3 dias abordagem 1 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	77
Figura 38- Temperaturas abordagem 2 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	78
Figura 39- Temperaturas abordagem 2 $U=2,49\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	79
Figura 40- Perfil de temperatura em 3 dias $U=0,39\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	80
Figura 41- Perfil de temperatura em 3 dias verão $U= 2,49\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	81
Figura 42- Temperaturas regime estacionário e variável verão $U=0,39\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	82
Figura 43- Temperaturas regime estacionário e variável inverno $U=0,39\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	83
Figura 44- Temperaturas regime estacionário e variável verão $U=2,49\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	83
Figura 45- Temperaturas regime estacionário e variável inverno $U=2,49\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$	84
Figura 46- Consumo energético por usos prédio mais isolado	85
Figura 47- Consumo energético por usos prédio menos isolado.....	86
Figura 48- Consumo de energia total prédio mais isolado.....	87
Figura 49- Consumo de energia total prédio menos isolado	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Precisão dos métodos de determinação de pontes térmicas	25
Tabela 2- Descrição das abordagens de modelagem para simulação	34
Tabela 3- Dados pontes térmicas $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	39
Tabela 4- Dados pontes térmicas $U=2,49 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	40
Tabela 5- Área de paredes	41
Tabela 6- Composição paredes.....	41
Tabela 7- Temperaturas externas- internas THERM	44
Tabela 8- Transmitâncias Térmicas e Capacidades Térmicas Abordagem 1.....	47
Tabela 9- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 2.....	49
Tabela 10- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 3	49
Tabela 11- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 4	50
Tabela 12- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 5	50
Tabela 13- Tipologia e Uso	51
Tabela 14- Agenda de Ocupação.....	52
Tabela 15- Agenda de Iluminação	53
Tabela 16- Composição das paredes abordagem 1 e 2.....	55
Tabela 17- Parede Equivalente $U= 0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ e $U= 2,49 \text{ W/(m}^2\text{K)}$	56
Tabela 18- Configurações dos materiais parede equivalente abordagens 3	57
Tabela 19- Configurações dos materiais parede equivalente abordagem 4	57
Tabela 20- Configurações dos materiais parede equivalente abordagem 5.....	58
Tabela 21- Composição da cobertura	59
Tabela 22- Dados climáticos Camaquã.....	60
Tabela 23- Dados climáticos Pelotas.....	60
Tabela 24- Valores de coeficiente de transmissão linear	73
Tabela 25- Transmitâncias térmicas incrementadas pelo cálculo ISO 10.211	73

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASHRAE: *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning*

BEN: Balanço Energético Nacional

EPBD: *Energy Performance of Buildings Directive*

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO: *International Standard Organization*

NBR: Norma Brasileira Regulamentadora

nZEB: *Nearly Energy Building*

NZEB: *Net Energy Building*

RTQ-R: Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residencial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Apresentação do tema.....	13
1.2. Justificativa	13
1.3. Problema de pesquisa	14
1.4. Objetivos	14
1.4.1. Objetivo Geral	14
1.4.2. Objetivos específicos	14
1.5. Contribuições Esperadas	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Panorama Energético	15
2.2. Pontes Térmicas.....	16
2.3. Pontes Térmicas: metodologias de cálculo simplificadas.....	23
2.3.1. EN ISO 14.683.....	23
2.3.2. Regulamentação Térmica Portuguesa (RCCTE)- metodologia de cálculo simplificada.....	26
2.4. Pontes Térmicas: metodologia de cálculo detalhada ISO 10.211.....	28
2.5. Simulação Computacional	30
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Etapas da pesquisa.....	33
3.2. Definição do objeto de estudo	36
3.3. Cálculo das pontes térmicas.....	38
3.3.1. Definição das pontes térmicas	38
3.3.2. Modelagem pontes térmicas Therm 7.4	41
3.3.3. Aplicação da ISO 10.211.....	44
3.4. Modelagem da Edificação.....	45
3.4.1. Abordagem 1: Construção real.....	46
3.4.2. Abordagem 2: Simplificada	47
3.4.3. Abordagem 3: Simplificada com ponderação de U e CT	49
3.4.4. Abordagem 4: Simplificada com aumento de transmitância.....	49
3.4.5. Abordagem 5: Simplificada com aumento de transmitância e ponderação de CT	50
3.5. Configurações da Simulação Computacional	51
3.5.1. Uso, ocupação e iluminação.....	51

3.5.2.	Materiais e composições dos fechamentos verticais.....	53
3.5.3.	Ventilação natural.....	59
3.5.4.	Sistema de condicionamento artificial.....	59
3.5.5.	Configuração de temperatura do solo.....	60
3.5.6.	Arquivo climático.....	60
3.6.	Método de Análises de resultados: Simulação termoenergética.....	61
3.6.1.	Comportamento térmico das paredes.....	61
3.6.2.	Consumo energético.....	61
4.	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	62
4.1.	Cálculo de Pontes Térmicas.....	62
4.1.1.	Pilares.....	62
4.1.2.	Fachada com cobertura.....	63
4.1.3.	1º pavimento com cobertura térreo.....	64
4.1.4.	Fachada com garagem.....	65
4.1.5.	Fachada com laje 1º pavimento.....	67
4.1.6.	Fachada com laje de pavimento intermediário.....	68
4.1.7.	Fachada com exterior.....	70
4.1.8.	Fachada em contato com o solo.....	71
4.2.	Comportamento térmico das paredes.....	73
4.3.	Consumo energético.....	85
5.	CONCLUSÕES.....	89
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
	APÊNDICE A: Cálculos de transmitância térmica incrementada pelas pontes térmicas.....	94
	APÊNDICE B: Cálculos de parede equivalente.....	95
	APÊNDICE C: Comportamento térmico das paredes na abordagem 3.....	102
	APÊNDICE D: Comportamento térmico das paredes na abordagem 4.....	106
	APÊNDICE E: Comportamento térmico das paredes na abordagem 5.....	110
	Trabalhos Publicados.....	115

1. INTRODUÇÃO

1.1. Apresentação do tema

Com o grande consumo de energia no Brasil, as discussões sobre eficiência energética passaram a ganhar importância, e, a busca por edificações que apresentem melhor desempenho térmico e menor consumo energético é cada vez maior.

A avaliação do desempenho termoenergético é um importante passo para promover o uso de energia eficiente nas edificações. Através dela pode-se verificar previamente o consumo energético e o nível de conforto térmico de um edifício. A maior parte das edificações desperdiça energia para obtenção de conforto ambiental, por não incorporar em seus projetos princípios da arquitetura bioclimática e não utilizar materiais e técnicas construtivas adequadas.

As pontes térmicas são pontos vulneráveis na edificação e a presença delas pode ocasionar consequências no envelope das edificações, como favorecimento das condições para formação de fungos filamentosos além de influenciar no desempenho termoenergético da mesma. O impacto de pontes térmicas é um assunto que já vem sendo discutido em vários países do mundo e principalmente em climas mais frios.

1.2. Justificativa

Além de ser um tema que não é tratado em nenhuma das normas brasileiras de desempenho térmico, as pontes térmicas são um assunto ainda pouco pesquisado no Brasil. Visto que o impacto das pontes térmicas pode trazer consequências para o envelope da edificação, além de afetar no conforto e no consumo energético, é de extrema importância que se ampliem os conhecimentos nesta área, para que futuramente as normas existentes possam ser aprimoradas e para que novas soluções construtivas possam ser desenvolvidas e colocadas em prática, proporcionando edificações com maior nível de conforto térmico e menor consumo de energia.

Para este trabalho, foi escolhido como objeto de estudo foi escolhido como objeto de estudo uma edificação residencial na zona bioclimática 2. Esta zona bioclimática foi escolhida por ser uma das zonas bioclimáticas brasileiras mais frias e por apresentar as estações de inverno e verão bem definidas.

1.3. Problema de pesquisa

O principal problema de pesquisa é caracterizado pelo desconhecimento dos impactos que as pontes térmicas podem ocasionar em uma edificação residencial na zona bioclimática brasileira 2, e se a presença de pontes térmicas será prejudicial ou não para o desempenho termoenergético da mesma.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo Geral

Analisar a influência dos métodos de modelagem das pontes térmicas de estrutura de concreto armado para simulação computacional, no desempenho termoenergético de edificação residencial na zona bioclimática 2, considerando 5 diferentes abordagens de modelagem e analisando dois níveis de isolamento do envelope.

1.4.2. Objetivos específicos

I- Compreender a influência das pontes térmicas de estrutura de concreto armado no comportamento dos fechamentos verticais de uma edificação.

II- Consolidar o conhecimento sobre as normativas ISO 10.211 e ISO 14.683 que abordam o tema pontes térmicas.

III- Avaliar a influência do nível de isolamento do edifício nos impactos das pontes térmicas.

1.5. Contribuições Esperadas

Espera-se que com os resultados da pesquisa ampliem-se os conhecimentos sobre a influência das pontes térmicas no desempenho termoenergético de edificações residenciais na zona bioclimática 2, e que esses resultados contribuam para a construção de edificações com maior eficiência e menor consumo de energia.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Panorama Energético

As edificações consomem 42,8% do consumo de energia elétrica no país, sendo o setor residencial responsável por 21,4% deste, seguido do setor comercial que consome 14,4% de energia e do setor público com 7% de consumo (BEN, 2017). Em uma edificação residencial, considerando uma média entre as regiões do país, os equipamentos são responsáveis por 27% do consumo; 24% é atribuído ao aquecimento de água, 20% ao ar condicionado, 14% à iluminação e 15,5% a outros equipamentos. (LAMBERTS, 2014).

Na Europa, a partir da década de 70, a preocupação com economia de energia e construções mais sustentáveis fez com que vários países aprimorassem os seus códigos de construção. Em 2002, a União Européia fez a primeira publicação do *Energy Performance of Buildings Directive* (EPBD), que tem como objetivo garantir que em todos os estados membros as construções serão *NZEB* (*Net Zero Energy Building*) ou *nZEB* (*nearly Zero Energy Builing*), que significa edifícios com zero consumo de energia e edifícios com consumo próximo de zero, respectivamente. A meta é que até o ano de 2018 novos edifícios públicos deverão ter o consumo próximo a zero e até o final de 2020 essa regra valerá para todas as edificações. Para isso, cada país deverá definir suas metodologias de acordo com as suas condições nacionais, regionais ou locais. (Panagiotidou, 2013).

No Brasil, as discussões sobre eficiência energética começaram a ganhar importância a partir de 2001, com a grave crise no setor energético, que obrigou o país a buscar medidas mais eficientes junto com a racionalização do consumo de energia elétrica. Em outubro de 2001 foi publicada a lei 10.295 (BRASIL, Lei n. 10.295) que definiu políticas nacionais sobre conservação e uso racional de energia no país. Em 19 de dezembro de 2001, entrou em vigor o decreto 4.059, para regular a lei 10.295, e estabeleceu níveis máximos de consumo de energia ou nível mínimo de eficiência energética para as máquinas e equipamentos produzidos ou comercializados no país, bem como as edificações.

As primeiras normas de desempenho térmico surgiram em 2005. A primeira foi a NBR 15.220, que avalia o desempenho térmico de edificações de interesse social e ainda apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro, o qual divide o Brasil em oito zonas bioclimáticas diferentes e estabelece diretrizes bioclimáticas para cada diferente zona do país. Em 2008 foi publicada a primeira versão da NBR 15.575, a qual avalia o desempenho de edificações residenciais e apresenta 13 aspectos a serem considerados durante a análise do edifício residencial.

Nenhuma das normas brasileiras existentes até o momento aborda o tema pontes térmicas e nem as considera nos cálculos de transmitância térmica.

No contexto mundial, as consequências das pontes térmicas em edificações já são consideradas por vários países, e, já existem normas que tratam desse tema. As normas suíças EN ISO 14683 e EN ISO 10211 determinam métodos detalhados para cálculos de pontes térmicas. As normas argentinas IRAM 11630 e IRAM 11605 determinam respectivamente procedimentos para avaliação dos riscos de condensação superficial e valores máximos de transmitância térmica em fechamentos opacos. A norma alemã DIN 4108 aborda assuntos como proteção contra umidade e possibilidade de formação de bolor, métodos de cálculo e orientações para construção. Ainda existe a Regulamentação Térmica Portuguesa (RCCTE) que apresenta métodos de cálculo de pontes térmicas simplificados.

2.2. Pontes Térmicas

De acordo com Pessoa (2011), a envoltória de um edifício possui inúmeras zonas onde ocorrem alterações no nível da geometria dos elementos construtivos e das propriedades dos materiais, alterações na condutividade térmica, que afetam a direção do fluxo de calor e dão origem a fluxos de calor bidimensionais e tridimensionais. São essas zonas da envolvente que constituem as chamadas pontes térmicas.

Segundo a norma EN ISO 10.211 (2007), as pontes térmicas constituem uma parte da envoltória do edifício onde a resistência térmica é modificada por: uma penetração total ou parcial da envolvente do edifício por materiais de

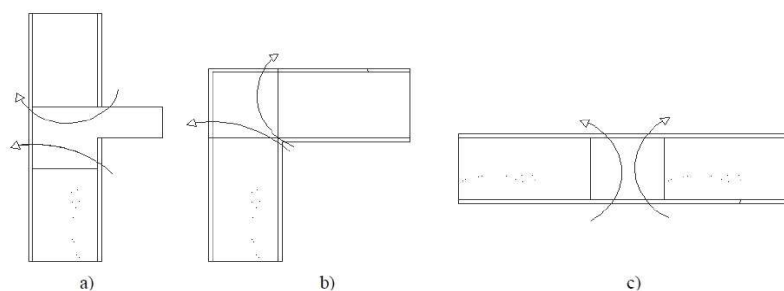
condutividade térmica diferentes; uma mudança na espessura da estrutura ou uma diferença entre as estruturas externas e internas, como por exemplo, nas ligações parede/ piso/ teto. Em todos os casos citados o fluxo de calor busca o caminho no qual a resistência térmica seja menor.

Na figura 1, podemos observar três diferentes tipos de pontes térmicas que podem ocorrer nas edificações:

a) corte vertical de uma ponte térmica ocasionada pela ligação da fachada com a laje;

b) e c) corte horizontal de uma ponte térmica ocasionada pela ligação entre duas paredes verticais com transmitâncias térmicas diferentes.

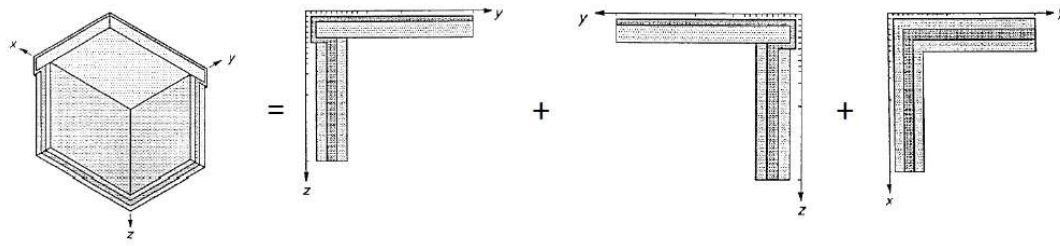
Figura 1- Tipos de pontes térmicas



Fonte: Pessoa (2011)

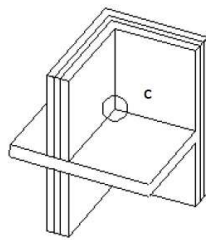
As pontes térmicas ainda podem ser classificadas de acordo com o fluxo de calor percorrido, em três diferentes tipos: tridimensionais, bidimensionais ou pontuais. As pontes térmicas bidimensionais são constituídas pela ligação de dois ou mais elementos construtivos e caracterizam-se por um coeficiente de transmissão linear ($W/m.K$). As pontes térmicas tridimensionais (Figura 2) na maioria das vezes são constituídas pela união de duas pontes térmicas bidimensionais, como por exemplo, a zona dos vértices da envolvente (intersecção de dois elementos planos verticais e um horizontal). As pontes térmicas pontuais (Figura 3) são aquelas cujas três dimensões são da mesma ordem de grandeza, como por exemplo, o vértice de união entre três elementos planos (duas paredes e um pavimento).

Figura 2- Pontes Térmicas Tridimensionais



Fonte: EN ISO 10.211-2 (2001)

Figura 3- Pontes Térmicas Pontuais



Fonte: EN ISO 10.211-2 (2001)

O cálculo de pontes térmicas pode ser feito através dos métodos de cálculo especificados nas normativas que tratam de pontes térmicas, ou também, através de métodos numéricos com a ajuda de softwares especializados. Segundo Oliveira (2013), existem softwares de cálculo automático de pontes térmicas e esses baseiam-se essencialmente na introdução dos dados geométricos 2D ou 3D das pontes térmicas através de interface gráfica. Alguns exemplos de softwares que funcionam através de dados 2D são o THERM® , BISCO® e o PSI-THERM 2D®, etc. E que funcionam através de dados 3D são TRISCO® e o PSI-THERM 3D®.

MARTIN, et. al. (2011) ressaltam a importância do cálculo das pontes térmicas no estudo da transferência de calor nos edifícios, mas que no entanto, as informações sobre o tema ainda são poucas e confusas. A maioria dos países da União Europeia utiliza métodos simplificados para cálculo de pontes térmicas, os quais apresentam cálculos apenas no regime estacionário, o que seria insuficiente devido à importância da inércia do edifício na demanda energética.

EVANS e SCHILLER (2010) ressaltam que uma das principais consequências das pontes térmicas no envelope da edificação, é o favorecimento da condensação superficial. A condensação tem como consequência direta a formação de bolor, e nesses casos as pontes térmicas proporcionam a condensação da umidade nas superfícies dos fechamentos em decorrência da baixa temperatura da superfície estar menor do que a temperatura do ponto de orvalho.

O impacto das pontes térmicas com relação ao consumo energético foi analisado no estudo de CUNHA et. al. (2014), que observou o impacto de pontes térmicas em estruturas de concreto armado no desempenho energético de um edifício hoteleiro para quatro zonas bioclimáticas brasileiras. O estudo concluiu que em edificações com PAFT (percentual de abertura na fachada total) de 30% a 45% a existência de pontes térmicas implica em uma diminuição na estimativa de consumo, que conforme a zona bioclimática pode chegar até 10%. Já no caso de edificações com PAFT de 60%, a não consideração das pontes térmicas na simulação termodinâmica pode representar um aumento de até 4% na estimativa de consumo, dependendo da zona bioclimática analisada.

FREITAS et. al. (2016) avaliaram através de simulação computacional o impacto das pontes térmicas no consumo energético de edificações residenciais de quatro pavimentos nas zonas bioclimáticas brasileiras 1, 2 e 3. Foram avaliadas edificações mais e menos isoladas (com diferentes transmitâncias térmicas) e com diferentes absorptâncias solares. O estudo concluiu que a cor foi a principal influência na alteração do consumo de energia e a variação da transmitância térmica (U), do envelope da edificação, com as variações propostas no trabalho não foi o fator determinante no consumo. Quando a modelagem da edificação para simulação computacional não considerou a presença de pontes térmicas nos fechamentos verticais, para as zonas bioclimáticas 1 e 2, o consumo de energia foi menor, quando comparado aos resultados do modelo simulado onde foram considerados as pontes térmicas. Ao contrário da análise para zona bioclimática 3, que o modelo onde não foram consideradas as pontes térmicas apresentou consumo maior do que o modelo onde as pontes térmicas foram consideradas.

Levinskytė, Geležiūnas e Banionis (2016) fazem uma análise em edifícios de classificação energética “A” na Lituânia, e ressaltam a importância do cálculo das perdas de transmissão lineares através das pontes térmicas. Um projeto de um edifício geminado foi escolhido para analisar a influência das pontes térmicas. O cálculo das perdas de transmissão lineares pelas pontes térmicas foi analisado através do programa THERM. Foram analisadas duas variações diferentes, construções que se assemelham com as construções existentes hoje, uma sem o tratamento e isolamento de pontes térmicas e outra com soluções mais eficazes de isolamento e tratamento de pontes térmicas. Os resultados mostraram que as maiores perdas de calor no edifício se dão através das paredes e pontes térmicas. No prédio com maior eficiência energética e tratamento das pontes térmicas as perdas globais de calor reduziram 10kWh/m².ano, cerca de 20%. Os autores concluíram que as perdas de calor de um prédio projetado sem tratamento de pontes térmicas podem ser revertidas aumentando as camadas de isolamento térmico e utilizando janelas e portas de maior eficiência. Quando um prédio é projetado utilizando soluções eficazes para pontes térmicas lineares, a eficiência energética do edifício pode ser alcançada com menos camadas de isolamento e portas e janelas com comportamento térmico inferior.

Theodosiou e Papadopoulos (2008) realizaram um estudo por meio de simulação computacional referente ao impacto de pontes térmicas em edifícios típicos da arquitetura grega construídos com paredes de tijolo duplo, que geralmente utilizam um isolamento parcial do que é previsto nos regulamentos de desempenho. Os autores comentam que apesar do isolamento térmico exigido pelos regulamentos, as pontes térmicas ainda continuam sendo um ponto fraco das edificações e concluem que as paredes de tijolo duplo, amplamente utilizadas na Grécia, são suscetíveis a pontes térmicas. Levando em consideração que os edifícios construídos nos últimos 20 anos são parcialmente isolados e não consideram o cálculo das perdas térmicas reais ocasionadas pelas pontes térmicas, as perdas térmicas podem ser até 35% maiores do que o estimado pela metodologia utilizada, sem considerar as pontes térmicas. Mesmo quando utilizado um sistema melhor de isolamento nas edificações, os gastos com aquecimento, quando calculados pela metodologia que não leva em consideração cálculos de pontes térmicas, é 30%

maior, mostrando que o quadro legislativo é insuficiente e pode levar a uma subestimação significativa no consumo real de energia.

Ge, McKlun e Zhang (2013) fazem um estudo, através de simulação computacional, sobre o impacto de pontes térmicas em varandas no desempenho térmico global de edifícios com várias unidades em Toronto, no Canadá. Foi comparado o desempenho de varandas sem tratamento de pontes térmicas e com tratamento de pontes térmicas através de uma ruptura térmica/separador de varanda. Os resultados mostram que através da introdução da ruptura térmica o valor da transmitância global da varanda é reduzido em 72-85% e a temperatura mínima da superfície do piso é aumentada de 6.1°C para 12.5°C, o que é importante no ponto de vista do conforto do usuário. A avaliação do consumo energético, foi realizada através de simulações de um piso típico utilizando o programa eQuest. Todos os resultados mostram que com a utilização da ruptura térmica em lajes de varanda, o consumo de energia para aquecimento pode ser reduzido de 5 a 13% e para refrigeração menos de 1%.

O efeito dinâmico de pontes térmicas em um edifício residencial de baixa altura foi avaliado por Ge e Baba (2015). As avaliações foram feitas através de simulação computacional com três diferentes tipos de modelagem, para um prédio com pouco isolamento e outro bastante isolado e para o clima quente e clima frio. Os três diferentes métodos utilizados foram nomeados como: método do valor U-equivalente, o qual utiliza o programa *THERM* para o cálculo da transmitância efetiva das pontes térmicas; o método da parede equivalente que representa as pontes térmicas por uma estrutura multi camadas 1D, que tem as mesmas características termodinâmicas que os complexos sistemas de pontes térmicas e o método de modelagem dinâmica 3D direta, através do programa *WUFI Plus*, que é capaz de modelar as pontes térmicas diretamente. As simulações mostraram que para o clima frio a carga de aquecimento anual desse edifício com inclusão de pontes térmicas através da modelagem dinâmica 3D é 8 a 13% maior do que a do modelo usando o método U-equivalente, e 4 a 9% maior do que o modelo usando o método de parede equivalente, e com o aumento do isolamento o efeito percentual das pontes térmicas na carga de aquecimento aumenta e a diferença entre os casos diminui. Para o clima quente, a presença de pontes térmicas aumenta a carga

anual de refrigeração em 20%. Comparando o modelo dinâmico 3D, a carga de resfriamento anual é subestimada em 17% usando o método de U-equivalente e em 14% no método de parede equivalente.

Ascione et al. (2012), analisa o efeito de diferentes estratégias de modelagem na simulação computacional, para uma ponte térmica de telhado em um edifício de escritórios típico da arquitetura europeia na Itália. A análise foi feita para quatro regiões com climas diferentes na Itália e três diferentes abordagens na modelagem para simulação foram consideradas: (a) um esquema simplificado considerando uma estrutura homogênea equivalente, (b) uma subdivisão detalhada em camadas “em série” e “paralelas” e (c) modelo real da estrutura elaborado através de estudos da dinâmica de fluidos computacional. Os resultados para as quatro diferentes regiões da Itália mostram uma grande diferença na demanda de energia dependendo do tipo de modelagem utilizada para simulação. As simulações mostraram que quando o prédio foi modelado considerando as pontes térmicas, a demanda de energia para aquecimento no inverno apresentou comportamento diferente, 20% menor quando comparada aos modelos simplificados para Palermo (sul da Itália) e em torno de 13,5% menor em Turim (norte da Itália), por outro lado, o desempenho no verão apresentou poucas variações com a mudança na modelagem do telhado.

Segundo WASSOUF (2014), o efeito das pontes térmicas pode ser evitado através da utilização de isolamento térmico contínuo em toda a envoltória da edificação e a utilização de elementos com condutividade térmica baixa nos pontos de ruptura.

FRIESS et. al. (2012), investigaram o impacto de pontes térmicas estruturais de concreto armado em clima quente. O objeto de estudo é uma edificação unifamiliar em Dubai com a envoltória composta por blocos isolados e uma armação de concreto armado. Os autores utilizaram o software *EnergyPlus* por meio da modelagem da edificação com subsuperfícies para considerar as pontes térmicas e analisaram os efeitos no consumo de energia usando diferentes soluções de isolamento para minimizar o efeito das mesmas. Os resultados mostraram que quando a estrutura de concreto não possui isolamento (caso base), as perdas por pontes térmicas podem representar um

consumo de energia 24,5% maior quando comparada com a mesma edificação utilizando um isolamento de 50mm de EPS sobre a estrutura e o bloco de concreto. Os autores também concluíram que isolar apenas a moldura de concreto, que seria uma opção mais simples e econômica, já é suficiente para uma economia energética de 23% em relação ao caso base. E ainda, se for feito um retrofit com 160mm de EPS a economia de energia pode chegar até 30%.

2.3. Pontes Térmicas: metodologias de cálculo simplificadas

Martin et. al. (2011) estudaram os problemas nos cálculos de pontes térmicas em condições dinâmicas e afirmam que apesar de existirem métodos de cálculo detalhados, a maioria dos países da União Europeia utiliza métodos de cálculo simplificados para determinação de pontes térmicas. Esses modelos simplificados baseiam-se em:

- (a) Adicionar a parte homogênea do envelope um aumento de transmitância térmica (U) dependendo do tipo de ponte térmica, considerando assim um fluxo de calor adicional para a parte homogênea da parede. Países como Irlanda, Alemanha e Holanda utilizam esse método.
- (b) Limitar o valor da transmitância térmica linear ($máx$) dependendo do tipo de ponte térmica, isso irá limitar o fluxo de calor adicionado em uma solução construtiva devido a ponte térmica. Dinamarca, Noruega e França utilizam esse método.
- (c) Fazer um cálculo unidimensional da transmitância térmica da ponte térmica e ponderar com a área remanescente do elemento homogêneo. Método utilizado na Espanha.

2.3.1. EN ISO 14.683

A normativa internacional EN ISO 14.683 (2007) apresenta métodos de cálculo simplificados para determinar perdas de calor através de pontes térmicas lineares que ocorrem nas ligações entre os diferentes elementos constituintes da envolvente dos edifícios.

De acordo com a norma EN ISO 14.683 (2007) a taxa de fluxo de calor que atravessa a envolvente do edifício entre os ambientes interior e exterior com temperaturas θ_1 e θ_2 , respectivamente é determinada usando a expressão seguinte:

$$Q = H_t \cdot (\theta_i - \theta_e) [W] \quad \text{Equação 01}$$

Onde:

H_t - coeficiente de transferência térmica global (W/K);

$(\theta_1 - \theta_2)$ - diferença entre as temperaturas do ambiente interior e do ambiente exterior (K).

O coeficiente da transmissão global H_t é determinado através do seguinte somatório:

$$H_t = H_D + H_g + H_u [W/K] \quad \text{Equação 02}$$

Em que:

H_D - coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente do edifício (W/K);

H_g - coeficiente de transmissão térmica unitário do solo (W/K);

H_u - coeficiente de transmissão térmica unitário de espaços não ventilados (W/K).

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente consideram-se as pontes térmicas, conforme equação 03.

$$H_D = \sum_i A_i \times U_i + \sum_k l_k \times \psi_k + \sum_j \chi_j$$

Equação 03

Onde:

A_i - área do elemento i da envolvente do edifício (m²);

U_i - é a transmitância térmica do elemento i da envolvente do edifício (W/m².K);

l_k - é o comprimento da ponte térmica linear k (m);

ψ_k - é a transmitância térmica linear da ponte térmica linear k (W/m.K);

χ_j - é a transmissão térmica pontual da ponte térmica pontual j (W/K).

A norma EN ISO 14.683 (2007) caracteriza que as transmitâncias térmicas lineares ocorrem nos seguintes locais das edificações: junções entre elementos externos (cantos de paredes, paredes com coberturas e paredes

com pisos); nas junções de paredes internas com paredes externas e telhados; e nas junções de pisos intermediários com paredes; nos pilares em paredes externas; em torno de portas e janelas. De acordo com Pessoa (2011) na maior parte dos casos, as pontes térmicas pontuais, na medida em que resultam da intersecção de pontes térmicas lineares, podem ser desprezadas e o termo envolvendo a ponte térmica pontual pode ser omissa da equação. No entanto, se houver um número significativo de pontes térmicas pontuais, os coeficientes de transmissão térmica pontuais devem ser calculados com base na norma EN ISO 10.211 (2007).

A transmitância térmica linear (ψ) pode ser determinada com base em: cálculos numéricos; catálogos de pontes térmicas; cálculos manuais; valores padrão. A norma EN ISO 14683 (2007) caracteriza a precisão dos métodos para a determinação de pontes térmicas, que estão apresentadas na Tabela 1.

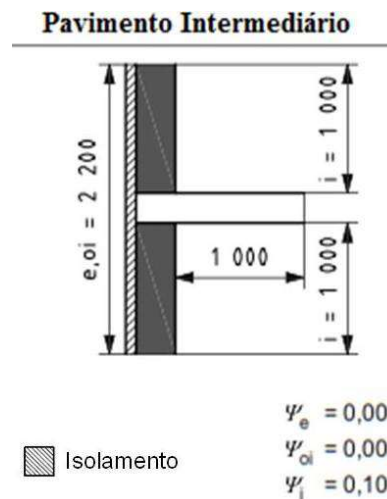
Tabela 1- Precisão dos métodos de determinação de pontes térmicas

Método de determinação da ponte térmica	Precisão
Cálculo Numérico	+5%
Catálogos	+20%
Cálculo Manual	+20%
Valor Padrão	0 a 50%

Fonte: EN ISO 14.683 (2007)

O anexo A, da norma EN ISO 14.683 (2007), apresenta tabelas de valores padrão de transmitância térmica linear de pontes térmicas (ψ). As tabelas contêm exemplos de detalhes construtivos, associados a parâmetros fixos de dimensão e materiais. A Figura 4 mostra um exemplo de detalhe construtivo com (ψ) padrão apresentado na tabela A.2 da norma.

Figura 4- Tabela padrão determinação de ponte térmica



Fonte: adaptado EN ISO 14.683 (2007)

2.3.2. Regulamentação Térmica Portuguesa (RCCTE)- metodologia de cálculo simplificada

Segundo Pessoa (2011) para a caracterização do desempenho energético dos edifícios, o RCCTE (Regulamento das Características do Comportamento Térmico dos Edifícios) apresenta dois parâmetros fundamentais: necessidades de aquecimento e necessidade de arrefecimento. A análise da influência das pontes térmicas no balanço global higrotérmico do edifício é feita pelo cálculo de carga térmica de aquecimento.

Em relação ao cálculo transmitância térmica da envolvente do edifício, o RCCTE (Decreto - Lei nº80/2006) não inclui no seu somatório as perdas de calor ocorridas pelas pontes térmicas pontuais, ao contrário da norma EN ISO 14683 (2007):

$$H_D = \sum_i A_i \times U_i + \sum_{ki} A_i \cdot U_i \cdot \tau_i + \sum_k l_k \times \psi_k \quad [W/K]$$

Equação 04

Onde:

A_i é a área do elemento i da envolvente do edifício (m^2);

U_i é transmitância térmica do elemento i da envolvente do edifício ($W/m^2.K$); τ

τ_i é o coeficiente de redução das perdas térmicas associadas aos locais não aquecidos;

l_k é o comprimento da ponte térmica linear k (m);

ψ_i é o coeficiente de transmissão térmica linear da ponte térmica linear k (W/m.K).

Pessoa (2011) ainda afirma que com o intuito de minimizar o risco de ocorrência de condensações superficiais e as consequentes patologias (bolor, manchas e corrosão), o RCCTE impõe duas exigências que se aplicam ao valor admissível da respectiva transmitância térmica:

a) não pode ser superior aos valores máximos definidos na zona corrente da parede, conforme Figura 5.

$$U_3 \leq U_{máx} \text{ e } U_2 \leq U_{máx}$$

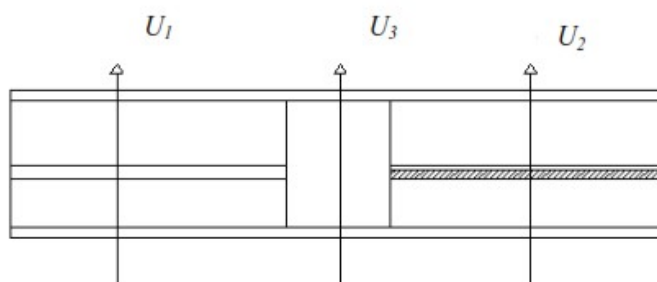
Equação 05

b) não pode ser superior ao dobro do valor de “U” da zona corrente da parede na qual a ponte térmica se insere, conforme Figura 6.

$$U_3 \leq 2 \times U_i \text{ e } U_2 \leq 2 \times U_l$$

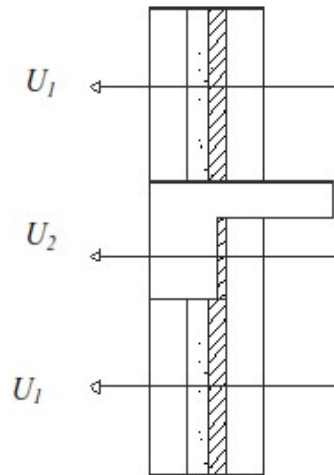
Equação 06

Figura 5- Ponte térmica plana- Pilar intermediário



Fonte: Pessoa (2011)

Figura 6- Ponte térmica plana- Viga



Fonte: Pessoa (2011)

2.4. Pontes Térmicas: metodologia de cálculo detalhada ISO 10.211

Segundo a normativa ISO 10.211 o coeficiente de transmissão térmica das pontes térmicas (ψ) é determinado pela Equação 5.

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^{Ni} . U_i . l_i$$

Equação 07

Onde:

L_{2D} é o coeficiente de transmissão térmica do detalhe construtivo obtido através do elemento 2D do elemento i de separação dos ambientes (interior e exterior) considerados (W/K);

U_i é a transmitância térmica superficial segundo uma dimensão do elemento i que separa dois meios (W/m²K);

l_i é o comprimento dentro do modelo geométrico 2D sobre o qual se aplica U (m);

O parâmetro L_{2D} também pode ser representado pela Equação 8:

$$L_{2D} = \frac{\phi_g}{\Delta T}$$

Equação 08

Onde:

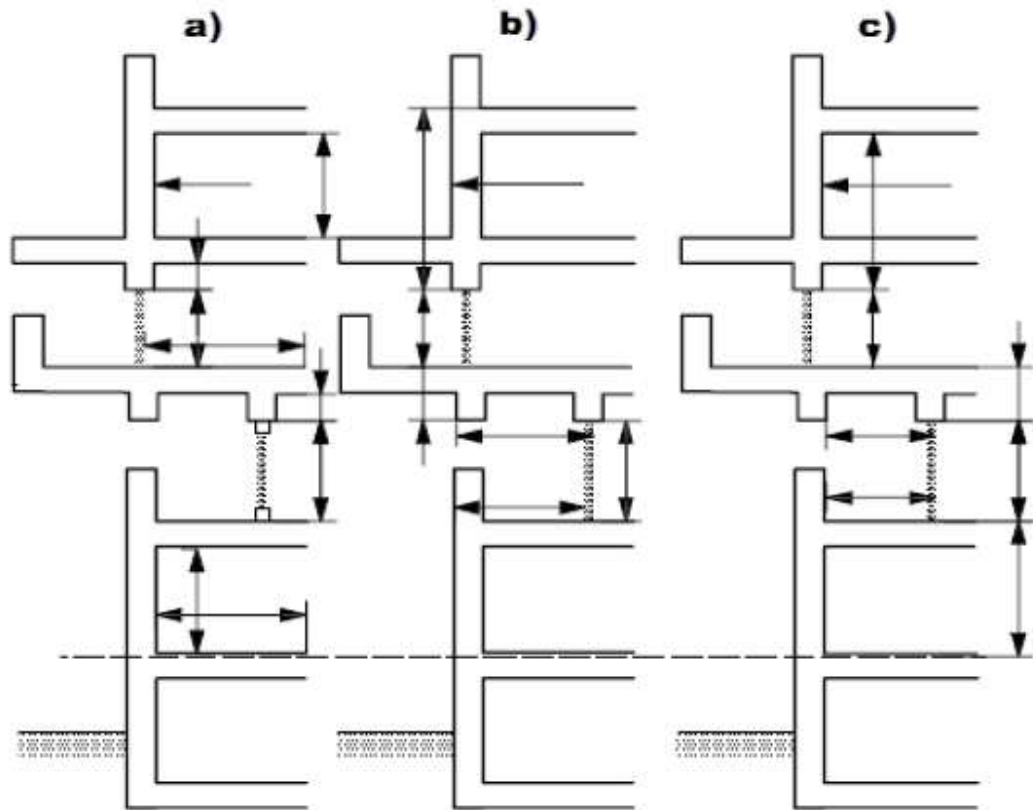
ϕ_g é o fluxo de calor global por comprimento (W/m)

ΔT é a diferença de temperatura entre o interior e exterior do ambiente (em graus K)

O fluxo de calor global por comprimento pode ser obtido através de cálculos manuais, porém é preferível esta resolução através de programas de modelagem 2D automáticos, garantindo menor esforço e maior precisão de cálculo. O programa THERM 7.4, que é descrito na metodologia pode ser utilizado para esse tipo de cálculo.

Segundo Oliveira (2013), a medição do comprimento li pode ser feita utilizando três sistemas de dimensões diferentes, interiores, interiores globais e exteriores, desde que o mesmo sistema seja utilizado de forma consciente para todo o edifício. Os valores de transmitância térmica linear dependerão do sistema utilizado, no entanto, o coeficiente de transmitância térmica total será o mesmo, se todas as pontes térmicas do edifício forem consideradas. A Figura 7 ilustra os três diferentes de medição: interior, exterior e interiores global.

Figura 7- Sistemas de medição a) interiores b) exteriores c) interiores globais



Fonte: Oliveira (2013) adaptado de EN ISO 13.789 (2007)

2.5. Simulação Computacional

Hansen e Lamberts afirmam:

“Simulação computacional é uma das mais poderosas ferramentas de análise no nosso mundo na atualidade – ela é utilizada para simular tudo, desde jogos, crescimento econômico até problemas de engenharia”
“Predizer e analisar antecipadamente o comportamento futuro do edifício é muito mais eficiente e econômico do que resolver problemas quando o edifício está na fase de uso.”

Portanto, é possível dizer que a simulação que objetiva compreender e comprovar a eficácia de um sistema qualquer, para melhorar conforto térmico do ambiente existente, é a maneira mais barata e eficiente de determinar se o

mesmo funciona. Isso ainda auxilia na escolha de determinada solução, considerando custos com energia, por exemplo.

MELO (2007) afirma que a utilização de ferramentas computacionais pode ocorrer tanto na fase de projeto como durante a construção da edificação. A facilidade de manipulação das variáveis envolvidas na edificação, o baixo custo e a otimização do tempo, contribuem ainda mais para a utilização dos programas de simulação computacional.

O programa DOE-2.1E, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA para a ASHRAE, é uma ferramenta de apoio às normas por ela desenvolvidas. Tal software analisa o desempenho energético e as operações de custo de ciclo de vida de edificações. (Department Of Energy, 2012). Os criadores dos programas BLAST e DOE-2.1E desenvolveram um terceiro programa, o *EnergyPlus*, o qual une as potencialidades dos dois anteriores. Pereira (2015) diz que o *EnergyPlus* é um dos programas de simulação de edificações mais utilizados no mundo. Ele foi desenvolvido para estimar trocas térmicas, índices de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento.

O programa *EnergyPlus* opera de acordo com as normas ASHRAE 90.1 (2016) e ASHRAE 140 (2004). Seu download pode ser feito gratuitamente pelo site do programa, junto com mais de dois mil arquivos climáticos de todo o mundo. Apesar de ser uma das ferramentas computacionais de desempenho termoenergético com ampla aceitação pelos pesquisadores, ainda é considerada uma ferramenta pouco amigável.

O programa *DesignBuilder* surge como uma ferramenta gráfica para modelagem de edificações, que utiliza o programa *EnergyPlus* para a realização dos cálculos de simulações computacionais. Segundo Costa (2013), o programa *DesignBuilder* facilita a modelagem e configuração dos modelos, o que no *EnergyPlus* ocorre de maneira mais complexa.

Menezes (2006) afirma que o mais importante a ser considerado em programas de simulação são a precisão dos resultados e sua eficiência, já que nem sempre é possível conciliar a esses fatores uma redução de complexidade dos problemas. O autor faz uma descrição e análise de 8 diferentes softwares

que avaliam desempenho térmico e uma exposição mais aprofundada do já mencionado *EnergyPlus*.

Os autores acima citados dão um apanhado geral no panorama brasileiro. É sabido que muitos outros recursos estão disponíveis no mercado, com desempenho superior, inferior e mesmo equivalente. O presente trabalho utilizou o software *EnergyPlus* versão 8.4 para as simulações computacionais.

3. METODOLOGIA

3.1. Etapas da pesquisa

O trabalho utiliza a simulação computacional como estratégia de pesquisa. O método foi dividido em quatro grandes etapas, conforme a Figura 8. Na primeira etapa foi realizada uma revisão de literatura sobre o tema pontes térmica e metodologias de cálculo de pontes térmicas. Na segunda etapa foi definida a edificação a ser estudada. Na terceira etapa foram localizadas as pontes térmicas da edificação e calculadas de acordo com a metodologia de cálculo da normativa ISO 10.211 com o auxílio do software Therm 7.4. Na quarta etapa foram realizadas as simulações computacionais das 5 diferentes abordagens com o software *EnergyPlus 8.4*, e na quinta e última etapa foram analisados os resultados.

Para facilitar o entendimento do fluxograma da pesquisa as cinco abordagens de modelagem das pontes térmicas para a simulação computacional são caracterizadas de forma sucinta na Tabela 2 abaixo.

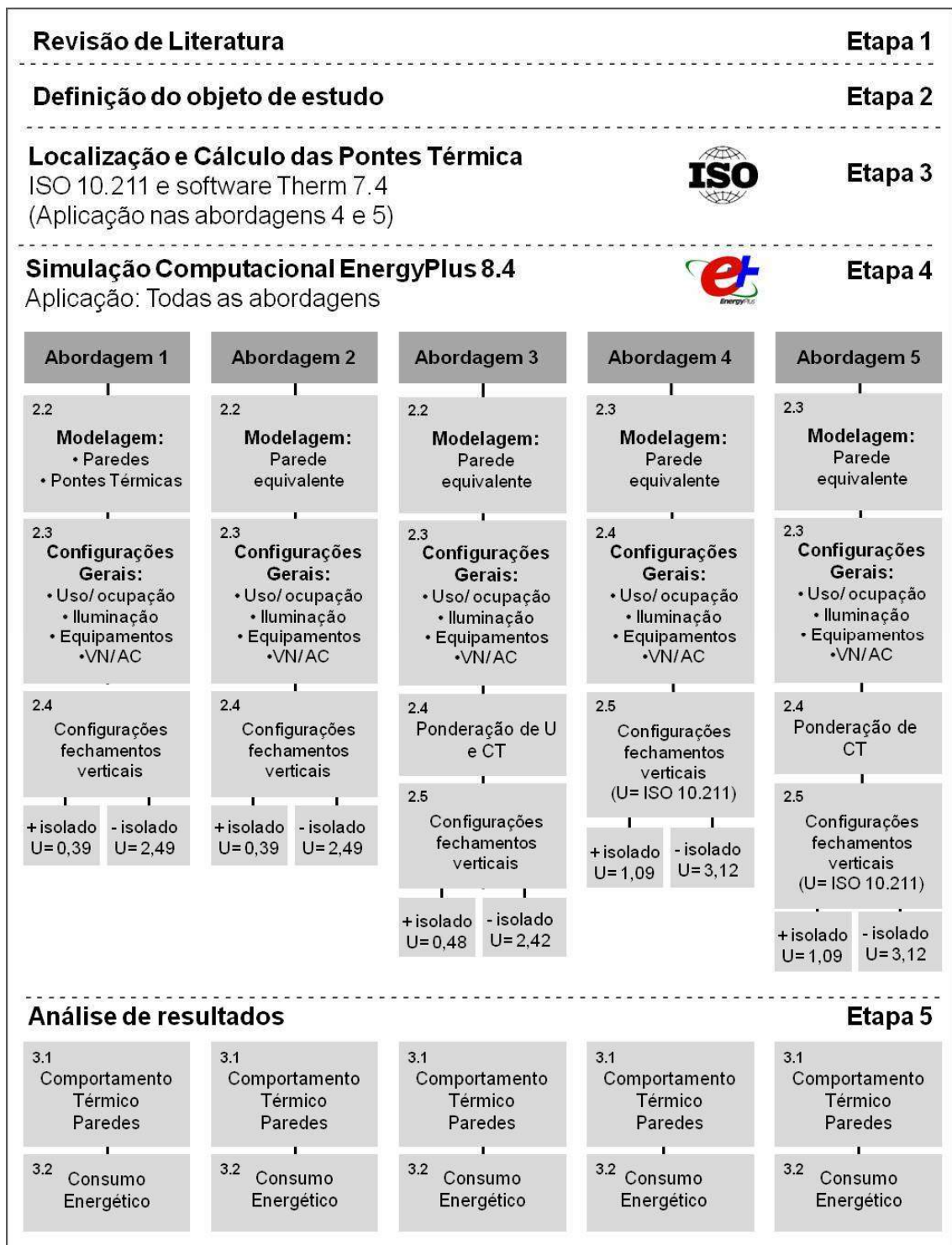
Tabela 2- Descrição das abordagens de modelagem para simulação

Abordagem	Descrição da modelagem
Abordagem 1	Modelagem por meio do comando “New construction stub” com separação dos materiais de estrutura e fechamentos verticais
Abordagem 2	Método tradicional de simulação computacional, modelagem por meio de parede equivalente e considerando toda a parede com um único material: tijolo cerâmico, o material da estrutura é ignorado. Esta abordagem pode ser considerada como uma abordagem sem pontes térmicas.
Abordagem 3	Método tradicional utilizado na abordagem 2, porém com a ponderação da transmitância térmica e capacidade térmica pelas áreas de parede de alvenaria e estrutura de concreto chegando-se a novos valores de U e CT
Abordagem 4	Cálculo de pontes térmicas de acordo com a ISO 10.211 chegando-se a novos valores de transmitância térmica. A capacidade térmica considerada nesta abordagem é a da cerâmica.
Abordagem 5	Cálculo de pontes térmicas de acordo com a ISO 10.211 chegando-se a novos valores de transmitância térmica, como na abordagem 4, porém com a capacidade térmica ponderada entre as áreas da parede de alvenaria e estrutura de concreto.

Fonte: autor

Essa discussão será retomada na caracterização do método de pesquisa, no item 3.4 Modelagem da edificação.

Figura 8- Etapas do método



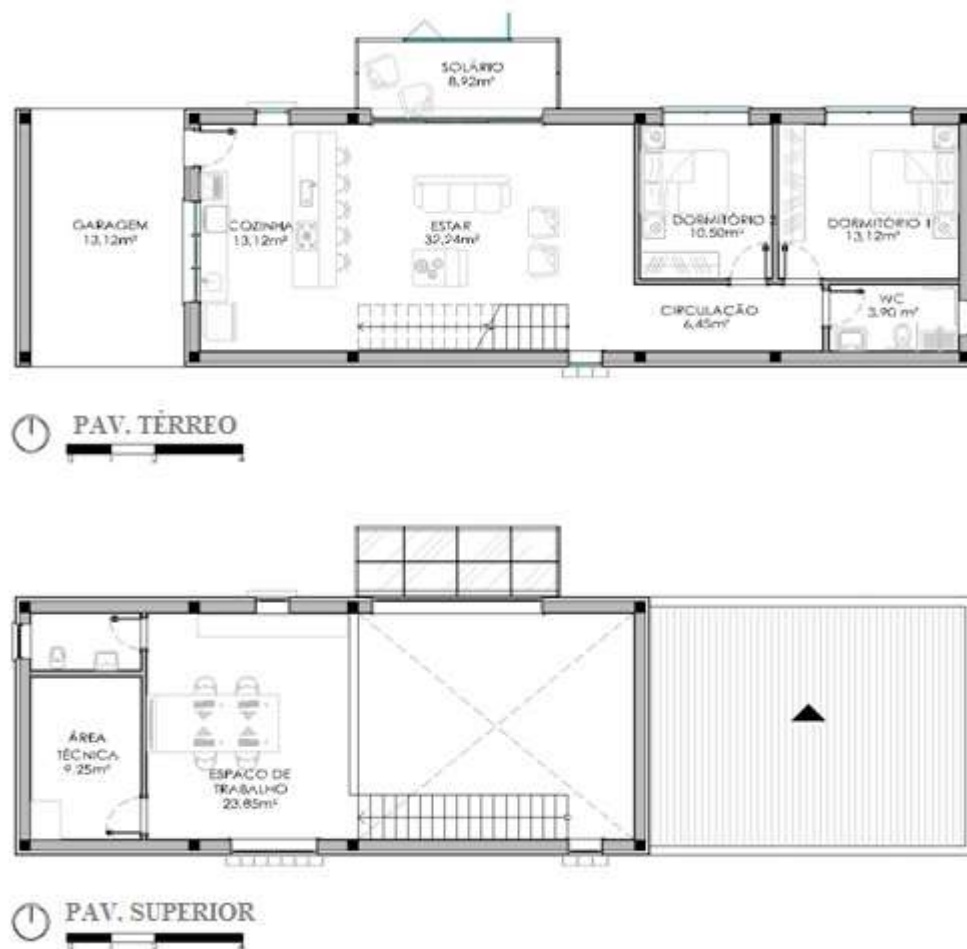
Fonte: autor

3.2. Definição do objeto de estudo

Foi escolhido como objeto de estudo o projeto arquitetônico de uma edificação desenvolvido na pesquisa “CASA BIOCLIMÁTICA NZEB E QUALIDADE DO LUGAR: Entrelaçando experiências entre Portugal e Rio Grande do Sul/ Brasil”. O projeto, Figura 9, trata-se de uma edificação residencial desenvolvida por DALBEM (2015), projetada para atender aos critérios de uma *Passive House*, embora neste trabalho as transmitâncias térmicas de paredes externas tenham sido alteradas.

O projeto utiliza algumas estratégias, como a implantação no eixo leste-oeste para maximizar os ganhos solares no inverno, maior percentual de janelas orientadas para norte, proteção solar nas esquadrias, entre outras. Está distribuído em 126,45m² de área total, dividido em dois pavimentos. No térreo ficam localizados a cozinha e sala de estar integrados, solário, dois dormitórios e banheiro. No pavimento superior estão localizados a área de trabalho, área técnica e lavabo.

Figura 9- Plantas baixas



Fonte: Dalbem (2015)

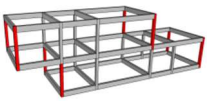
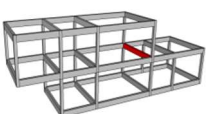
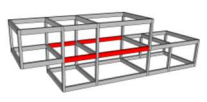
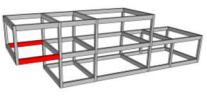
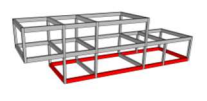
Para o estudo optou-se por analisar a edificação considerando dois casos distintos de isolamento da envoltória utilizando como base as transmitâncias térmicas: $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (caso 1), valor próximo ao utilizado por DALBEM (2018) para nível de isolamento ótimo para uma habitação de interesse social na zona bioclimática 2 e de $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ (caso 2) valor próximo do valor limite para atender a NBR 15.575 em zonas mais frias ($2,50 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) afim de analisar um prédio com menos isolamento. Estes valores de transmitância térmica serviram como base e foram sendo alterados conforme a abordagem de modelagem em estudo. As transmitâncias térmicas utilizadas em cada abordagem estão especificadas no item 3.4 do método: modelagem da edificação, os materiais e composições dos fechamentos estão especificados no item 3.5 do método: configurações da simulação computacional.

3.3. Cálculo das pontes térmicas

3.3.1. Definição das pontes térmicas

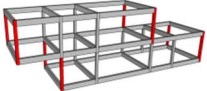
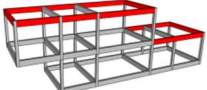
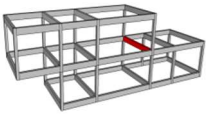
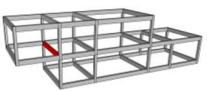
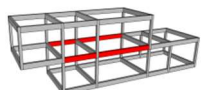
Na edificação residencial que está sendo analisada, foram encontrados 8 diferentes tipos de pontes térmicas na estrutura. As Tabelas 2 e 3 ilustram os diferentes tipos de pontes térmicas, a localização na edificação, a área total e o comprimento total de cada tipo, para quando a transmitância térmica das paredes externas foi considerada $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, prédio mais isolado e mais denso (Tabela 2) e para quando a transmitância térmica for considerada $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, prédio menos isolado e mais leve (Tabela 3). A Tabela 4 caracteriza a área de paredes em cada fachada da edificação, e a Tabela 5 apresenta a composição das paredes com as transmitâncias térmicas base $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

Tabela 3- Dados pontes térmicas $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Nome	Imagem	Localização	Área Total (m ²)	Comprimento Total (m)
PT1		Pilares	7,224	25,80
PT2		Fachada com cobertura	22,10	51,66
PT3		1º pav. com cobertura pav. térreo	2,04	5,11
PT4		Fachada com garagem	2,04	5,11
PT5		Fachada (garagem) com laje de primeiro pav.	2,04	5,11
PT6		Fachada com pav. intermediário	7,63	19,08
PT7		Fachada com exterior	2,86	7,16
PT8		Fachada em contato com solo	10,74	42,97

Fonte: autor

Tabela 4- Dados pontes térmicas $U=2,49 \text{ W/(m}^2/\text{K)}$

Nome	Imagem	Localização	Área Total (m ²)	Comprimento Total (m)
PT1		Pilares	3,35	25,80
P2		Fachada com cobertura	23,17	57,94
PT3		1º pav. com cobertura pav. térreo	2,16	5,41
PT4		Fachada com garagem	2,16	5,41
PT5		Fachada (garagem) com laje de primeiro pav.	2,16	5,41
PT6		Fachada com pav. intermediário	7,99	19,96
PT7		Fachada com exterior	2,98	4,46
PT8		Fachada em contato com solo	11,23	45,07

Fonte: autor

Tabela 5- Área de paredes

Fachada	Área de paredes (m²)	
	U= 0,39 W.(m²/K)	U= 2,49 W.(m²/K)
Sul	76,65	80,19
Norte	64,84	68,15
Leste	26,56	28,12
Oeste	26,56	28,12
TOTAL	194,61	204,66

Fonte: autor

Tabela 6- Composição paredes

Transmitância Térmica (U) W.m²/K	Composição Parede	Espessura (m)	Composição Ponte Térmica	Espessura (m)
0,39	Reboco externo	0,02	Concreto	0,28
	EPS	0,03		
	Tijolo Cer. 6 furos	0,10		
	Câmara de ar	0,05		
	Tijolo Cer. 6 furos	0,10		
	Reboco Interno	0,02		
2,49	Reboco externo	0,025	Concreto	0,13
	Tijolo Cer. 4 furos	0,095		
	Reboco Interno	0,025		

Fonte: autor

3.3.2. Modelagem pontes térmicas Therm 7.4

O software THERM foi desenvolvido pelo Laboratório Nacional Lawrence Berkeley (LBNL) para estudos do fenômeno de transferência de calor,

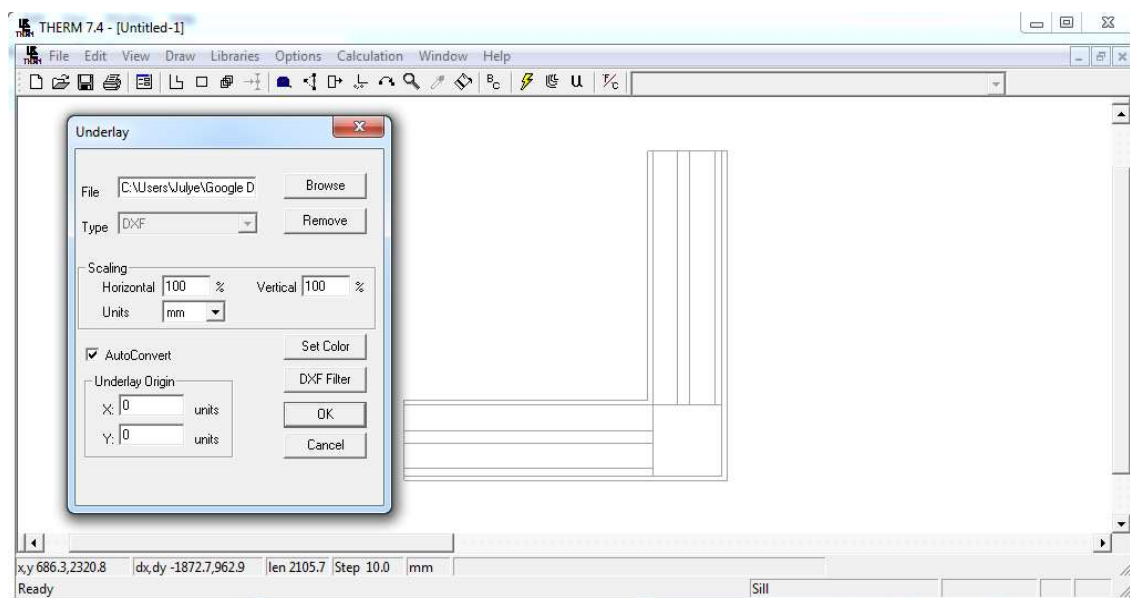
baseando-se no método de elementos finitos. O algoritmo utilizado pelo programa cumpre com os requisitos da normativa ISO 10.211(2007) e permite uma análise térmica bidimensional de qualquer detalhe construtivo como paredes, janelas, fundações, telhados, entre outros (OLIVEIRA, 2013).

Neste trabalho o programa foi utilizado para que se pudesse encontrar o fluxo de calor global por comprimento (ϕg) em pontos da edificação com a presença de pontes térmicas.

Para modelagem de pontes térmicas, o software solicita como dados de entrada o desenho do detalhe construtivo a ser analisado, as camadas e espessuras dos diferentes materiais assim como as condutividades térmicas, a temperatura do exterior e interior e as resistências superficiais.

O detalhe construtivo pode ser previamente desenhado em outros programas de desenho e importado para o THERM, utilizando o formato DXF. Neste trabalho os detalhes construtivos foram desenhados no software *AutoCAD* e logo após importados para o THERM. A Figura 10 mostra um exemplo de entrada no programa de um dos detalhes construtivos analisados.

Figura 10- Entrada no software THERM

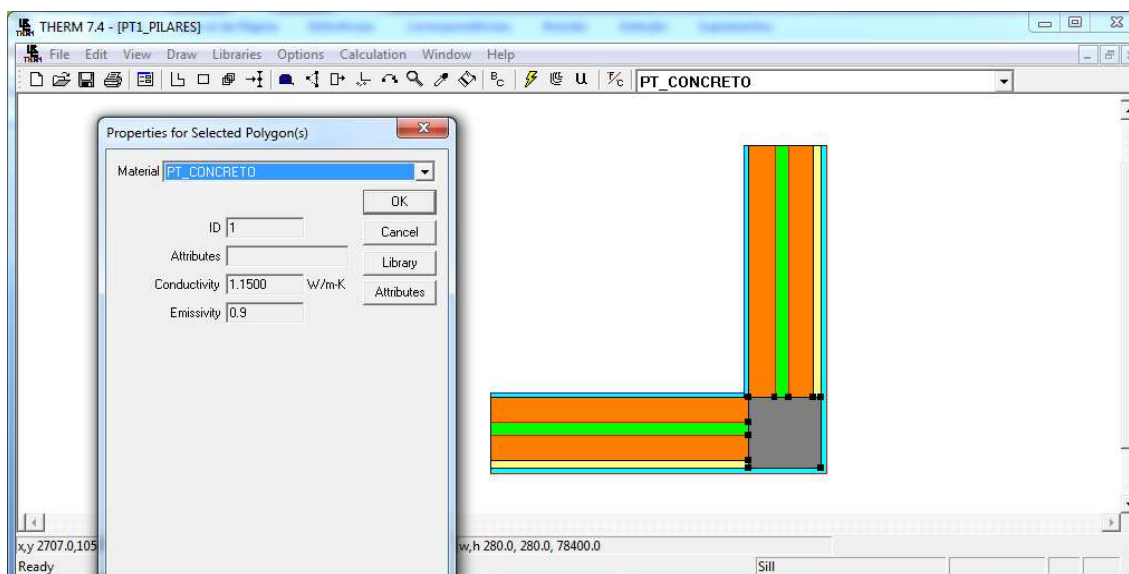


Fonte: autor

Logo após, são configuradas as características térmicas dos diferentes materiais que compõe o detalhe construtivo em análise. O programa solicita dados de condutividade e emissividade dos diferentes materiais (Figura 11).

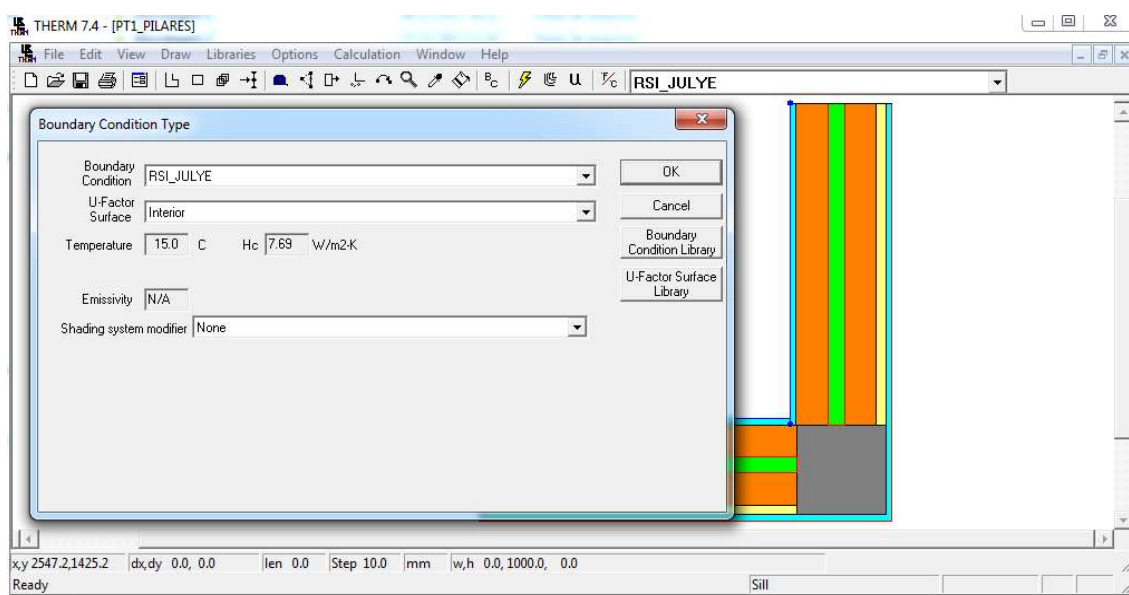
Na etapa seguinte são configuradas as condições do ambiente exterior e interior (Figura 12). Para este trabalho adotou-se como temperatura externa a temperatura mais baixa do dia típico de projeto no inverno (14 de junho), e para temperatura interna foi adotada a média ponderada entre as temperaturas internas das zonas térmicas no dia típico de inverno. Para isso foi realizada uma simulação prévia solicitando os dados de temperatura operativa das zonas. As temperaturas utilizadas estão especificadas na Tabela 6.

Figura 11- Configurações de materiais no software THERM



Fonte: autor

Figura 12- Configuração condições interior- exterior no software THERM



Fonte: autor

Após todas as configurações realizadas, o software faz o cálculo da distribuição de fluxos de calor e temperaturas em regime estacionário do detalhe em análise, além do valor do fluxo de calor, o programa pode fornecer resultados gráficos em linhas isotérmicas, vetores de fluxo de calor, linhas de fluxo constantes e perfis de temperatura.

Os resultados de fluxo de calor encontrados para cada ponte térmica, bem como os resultados gráficos estão especificados no Item 4.1 da análise de resultados.

Tabela 7- Temperaturas externas- internas THERM

	Temperatura Externa (°C)	Temperatura Interna (°C)
Mais isolado (U base= 0,39 W/m².K)	1,21	14,94
Menos isolado (U base= 2,49 W/m².K)	1,21	11,27

Fonte: autor

3.3.3. Aplicação da ISO 10.211

Após a modelagem das pontes térmicas no software THERM, nos dois casos de isolamento diferentes, a Equação 09, da ISO 10.211 (2007), já mencionada anteriormente, pode ser aplicada para a obtenção do valor do coeficiente de transmissão linear (Ψ), a fim de que se pudesse chegar ao valor do fluxo de calor. Neste trabalho foram adotadas medidas exteriores para L_i .

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i \cdot l_i$$

Equação 09

Sabendo os valores do coeficiente de transmissão linear (Ψ) de cada ponte térmica, as Equações 10 e 11 foram aplicadas para definir as novas transmitâncias térmicas com a consideração das pontes térmicas.

$$(Ux A)_{parede\ alvenaria} + (Ux A)_{PT\ plana} + (\Psi x l)_{PT\ linear} = X$$

Equação 10

Onde:

U= transmitância térmica (w.m²/K)

Ψ= coeficiente de transmissão linear (W/m.°C)

l= comprimento ponte térmica (m)

O resultado da Equação 10 dividido pela área total de paredes de alvenaria e pontes térmicas irá resultar em um novo valor de transmitância térmica (Equação 11) com a consideração das pontes térmicas.

$$U = \frac{X}{AT}$$

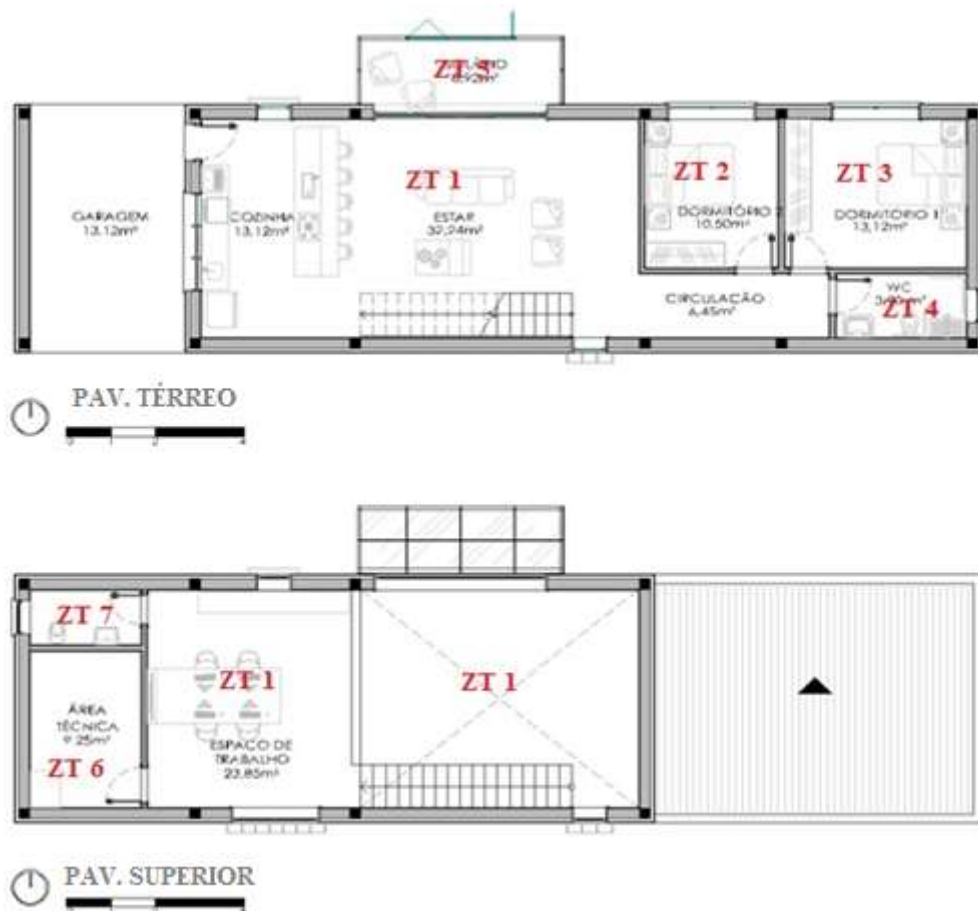
Equação 11

Tendo os resultados do cálculo das pontes térmicas, as próximas etapas do método especificam a modelagem de cada abordagem em estudo e as suas configurações.

3.4. Modelagem da Edificação

A modelagem da edificação simulada foi feita no programa *SketchUp 2015 Make* com o *plugin Legacy Open Studio 1.14*. Cada compartimento da edificação foi modelado como uma zona térmica conforme Figura 13. As dimensões das zonas térmicas foram caracterizadas pelas dimensões externas das paredes externas até o eixo das paredes internas.

Figura 13- Zonas Térmicas



Fonte: adaptado Dalbem (2015)

As cinco diferentes abordagens utilizadas para modelagem foram determinadas como:

3.4.1. Abordagem 1: Construção real

Nessa abordagem o edifício foi modelado com a marcação da estrutura onde ocorrem as pontes térmicas (Figura 14). Através do comando “*New Construction Stub*” a estrutura de concreto armado pode ser definida como ponte térmica durante a modelagem da edificação no *SketchUp + Legacy Open Studio*. Logo após, no *IDF Editor* do programa *EnergyPlus* a estrutura de concreto pode receber uma configuração de transmitância térmica e capacidade térmica diferente do restante das paredes que compõe os fechamentos verticais da edificação. Apesar da simulação computacional, através do software *EnergyPlus* não calcular efetivamente o efeito de pontes térmicas, pois o programa não consegue calcular o coeficiente de transmissão linear (ψ) pela ponte térmica linear, essa abordagem é mais rígida quanto às

configurações de materiais, e consegue simular o efeito da ponte térmica plana, através da área. As transmitâncias térmicas e capacidades térmicas utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 8.

Figura 14- Modelagem Abodagem 1



Fonte: autor

Tabela 8- Transmitâncias Térmicas e Capacidades Térmicas Abordagem 1

	U + isolado (Caso 1)	U – isolado (Caso 2)	CT + isolado (Caso 1)	CT – isolado (Caso 2)
Parede Alvenaria	0,39 W/(m².K)	2,49 W/(m².K)	412,9 (kJ/m².K)	186 (kJ/m².K)
Concreto Estrutura	2,23 W/(m².K)	3,06 W/(m².K)	744 (kJ/m².K)	402 (kJ/m².K)

Fonte: autor

3.4.2. Abordagem 2: Simplificada

A abordagem 2, considerada como abordagem simplificada, é a mais utilizada em simulações computacionais (Figura 15). A edificação foi modelada com uma parede equivalente, considerando apenas a transmitância térmica e capacidade térmica das paredes de alvenaria da edificação.

No mundo real, a maioria dos fechamentos, principalmente os de alvenaria cerâmica, são compostos por camadas heterogêneas considerando que o software *EnergyPlus* entende os fechamentos como compostos por camadas homogêneas, uma parede equivalente deve ser criada com as

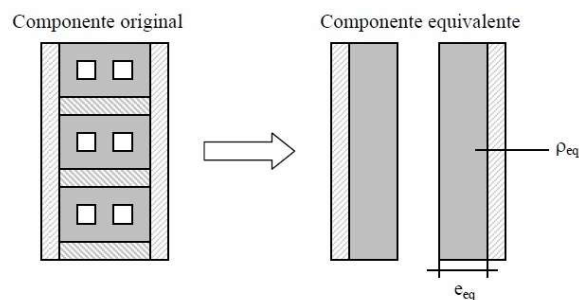
mesmas propriedades de transmitância térmica e capacidade térmica da parede real. A Figura 16 de ORDENES (2003) exemplifica a transformação de uma parede real para uma parede equivalente.

Figura 15- Modelagem Abordagem 2, 3, 4 e 5



Fonte: autor

Figura 16- Parede equivalente



Fonte: Ordenes, (2003).

A resistência térmica (R) da parede equivalente será dada pela Equação 12, a transmitância térmica (U) da parede equivalente será dada pela Equação 13 e a capacidade térmica (CT) equivalente pela Equação 14, especificadas abaixo.

$$R_{orig} = R_{eqv}$$

Equação 12

$$U_{orig} = U_{eqv}$$

Equação 13

$$CT_{orig} = CT_{eqv}$$

Equação 14

A transmitância térmica e capacidade térmica utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 9 abaixo.

Tabela 9- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 2

	U + isolado (Caso 1)	U – isolado (Caso 2)	CT + isolado (Caso 1)	CT – isolado (Caso 2)
Parede Alvenaria	0,39 W/(m².K)	2,49 W/(m².K)	412,9 (kJ/m².K)	186 (kJ/m².K)

Fonte: autor

3.4.3. Abordagem 3: Simplificada com ponderação de U e CT

O terceiro tipo de modelagem utiliza o mesmo método de parede equivalente da abordagem anterior, porém antes de configurar os fechamentos verticais da edificação no *IDF Editor* do *EnergyPlus*, foi feita uma ponderação da transmitância térmica e capacidade térmica do concreto e da parede de alvenaria pelas áreas de estrutura e paredes da edificação, chegando a um novo valor de transmitância térmica e capacidade térmica em função das áreas de cada elemento. No *IDF Editor* as propriedades dos materiais e composições das paredes foram configuradas de acordo com as novas transmitâncias ponderadas. A transmitância térmica e capacidade térmica utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 3

	U + isolado (Caso 1)	U – isolado (Caso 2)	CT + isolado (Caso 1)	CT – isolado (Caso 2)
Parede Alvenaria	0,48 W/(m².K)	2,42 W/(m².K)	460 (kJ/m².K)	211,26 (kJ/m².K)

Fonte: autor

3.4.4. Abordagem 4: Simplificada com aumento de transmitância

A quarta abordagem também utiliza o método de parede equivalente, porém com a transmitância térmica dos fechamentos verticais incrementada em função da consideração da diminuição da resistência da envoltória pelas

pontes térmicas. Para chegar na transmitância térmica incrementada em função das pontes térmicas foi utilizada a metodologia de cálculo detalhada pela normativa ISO 10.211 com o auxílio do programa THERM 7.4. A modelagem no programa *SketchUp + Legacy Open Studio* é idêntica a modelagem simplificada (Figura 16), porém no *IDF Editor* recebe configurações diferentes quanto aos materiais e composição das camadas que caracterizam as paredes. Nesta abordagem a capacidade térmica considerada foi a da parede de alvenaria, sem a consideração da capacidade térmica do concreto presente na estrutura.

A transmitância térmica e capacidade térmica utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 10 abaixo.

Tabela 11- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 4

	U + isolado (Caso 1)	U – isolado (Caso 2)	CT + isolado (Caso 1)	CT – isolado (Caso 2)
Parede Alvenaria	0,95 W/(m².K)	3,29W/(m².K)	412,9 (kJ/m².K)	186 (kJ/m².K)

Fonte: autor

3.4.5. Abordagem 5: Simplificada com aumento de transmitância e ponderação de CT

Na quinta abordagem é considerado o mesmo procedimento da abordagem 4, porém com a ponderação da capacidade térmica entre as áreas de estrutura de concreto e paredes de alvenaria. Portanto, no *IDF Editor* as transmitâncias térmicas da parede equivalente foram consideradas iguais as da abordagem anterior apenas mudando a capacidade térmica que foi ponderada. A transmitância térmica e capacidade térmica utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 12 abaixo.

Tabela 12- Transmitância térmica e capacidade térmica abordagem 5

	U + isolado (Caso 1)	U – isolado (Caso 2)	CT + isolado (Caso 1)	CT – isolado (Caso 2)
Parede Alvenaria	0,95 W/(m².K)	3,29W/(m².K)	460 (kJ/m².K)	211,26 (kJ/m².K)

Fonte: autor

3.5. Configurações da Simulação Computacional

Todas as configurações dos modelos foram realizadas no *IDF Editor* do software *EnergyPlus*.

3.5.1. Uso, ocupação e iluminação

Para que as simulações considerassem uma edificação em uso, foi utilizado o RTQ-R (Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética de edifícios residenciais) como referência. As tabelas 13 e 14 mostram as configurações de uso e ocupação, respectivamente. As configurações de iluminação também seguem os parâmetros preconizados pelo RTQ-R para dias de semana e fins de semana (Tabela 15). A densidade de potência de iluminação configurada foi de 6 W/m² na sala de estar e 5 W/m² nos dormitórios.

Tabela 13- Tipologia e Uso

Tipo de edificação		Residencial	
Número de pavimentos		2	
Ambiente	Atividade Realizada	Calor Produzido	Calor produzido para área de pele = 1,80 m ²
		(W/m ²)	(W)
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108
Dormitórios	Dormindo ou descansando	45	81

Fonte: RTQ-R (2010)

Tabela 14- Agenda de Ocupação

Horário	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana	Finais de Semana	Dias de Semana	Finais de Semana
1h - 7h	100%	100%	0%	0%
8h - 9h	0%	100%	0%	0%
10h	0%	50%	0%	0%
11h	0%	0%	0%	25%
12h	0%	0%	0%	75%
13h	0%	0%	0%	0%
14h	0%	0%	25%	75%
15h - 17h	0%	0%	25%	50%
18h	0%	0%	25%	25%
19h	0%	0%	100%	25%
20h	0%	0%	50%	50%
21h	50%	50%	50%	50%
22h-24h	100%	100%	0%	0%

Fonte: RTQ-R (2010)

Tabela 15- Agenda de Iluminação

Horário	Dormitórios		Sala	
	Dias de Semana	Finais de Semana	Dias de Semana	Finais de Semana
1h - 6h	0%	0%	0%	0%
7h	100%	0%	0%	0%
8h	0%	0%	0%	0%
9h	0%	100%	0%	0%
10h	0%	0%	0%	0%
11h- 12h	0%	0%	0%	100%
13h- 16h	0%	0%	0%	0%
17h - 20h	0%	0%	100%	100%
21h	100%	100%	100%	100%
19h	0%	0%	100%	25%
20h	0%	0%	50%	50%
21h	50%	50%	50%	50%
22h	100%	100%	0%	0%
23h- 24h	0%	0%	0%	0%

Fonte: RTQ-R (2010)

3.5.2. Materiais e composições dos fechamentos verticais

As abordagens 1 e 2 foram simuladas em dois casos diferentes, utilizando duas transmitâncias térmicas para os fechamentos verticais. No caso 1 a edificação foi simulada com as paredes externas com transmitância térmica (U) de 2,49 W/(m²K), próximo do valor limite para atender a NBR 15.575 em zonas mais frias (2,50 W/(m²K)). No caso 2 a edificação foi simulada com paredes externas com transmitância térmica (U) de 0,39 W/(m²K), com o intuito de fazer a análise em prédios mais isolados. Em todos os casos simulados, foi adotada a absorvância solar de 0,2, equivalente a cores claras, como condição de contorno.

Na abordagem 1, que considera o edifício real, as paredes e estrutura receberam configurações de materiais diferentes nos casos 1 e 2. Na abordagem 2, que considera o edifício simplificado, as paredes receberam as mesmas configurações que os casos 1 e 2 da abordagem 1, porém sem a diferenciação de materiais na estrutura. Neste caso, paredes e estrutura foram consideradas um único plano.

Em ambas as abordagens, o fechamento de tijolo cerâmico furado foi configurado no software *EnergyPlus* por meio de uma parede equivalente, já que o programa compreende os fechamentos como homogêneos, conforme o ilustrado na Figura 16 de Ordenes (2003). Após o cálculo, as configurações e espessuras adotadas para as paredes equivalentes das transmitâncias 0,39 W/(m².K) e 2,49 W/(m².K) e os valores de densidade de massa aparente equivalente da cerâmica estão especificadas na tabela 17 abaixo. Os cálculos das paredes equivalentes encontram-se no anexo B deste trabalho.

Tabela 16- Composição das paredes abordagem 1 e 2

PRÉDIO MAIS ISOLADO 1- U=0,39 W/(m².K)				
PAREDES EXTERNAS				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Reboco externo	0,02	1,15	412,9	0,39
EPS	0,03	0,035		
Tijolo Cerâmico 6 furos	0,10	1,05		
Câmara de Ar	0,05	R		
Tijolo Cerâmico 6 furos	0,10	1,05		
Reboco interno	0,02	1,15		
ESTRUTURA				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Reboco externo	0,02	1,15	744	2,23
Concreto armado	0,28	1,75		
Reboco interno	0,02	1,15		
PRÉDIO MENOS ISOLADO U=2,49 W/(m².K)				
PAREDES EXTERNAS				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Reboco externo	0,025	1,15	186	2,49
Tijolo Cerâmico 4 furos	0,095	1,05		
Reboco interno	0,025	1,15		
ESTRUTURA				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Reboco externo	0,025	1,15	402	3,06
Concreto armado	0,13	1,75		
Reboco interno	0,025	1,15		

Fonte: autor

Tabela 17- Parede Equivalente $U= 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U= 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

PAREDE U= 0,39 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,02	1,15	412,90	0,39	272,2
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,66	1,05			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,66	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			
PAREDE U= 2,49 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,025	1,15	186	2,49	2.608,69
Cerâmica	0,02	1,05			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,02	1,05			
Reboco interno	0,025	1,15			

Fonte: autor

Nas abordagens 3, 4 e 5 que sofreram alterações nos valor de transmitância térmica e capacidade térmica foram feitos ajustes na espessura dos materiais na parede equivalente até que se obtivesse uma parede com a transmitância desejada, o mesmo foi feito para a capacidade térmica. As composições das paredes equivalentes das abordagens 3, 4 e 5 estão especificadas na Tabela 18, 19 e 20 abaixo.

Tabela 18- Configurações dos materiais parede equivalente abordagens 3

PAREDE U= 0,48 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,02	1,15	460	0,48	467,26
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,44	0,90			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,44	0,90			
Reboco interno	0,02	1,15			
PAREDE U= 2,42 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,025	1,15	211,26	2,42	2.196
Cerâmica	0,03	0,90			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,03	0,90			
Reboco interno	0,03	1,15			

Fonte: autor

Tabela 19- Configurações dos materiais parede equivalente abordagem 4

PAREDE U= 0,95 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,02	1,15	412,90	0,95	516,92
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,35	1,05			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,35	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			
PAREDE U= 3,29 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,025	1,15	186	3,29	1.043,47
Cerâmica	0,05	0,90			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,05	0,90			
Reboco interno	0,03	1,15			

Fonte: autor

Tabela 20- Configurações dos materiais parede equivalente abordagem 5

PAREDE U= 0,95 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,02	1,15	460	0,95	281,44
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,35	1,05			
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,35	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			
PAREDE U= 3,29 W/(m²K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))	Densidade equiv. cerâmica (kg/m³)
Reboco externo	0,025	1,15	211,26	3,29	1.318,04
Cerâmica	0,05	1,05			
Cerâmica	0,05	1,05			
Reboco interno	0,03	1,15			

Fonte: autor

A cobertura foi configurada de maneira diferente para a edificação mais isolada e menos isolada. O edifício mais isolado, em todas as abordagens recebeu uma cobertura com transmitância 0,43 W/(m².K). O prédio menos isolado em todas as abordagens foi configurado com uma cobertura de 1,92 W/(m².K), de modo que atendesse os valores de transmitância propostos pela NBR 15.575 para zonas frias. Entendendo o edifício como um sistema onde todos os componentes do envelope interferem-se entre si, foi trabalhado duas situações iniciais: edifício isolado (paredes e cobertura isoladas) e edifício não isolado (paredes e cobertura não isoladas). A composição da cobertura está detalhada na Tabela 21 abaixo.

Tabela 21- Composição da cobertura

COBERTURA PRÉDIO MAIS ISOLADO				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Laje concreto	0,10	1,15	236,75	0,43
Câmara de ar	<0,05	R= 0,17		
Lã de rocha	0,08	0,045		
Telha Fibrocimento	0,008	0,65		
COBERTURA PRÉDIO MENOS ISOLADO				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m²K)	U (W/(m²K))
Laje concreto	0,10	1,15	230,75	1,92
Câmara de ar	<0,05	R= 0,17		
Telha Fibrocimento	0,008	0,65		

Fonte: autor

3.5.3. Ventilação natural

Para a análise de temperaturas superficiais, o edifício foi configurado como condicionado naturalmente. Esta configuração foi realizada pelo objeto *AirFlowNetwork* do *software EnergyPlus*, onde foi criada uma agenda de ventilação para as 24 horas do dia, com o *setpoint* de abertura de janelas em uma temperatura de 25°C, conforme sugerido por Martins (2011). Ou seja, quando a temperatura interna da zona for 25°C e a temperatura externa estiver menor que a interna em até 5°C, as janelas abrem.

3.5.4. Sistema de condicionamento artificial

Para análise de consumo energético da edificação o sistema de ar condicionado adotado foi um sistema de expansão direta, *split*, as configurações do sistema foram realizadas no objeto *HVAC: TemplateZone: PTHP* do *software EnergyPlus*.

O *setpoint* de temperatura adotado foi de 22° para aquecimento e 24° para resfriamento, em consonância com a NBR 16.401 (2008). O horário de funcionamento do sistema de condicionamento artificial foi considerado das 21hs às 9hs. O sistema de aquecimento tem coeficiente de performance (COP) 2,75 W/W e o sistema de refrigeração 3,00 W/W. Ambos os parâmetros foram configurados conforme o sugerido pelo RTQ-R (2010).

3.5.5. Configuração de temperatura do solo

Para a determinação da temperatura do solo, a ferramenta utilizada foi o *Slab*, programa vinculado ao *EnergyPlus*. Primeiro realizou-se uma simulação inicial para que fossem verificadas as temperaturas mensais médias para o ar interno da edificação, com o solo sendo considerado em uma condição adiabática. Logo depois, com o pré-processador *Slab*, foi determinada a temperatura do solo para cada mês.

3.5.6. Arquivo climático

Na ausência de um arquivo climático da cidade de Pelotas no início da pesquisa, a cidade de Camaquã foi escolhida para representar a zona bioclimática 2, por ser próxima a cidade de Pelotas e possuir características semelhantes (Tabela 22). O arquivo climático de Camaquã foi desenvolvido por Maurício Roriz (ANTAC- GT Conforto e Energia) mediante dados registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia no período de 2001 a 2010.

Tabela 22- Dados climáticos Camaquã

Médias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS média (°C)	23,0	22,3	21,9	18,1	15,4	12,0	14,8	13,2	14,5	17,7	20,6	21,6
UR média (%)	76	83	81	79	85	88	89	86	85	83	80	78
Velocidade média vento (m/s)	2,0	1,7	1,5	1,3	1,5	1,3	1,2	1,4	2,0	1,9	2,2	1,9

Fonte: Inmet

Tabela 23- Dados climáticos Pelotas

Médias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS média (°C)	23,2	23,0	21,7	18,5	15,1	12,4	12,3	13,4	14,9	17,5	19,6	22,0
UR média (%)	Q2	79,9	80,5	82,3	83,6	84,0	84,9	83,2	81,8	79,5	76,0	75,5
Velocidade média vento (m/s)	3,9	3,6	3,2	3,0	2,7	2,8	3,0	3,2	4,0	4,2	4,2	4,0

Fonte: Inmet

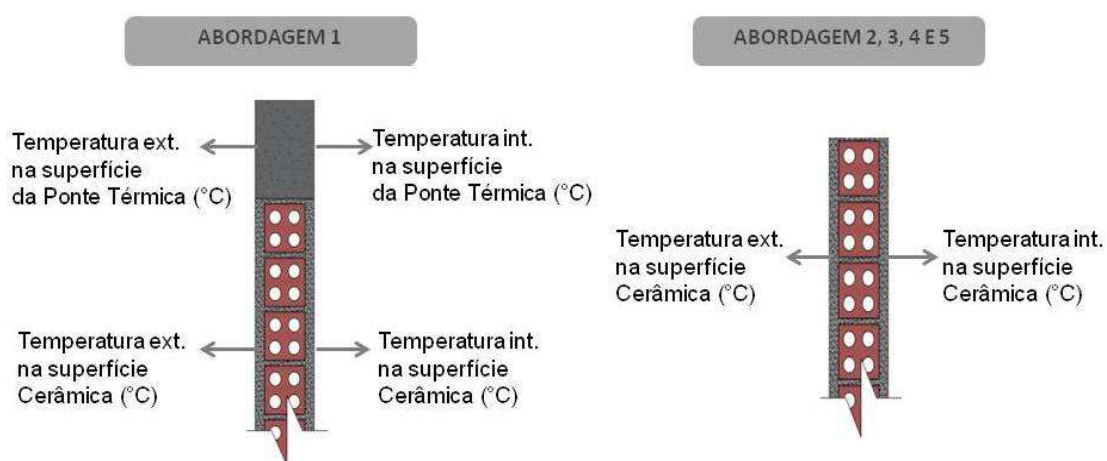
3.6. Método de Análises de resultados: Simulação termoenergética

3.6.1. Comportamento térmico das paredes

O comportamento térmico das paredes foi analisado por meio das temperaturas nas superfícies internas e externas das paredes externas. No caso da abordagem 1, foram solicitados nas simulações computacionais os resultados de temperaturas das superfícies do concreto e da superfície cerâmica. Já no caso das abordagens 2, 3, 4 e 5 foram solicitados resultados de temperaturas da superfície da parede cerâmica, já que nessas abordagens não foi feita uma separação de materiais entre estrutura e o resto dos fechamentos verticais (Figura 17).

Os resultados são apresentados por meio de gráficos com as temperaturas superficiais junto à temperatura operativa da zona térmica e a temperatura externa.

Figura 17- Método de análise comportamento térmico das paredes



Fonte: autor

3.6.2. Consumo energético

A partir das configurações de uso e ocupação, iluminação, equipamentos e ar condicionado, e após rodar as simulações, o *software EnergyPlus* fornece um arquivo no formato *html* com resultados de consumo energético da edificação configurada. Os resultados são dados em kW/h.ano e são divididos em consumo energético para aquecimento, resfriamento e ainda consumo energético para iluminação e equipamentos.

A análise do consumo energético se deu através da comparação do consumo energético dos dois casos simulados para cada abordagem diferente.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

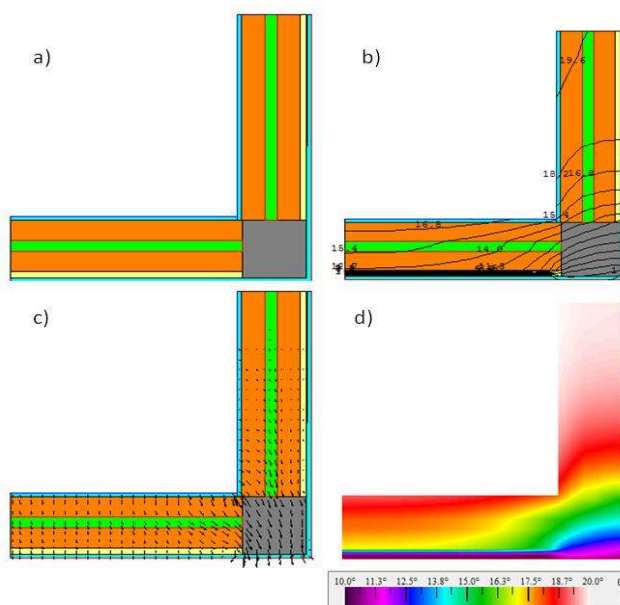
4.1. Cálculo de Pontes Térmicas

No primeiro item da análise de resultados são apresentados os valores de coeficiente de transmissão linear encontrados para cada ponte térmica da edificação, nos dois casos base de transmitância térmica, $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$. Além disso, imagens das pontes térmicas modeladas no software Therm e seus respectivos gráficos de linhas isométricas, vetor de fluxos e fluxo infravermelho. Através do vetor de fluxos consegue-se observar com clareza os locais onde ocorrem as perdas de calor pelas pontes térmicas.

4.1.1. Pilares

As figuras 18 e 19 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas de pilares nos dois casos base de transmitância térmica em estudo $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

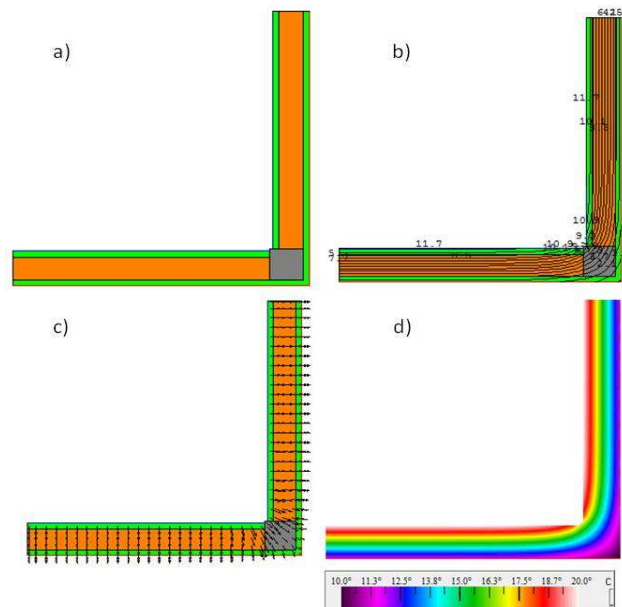
Figura 18- PT1 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= $0,456 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

Figura 19- PT1 U=2,49 W/(m²K) : a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



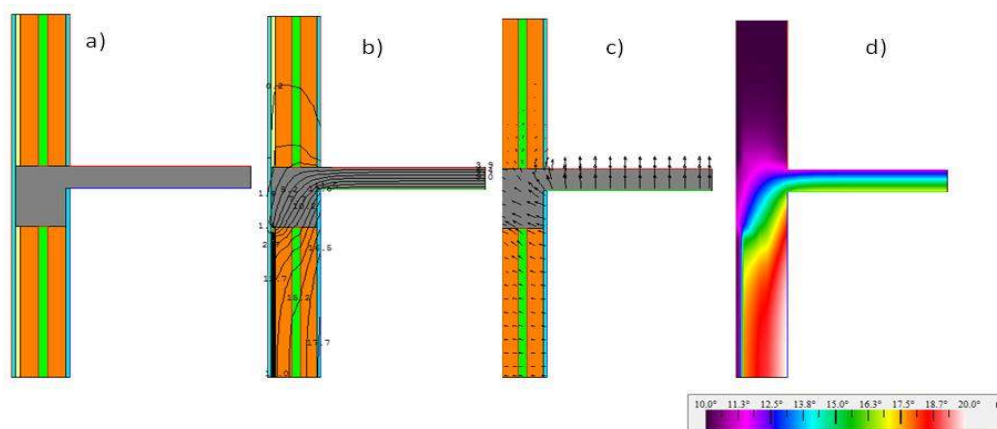
Fonte: autor

Ψ encontrado= 0,709 (W/m²K)

4.1.2. Fachada com cobertura

As figuras 20 e 21 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro de fachada e cobertura nos dois casos base de transmitância térmica em estudo 0,39 W/(m².K) e 2,49 W/(m².K).

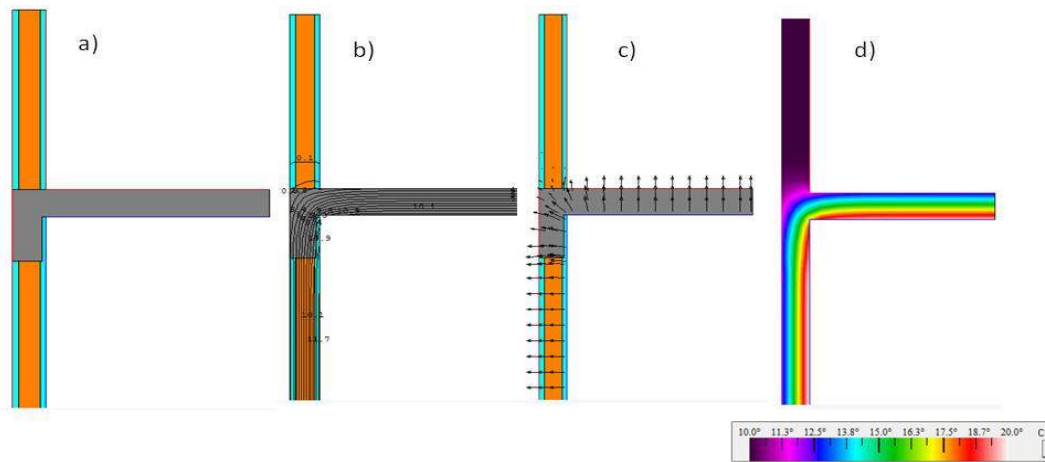
Figura 20- PT2 U=0,39 W/(m²K): a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= -0,115 (W/m²K)

Figura 21- PT2 $U=2,49 \text{ W/(m}^2\text{K)}$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



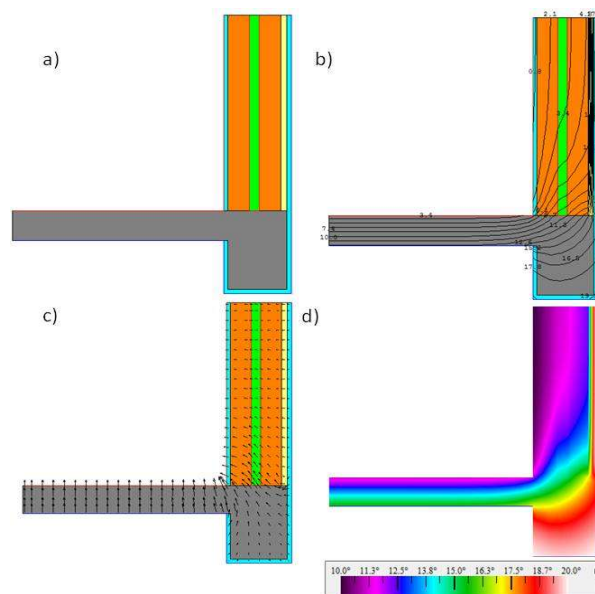
Fonte: autor

Ψ encontrado= 1,153 (W/m²K)

4.1.3. 1º pavimento com cobertura térreo

As figuras 22 e 23 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro do primeiro pavimento com a cobertura do pavimento térreo nos dois casos base de transmitância térmica em estudo 0,39 W/(m².K) e 2,49 W/(m².K).

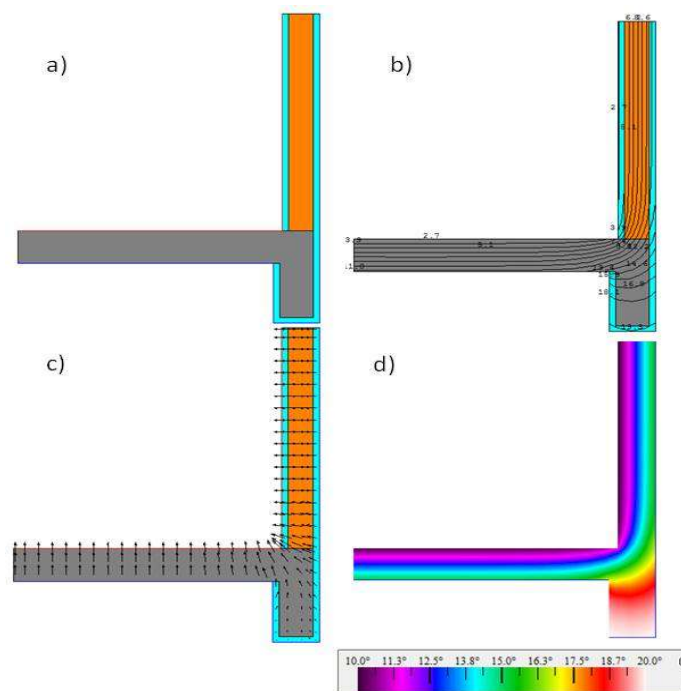
Figura 22- PT3 $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{K)}$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= 1,061 (W/m²K)

Figura 23-PT3 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



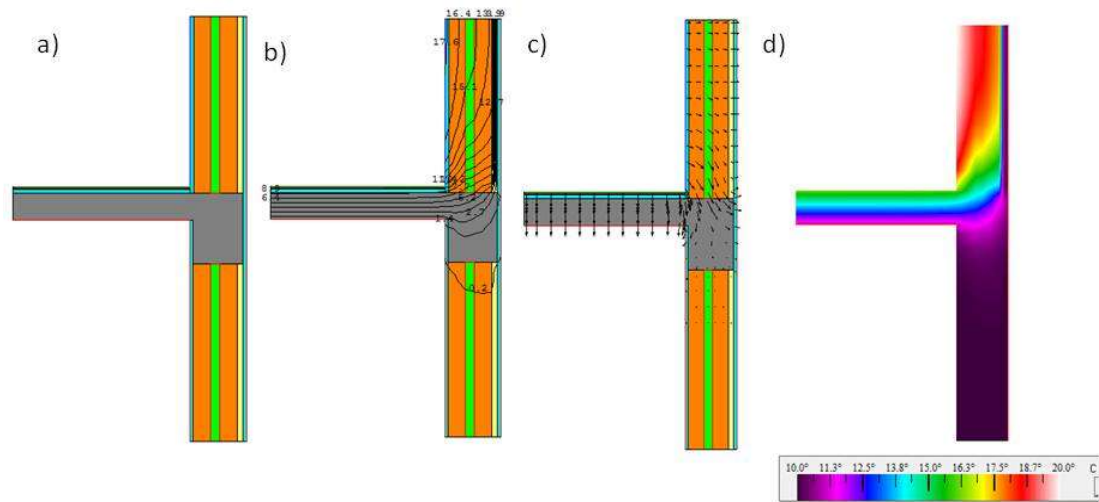
Fonte: autor

Ψ encontrado= 1,173 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

4.1.4. Fachada com garagem

As figuras 24 e 25 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro da fachada com a garagem nos dois casos base de transmitância térmica em estudo $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

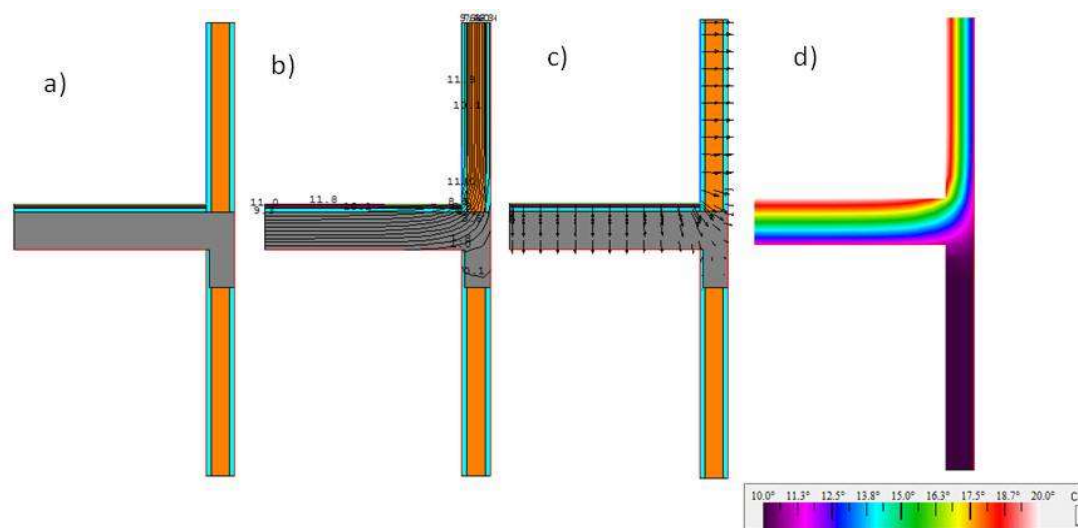
Figura 24- PT4 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= $-0,061 \text{ (W/m}^{\circ}\text{K)}$

Figura 25- PT4 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= $-0,068 \text{ (W/m}^{\circ}\text{K)}$

4.1.5. Fachada com laje 1º pavimento

As figuras 26 e 27 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro da fachada com a laje do primeiro pavimento nos dois casos base de transmitância térmica em estudo 0,39 W/(m².K) e 2,49 W/(m².K).

Figura 26- PT5 U=0,39 W/(m².K) : a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas

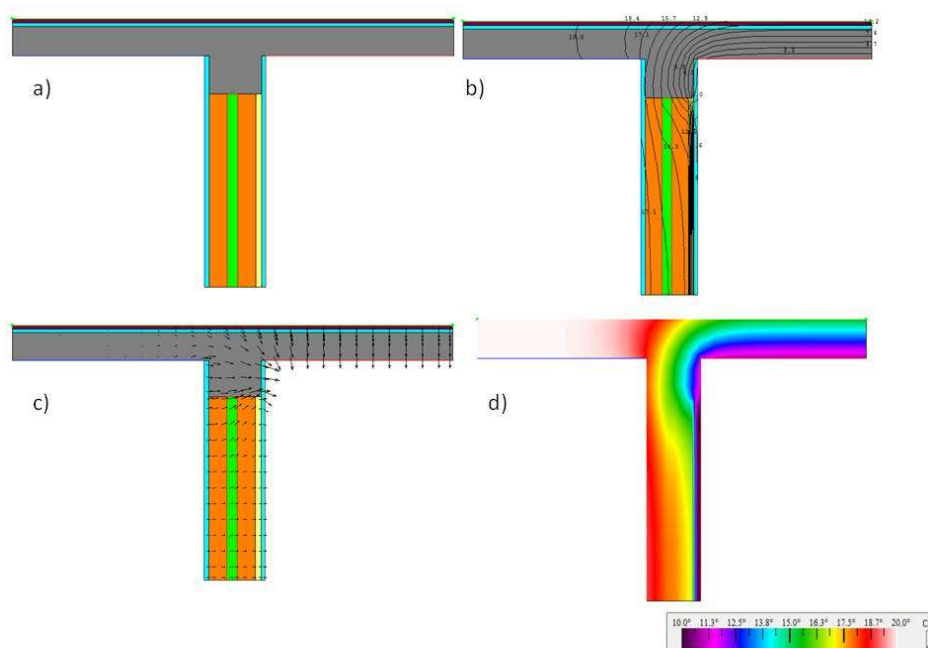
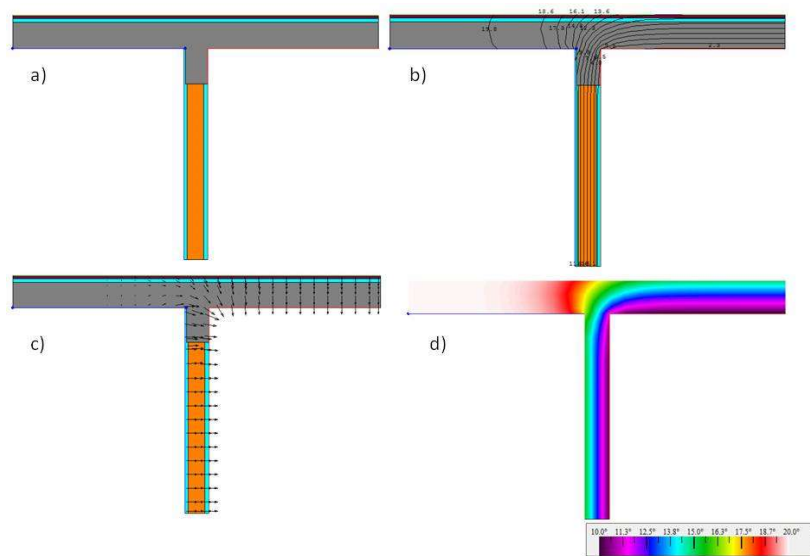


Figura 27- PT5 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



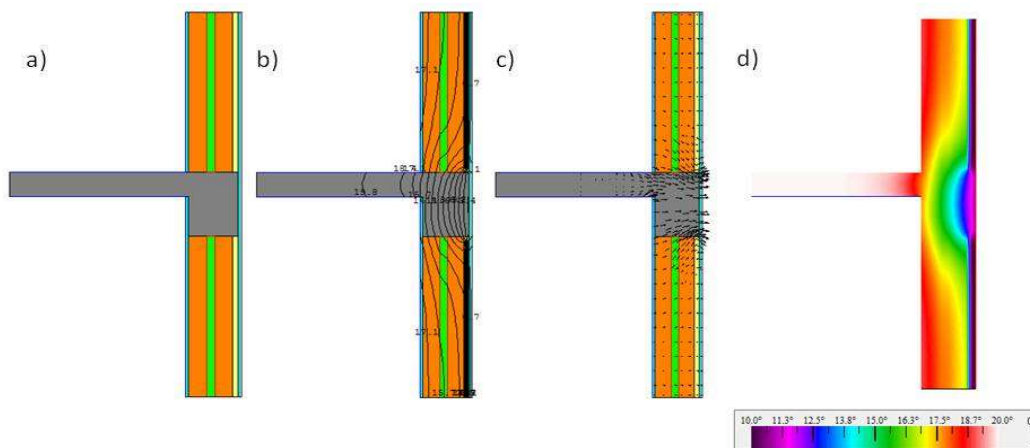
Fonte: autor

Ψ encontrado= 1,335 ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

4.1.6. Fachada com laje de pavimento intermediário

As figuras 28 e 29 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro da fachada com a laje do primeiro intermediário nos dois casos base de transmitância térmica em estudo $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

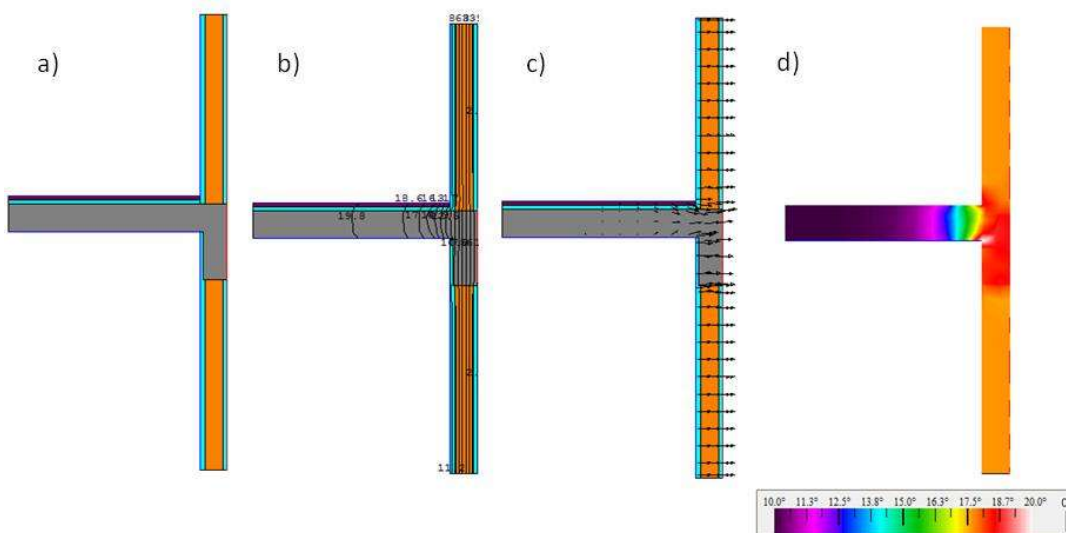
Figura 28- PT6 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= $1,779 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

Figura 29- PT6 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



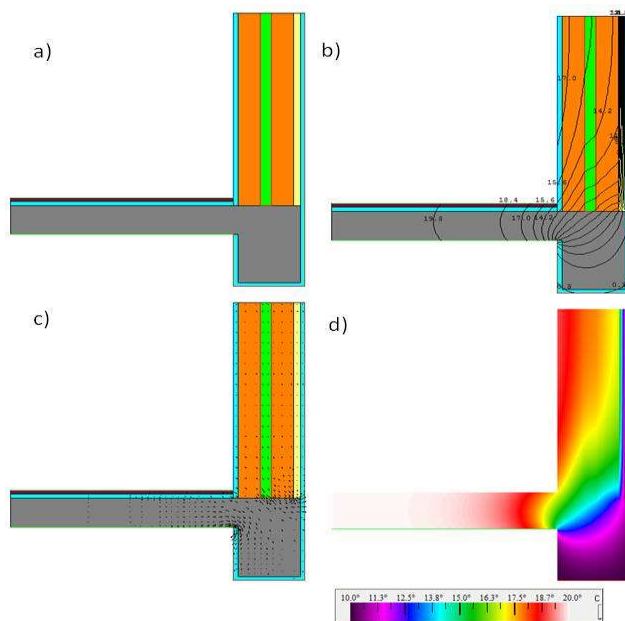
Fonte: autor

Ψ encontrado= $1,688 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

4.1.7. Fachada com exterior

As figuras 30 e 31 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro da fachada com o exterior nos dois casos base de transmitância térmica em estudo $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

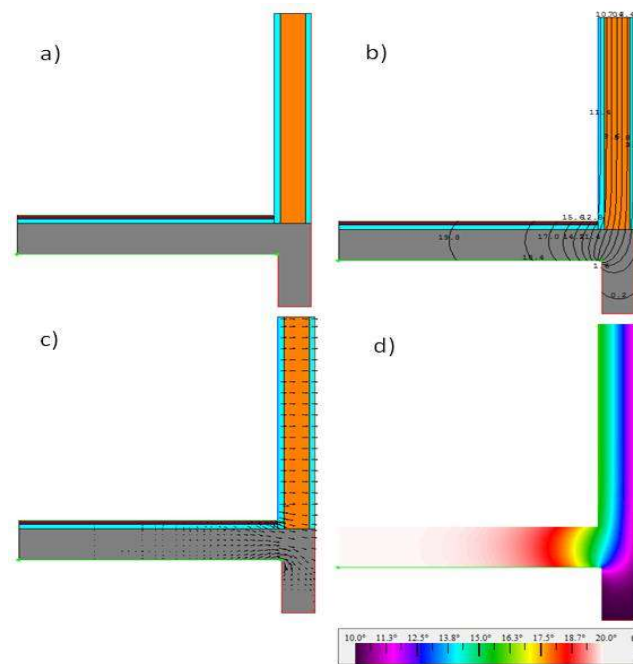
Figura 30- PT7 $U=0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



Fonte: autor

Ψ encontrado= $-2,236 \text{ (W/m}^\circ\text{K)}$

Figura 31- PT7 $U=2,49 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) temperaturas em cores falsas



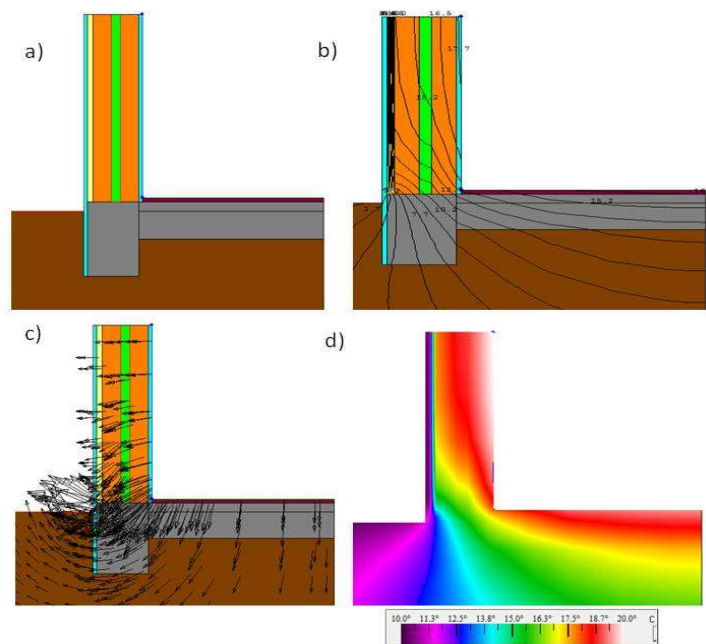
Fonte: autor

Ψ encontrado= $-2,185 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

4.1.8. Fachada em contato com o solo

As figuras 32 e 33 apresentam os resultados obtidos no software THERM para as pontes térmicas do encontro da fachada com o solo nos dois casos base de transmitância térmica em estudo $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$.

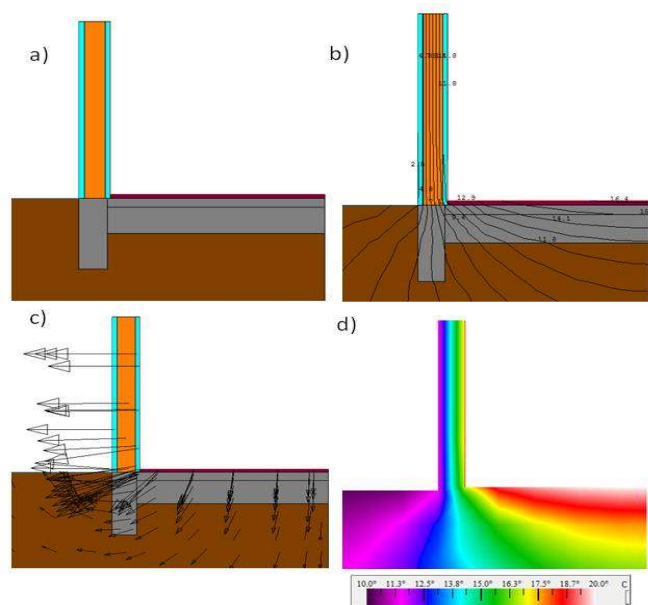
Figura 32- PT8 $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{/K)}$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) fluxo infravermelho



Fonte: autor

Ψ encontrado= $1,188 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

Figura 33- PT8 $U=2,49 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$: a) modelagem THERM b) linhas isotérmicas c) vetor de fluxos d) fluxo infravermelho



Fonte: autor

Ψ encontrado= $1,359 \text{ (W/m}^2\text{K)}$

A Tabela 24 apresenta o resumo de todos os coeficientes encontrados. As pontes térmicas que obtiveram o valor de coeficiente de transmissão linear negativos foram desconsideradas.

Tabela 24- Valores de coeficiente de transmissão linear

Ponte Térmica	Ψ (W/m ² K)	
	U= 0,39 W/(m ² .K)	U= 2,49 W/(m ² /K)
PT1	0,709	0,456
PT2	1,155	-0,115 (desconsiderado)
PT3	1,173	1,061
PT4	-0,068 (desconsiderado)	-0,061 (desconsiderado)
PT5	1,335	1,275
PT6	1,688	1,779
PT7	-2,185 (desconsiderado)	-2,236 (desconsiderado)
PT8	1,359	1,188

Fonte: autor

Os valores de coeficiente de transmissão linear encontrados foram utilizados para obtenção de novas transmitâncias térmicas dos casos bases incrementada pelo acréscimo do fluxo de calor linear que passa pelas paredes através das pontes térmicas. Estes valores encontram-se na Tabela 25 abaixo. Os cálculos que originaram as novas transmitâncias térmicas encontram-se no Apêndice A deste trabalho.

Tabela 25- Transmitâncias térmicas incrementadas pelo cálculo ISO 10.211

Transmitância base (W/(m ² K))	Transmitância incrementada (W/(m ² K))
0,39	0,95
2,49	3,29

Fonte: autor

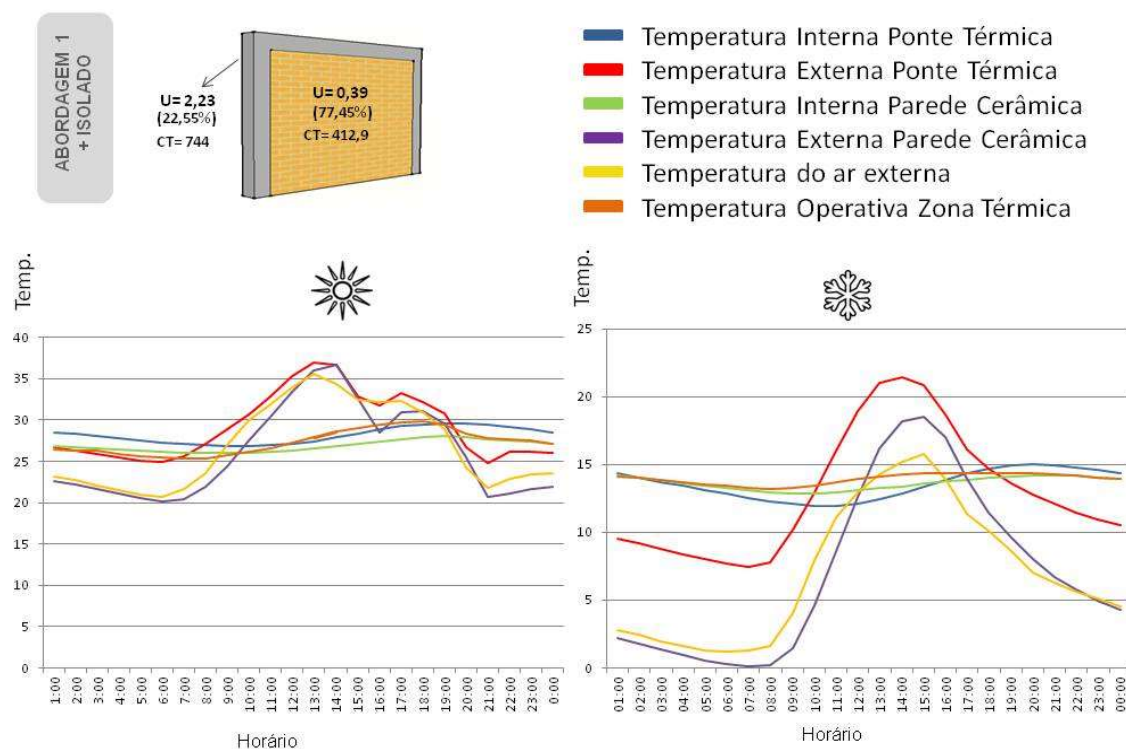
4.2. Comportamento térmico das paredes

Usando como exemplo a orientação norte, nesta etapa da análise de resultados, foi observado o comportamento térmico das paredes externas da edificação nas diferentes abordagens que estão sendo estudadas. Foi analisado o perfil de temperatura das paredes externas no dia típico de verão e

inverno para a zona bioclimática 2 (10 de janeiro e 17 de junho), e também o perfil de comportamento em 3 dias, contando a partir dos dias típicos de inverno e verão.

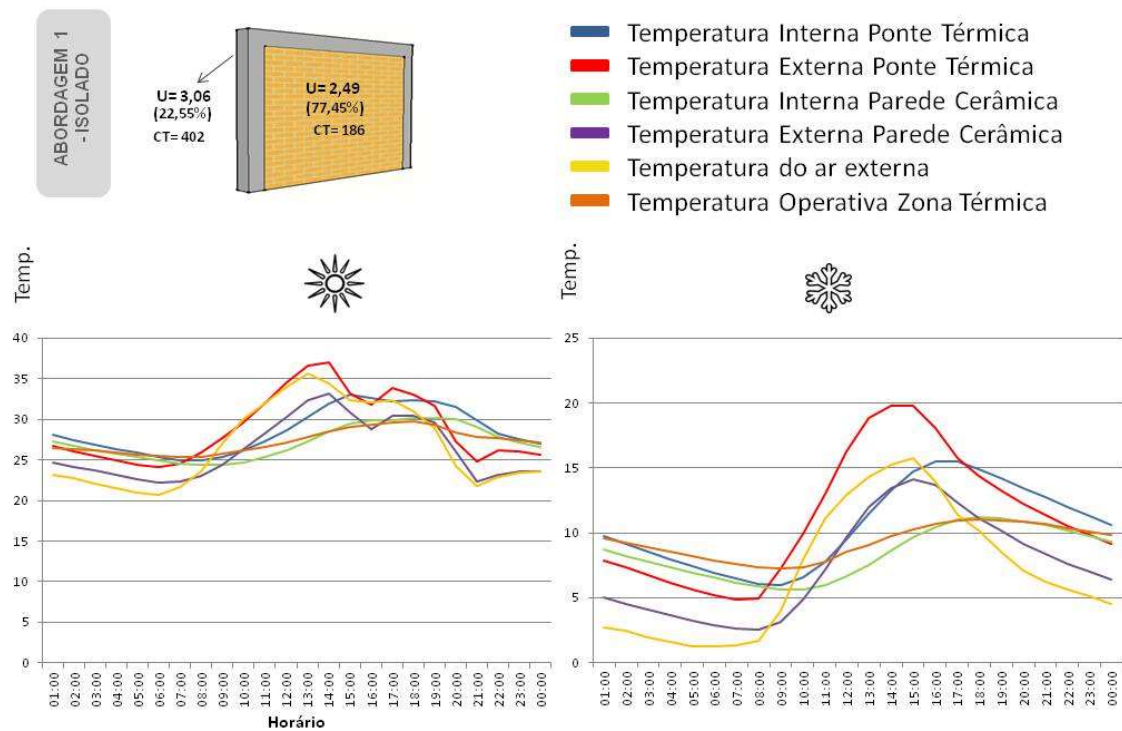
As figuras 34 e 35 abaixo ilustram a análise de temperaturas das paredes externas da fachada norte, para as duas diferentes transmitâncias térmicas da abordagem 1, nos dias típicos de verão e inverno. Os gráficos mostram a temperatura do ar externo, temperatura operativa da zona térmica e as temperaturas próximas às superfícies internas e externas do concreto e da parede cerâmica ao longo das 24 horas do dia, pois essa é a única abordagem que considera a separação do concreto e da cerâmica para a simulação computacional.

Figura 34- Temperaturas abordagem 1 $U=0,39W/(m^2.K)$



Fonte: autor

Figura 35- Temperaturas abordagem 1 $U=2,49 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$



Fonte: autor

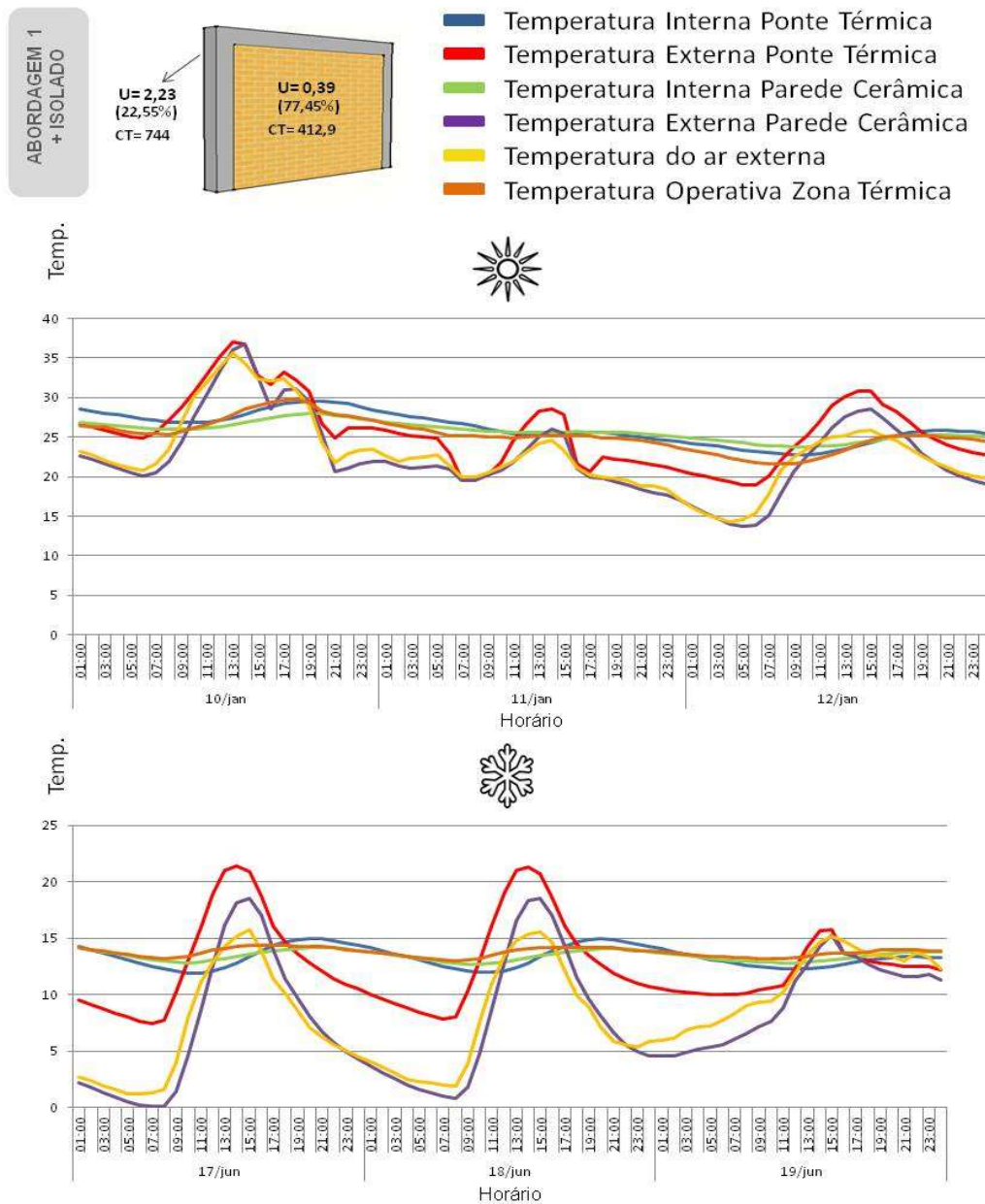
Pode-se perceber que em ambos os casos, tanto na parede mais isolada como na parede menos isolada a temperatura da superfície do concreto, apesar de ter uma resistência menor, apresenta-se na maior parte do tempo, mais elevada do que a temperatura da parede cerâmica. Isso pode ocorrer devido à capacidade térmica do concreto ser muito mais alta que a capacidade térmica da cerâmica. Essa parede levará mais tempo para esfriar do que a parede cerâmica, assim a temperatura do concreto permanece mais alta na maior parte das horas do dia.

Outro aspecto que pode ser observado é que tanto na parede mais isolada como na parede menos isoladas, nos dias de verão e inverno a temperatura externa da cerâmica se apresenta menor do que a temperatura do ar externo. Atribui-se esse valor mais baixo da superfície externa a massa do revestimento externo, embora a camada tenha pouca espessura.

Já na parede menos isolada, com a maior massa térmica apresenta a temperatura superficial maior que a temperatura do ar externo no período da noite e início da manhã.

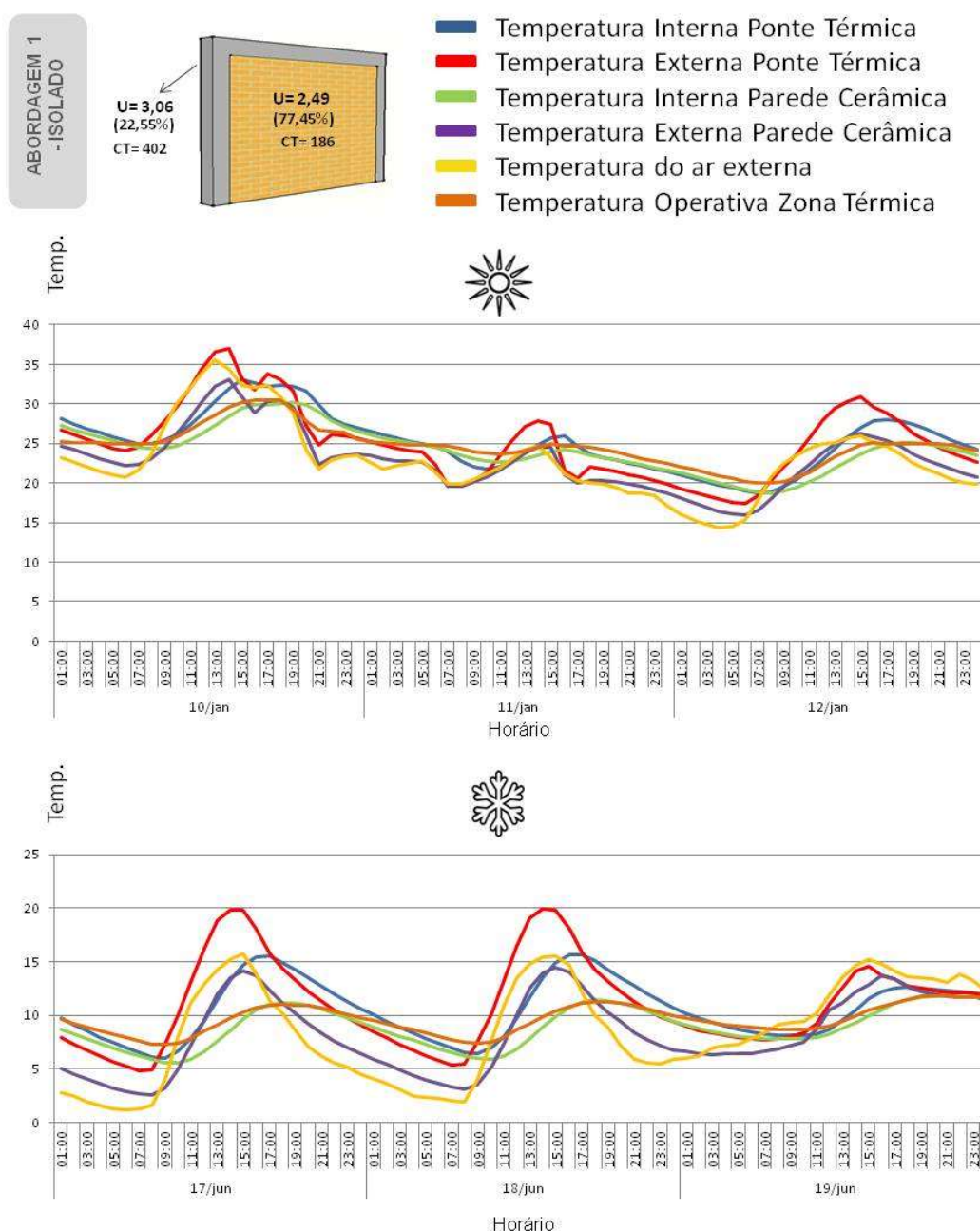
As figuras 36 e 37 mostram o perfil de temperatura para três dias seguidos, a contar do dia típico de verão e de inverno, para o prédio mais isolado e menos isolado, respectivamente. Os gráficos mostram que nos dias seguintes aos dias típicos o comportamento se apresenta semelhante ao que foi apresentado para o dia típico.

Figura 36- Perfil de temperatura em 3 dias abordagem 1 $U=0,39 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$



Fonte: autor

Figura 37- Perfil de temperatura em 3 dias abordagem 1 $U=2,49 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$

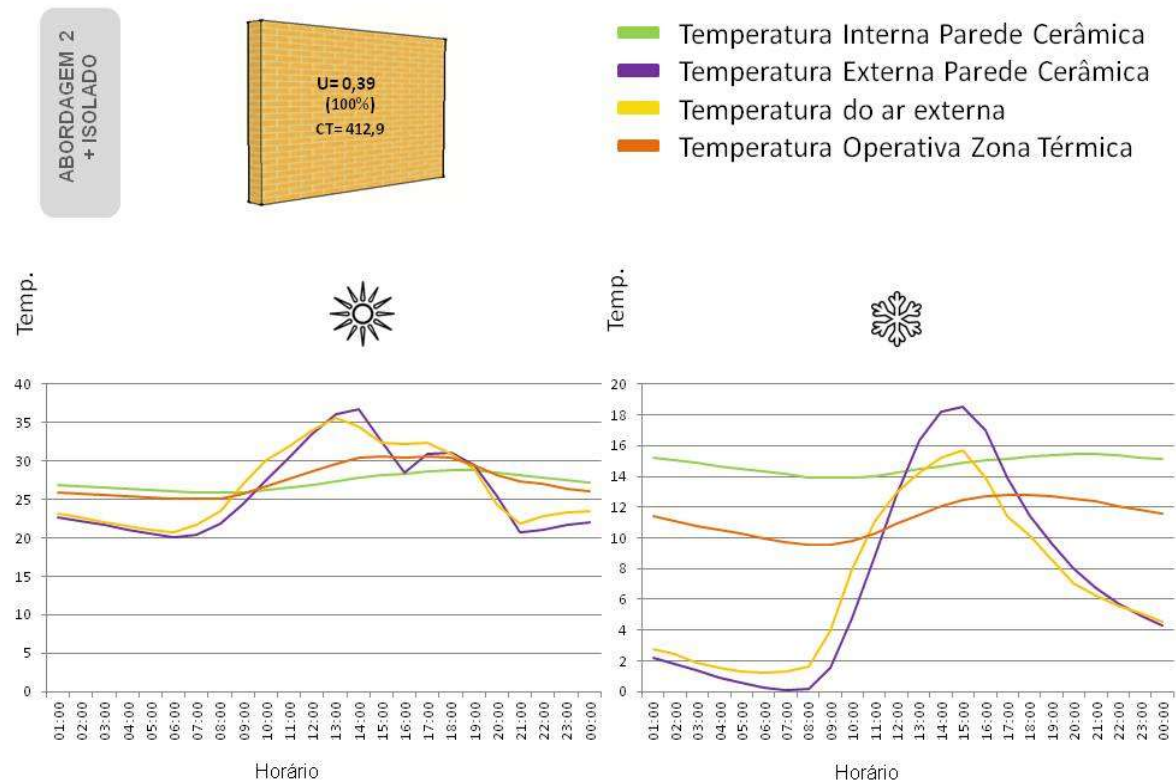


Fonte: autor

Na análise dos perfis de temperatura das demais abordagens, são mostradas apenas as temperaturas nas superfícies interna e externa da parede cerâmica e a temperatura do ar externo. Nessas abordagens, na modelagem para a simulação computacional, não há diferenciação de materiais entre estrutura e cerâmica. As Figuras 38 e 39 mostram as temperaturas no dia típico

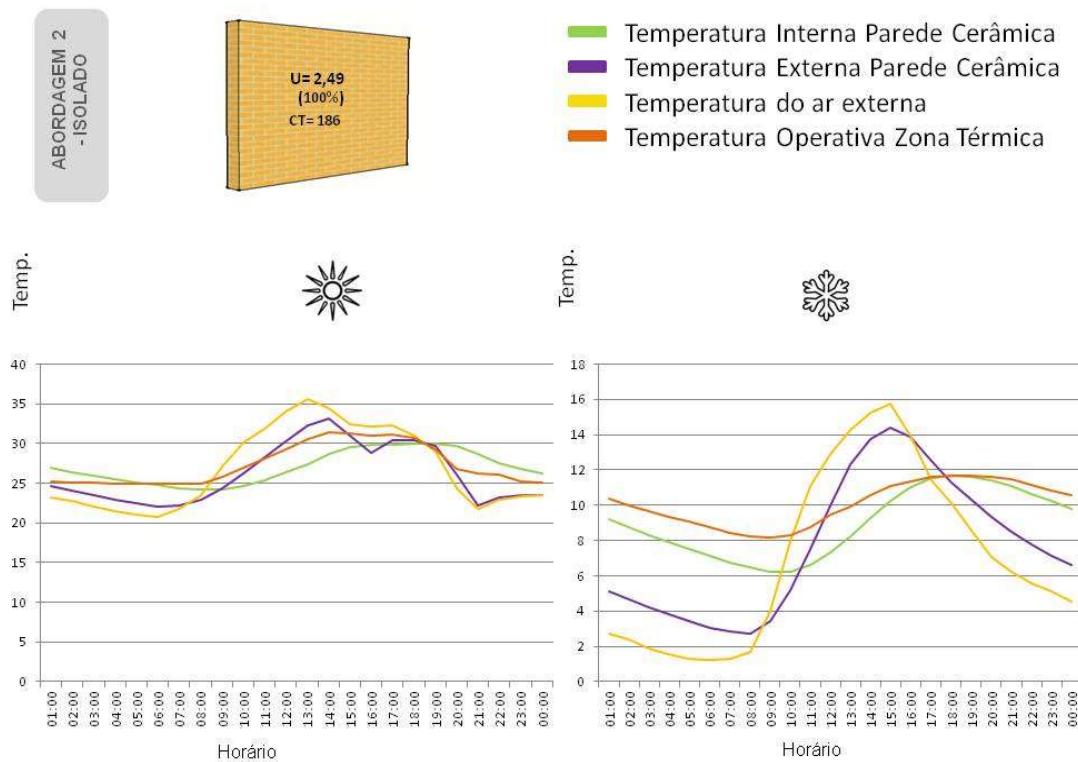
de verão e inverno para parede mais isolada e menos isolada, considerando a abordagem 2.

Figura 38- Temperaturas abordagem 2 $U=0,39 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$



Fonte: autor

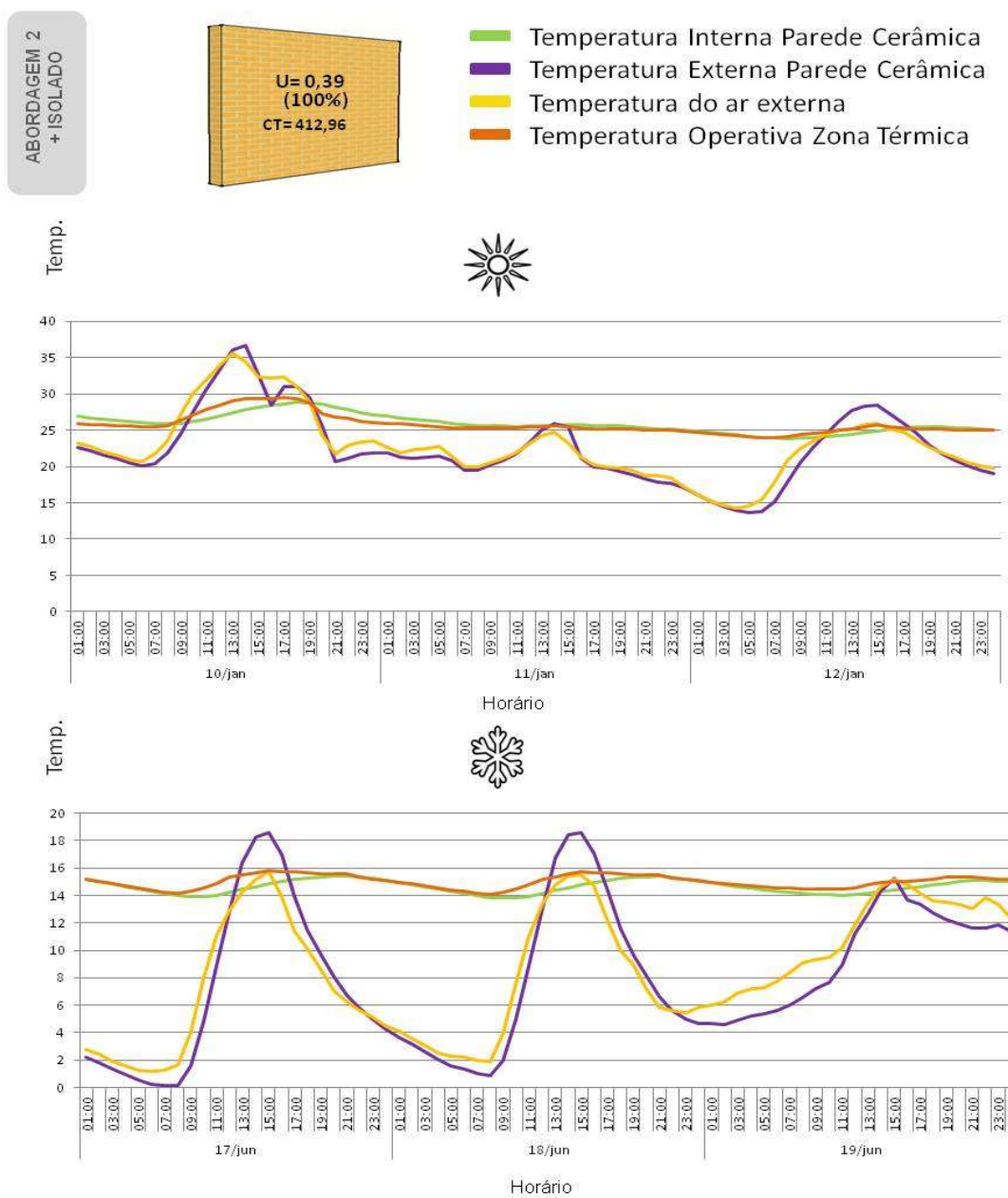
Figura 39- Temperaturas abordagem 2 $U=2,49\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$



Fonte: autor

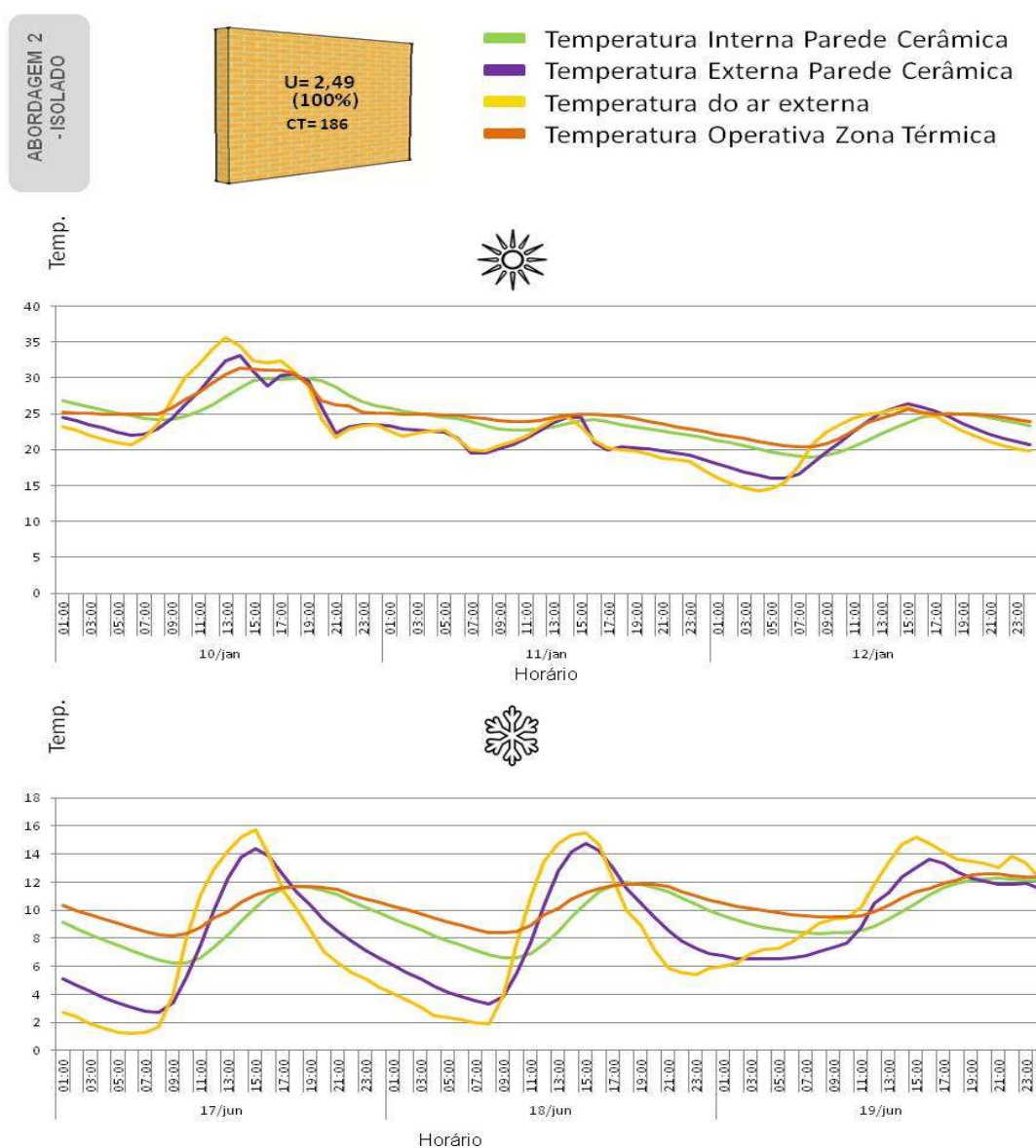
Nos perfis de temperatura da abordagem 2 ocorre o mesmo que na abordagem 1, a temperatura externa da superfície cerâmica se apresenta em um período do dia mais baixa que a temperatura do ar externo. O mesmo pode-se observar para os dias seguintes aos dias típicos, as imagens 40 e 41 ilustram o perfis de temperatura para 3 dias, a contar dos dias típicos de verão e inverno para o prédio mais e menos isolado, que apontam um comportamento semelhante ao do dia típico.

Figura 40- Perfil de temperatura em 3 dias $U=0,39W/(m^2.K)$



Fonte: autor

Figura 41- Perfil de temperatura em 3 dias verão U= 2,49W/(m².K)



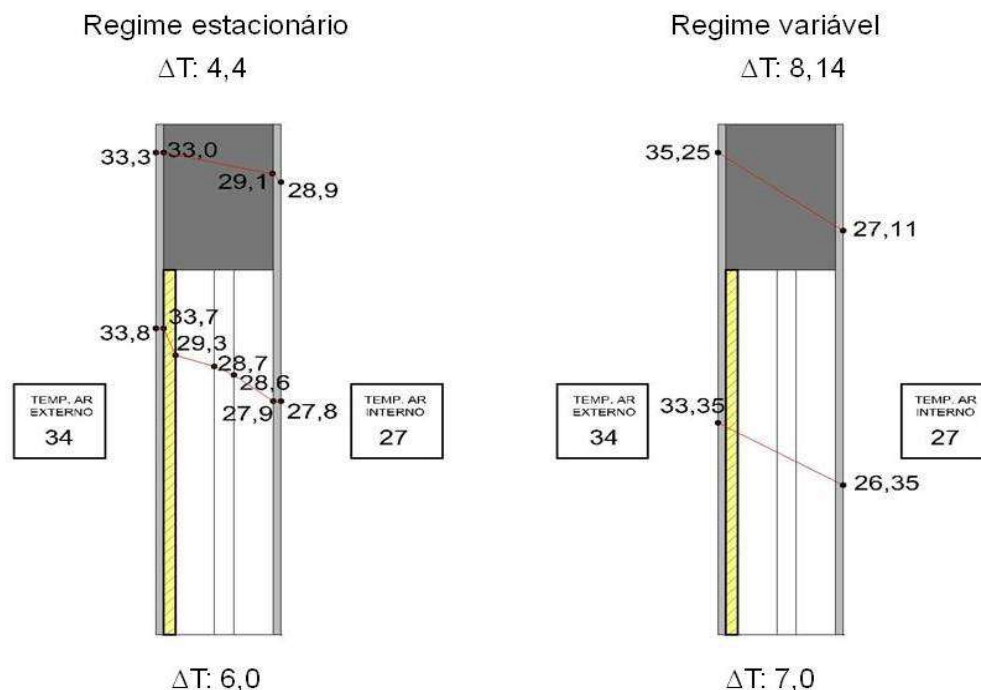
Fonte: autor

As abordagens 3, 4 e 5, também modeladas por meio de uma parede equivalente e sem a separação entre estrutura de concreto e paredes de alvenaria apresentaram comportamento semelhante ao da abordagem 2, com a cerâmica apresentando temperatura inferior à temperatura do ar externo durante algumas horas do dia. Os gráficos de temperatura e perfil de temperatura em 3 dias das abordagens 3, 4 e 5 encontram-se nos apêndices C, D e E deste trabalho, respectivamente.

Em um segundo momento para uma análise mais detalhada do comportamento das paredes com pontes térmicas, foi utilizada a abordagem 1, a única em que os materiais das pontes térmicas e fechamentos verticais são configurados de maneira diferentes na simulação computacional, para uma análise das temperaturas nas superfícies de concreto e cerâmica. Para isso foi escolhida uma hora do dia com radiação solar direta e foram analisadas as temperaturas das paredes externas e internas em regime estacionário através do software THERM 7.0, e em regime variável através da simulação computacional pelo *software EnergyPlus*, e ainda foram determinadas as diferença de ΔT nos dois regimes.

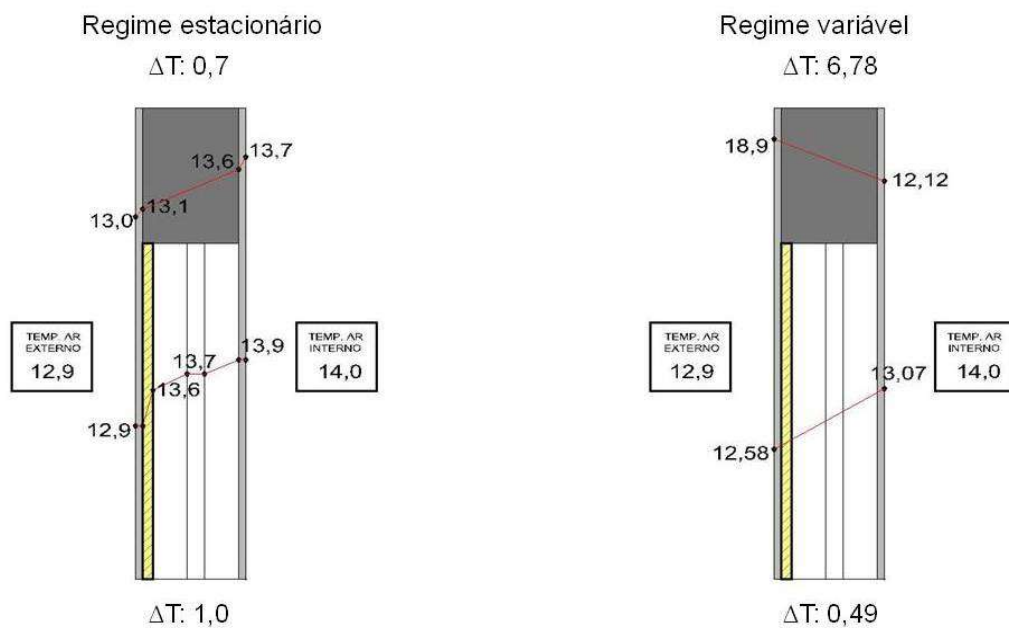
A análise foi realizada considerando a mesma superfície da fachada norte onde foram realizadas as análises dos perfis de temperatura no horário do meio dia. Ao contrário da simulação computacional, que mostra apenas as temperaturas nas superfícies internas e externas das paredes, o software THERM consegue mostrar a temperatura em cada parte da composição da parede. As imagens 42, 43, 44 e 45 abaixo mostram as temperaturas em regime estacionário e variável ao meio dia do dia típico de verão e inverno do prédio mais isolado e menos isolado.

Figura 42- Temperaturas regime estacionário e variável verão $U=0,39W/(m^2.K)$



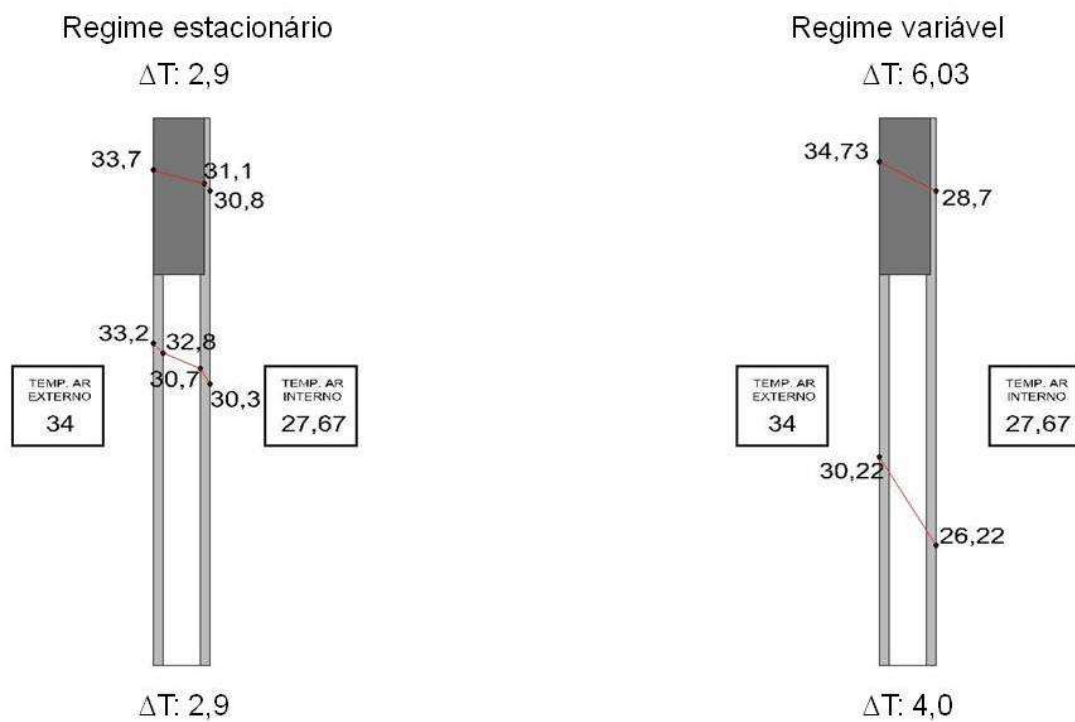
Fonte: autor

Figura 43- Temperaturas regime estacionário e variável inverno $U=0,39W/(m^2.K)$



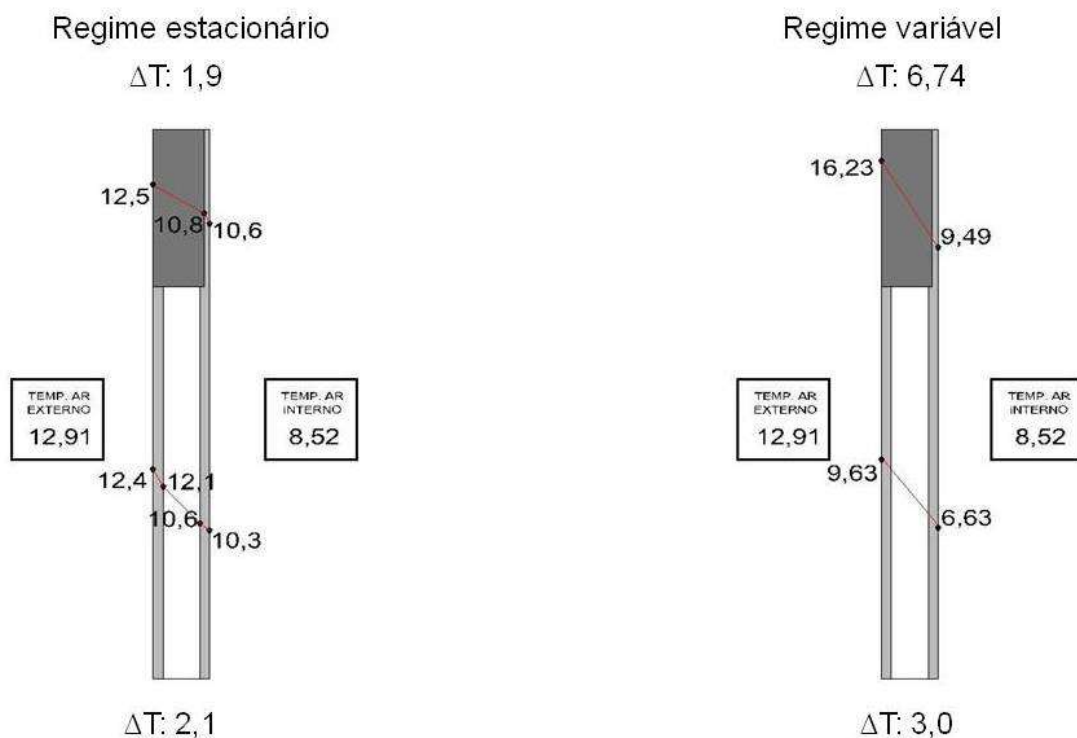
Fonte: autor

Figura 44- Temperaturas regime estacionário e variável verão $U=2,49W/(m^2.K)$



Fonte: autor

Figura 45- Temperaturas regime estacionário e variável inverno $U=2,49W/(m^2.K)$



Fonte: autor

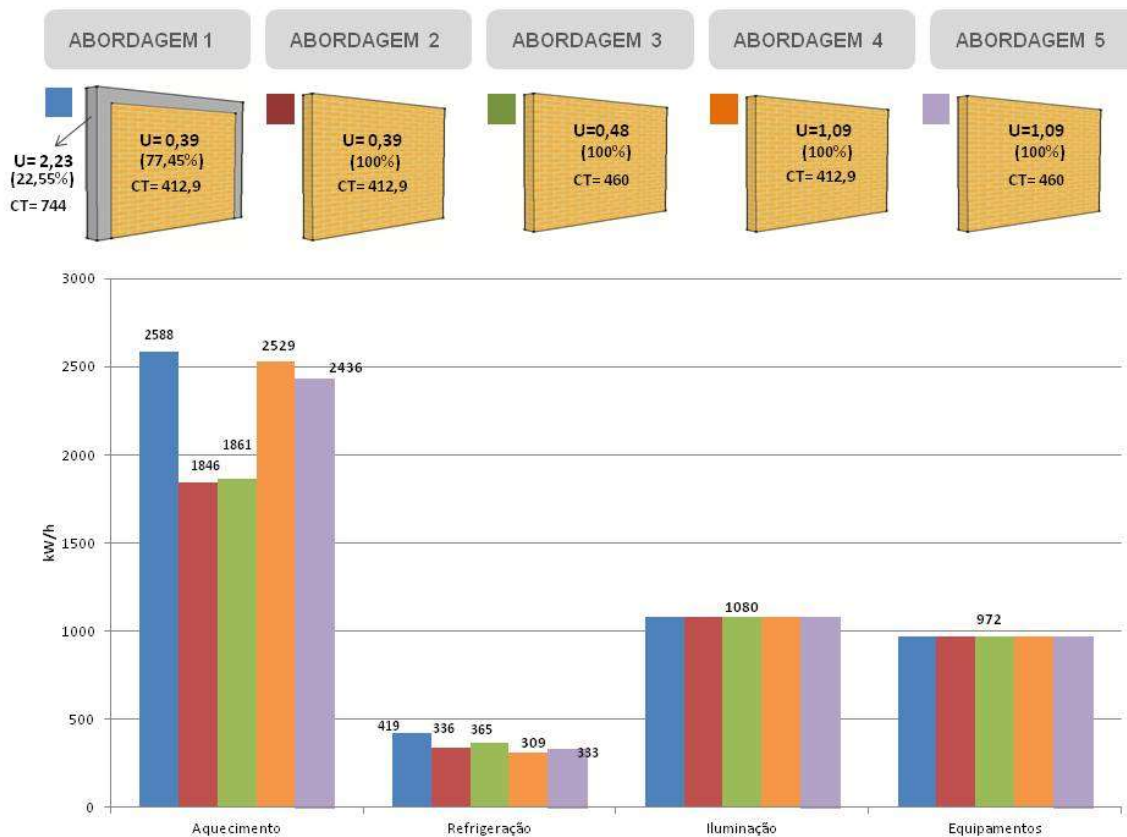
A partir da análise de temperaturas, mostrada nas imagens acima, pode-se perceber que na maioria dos casos, independente se em regime estacionário ou em regime variável, a temperatura da superfície de concreto armado onde ocorre a ponte térmica, aparece mais elevada do que a temperatura da superfície cerâmica. Isso pode se justificar pela grande diferença de capacidade térmica entre o concreto e a cerâmica, tanto no prédio mais isolado como no prédio menos isolado, a maior capacidade térmica do concreto fará com que ele leve mais tempo para esfriar.

Pode-se observar também que nos casos em regime variável a temperatura externa da superfície cerâmica se apresenta menor à temperatura do ar externa, o que ilustra os resultados dos perfis de temperatura nos dias típicos apresentados na análise de comportamento térmico das paredes. Em regime estacionário a temperatura externa da cerâmica se apresenta igual ou muito próxima a temperatura do ar externo.

4.3. Consumo energético

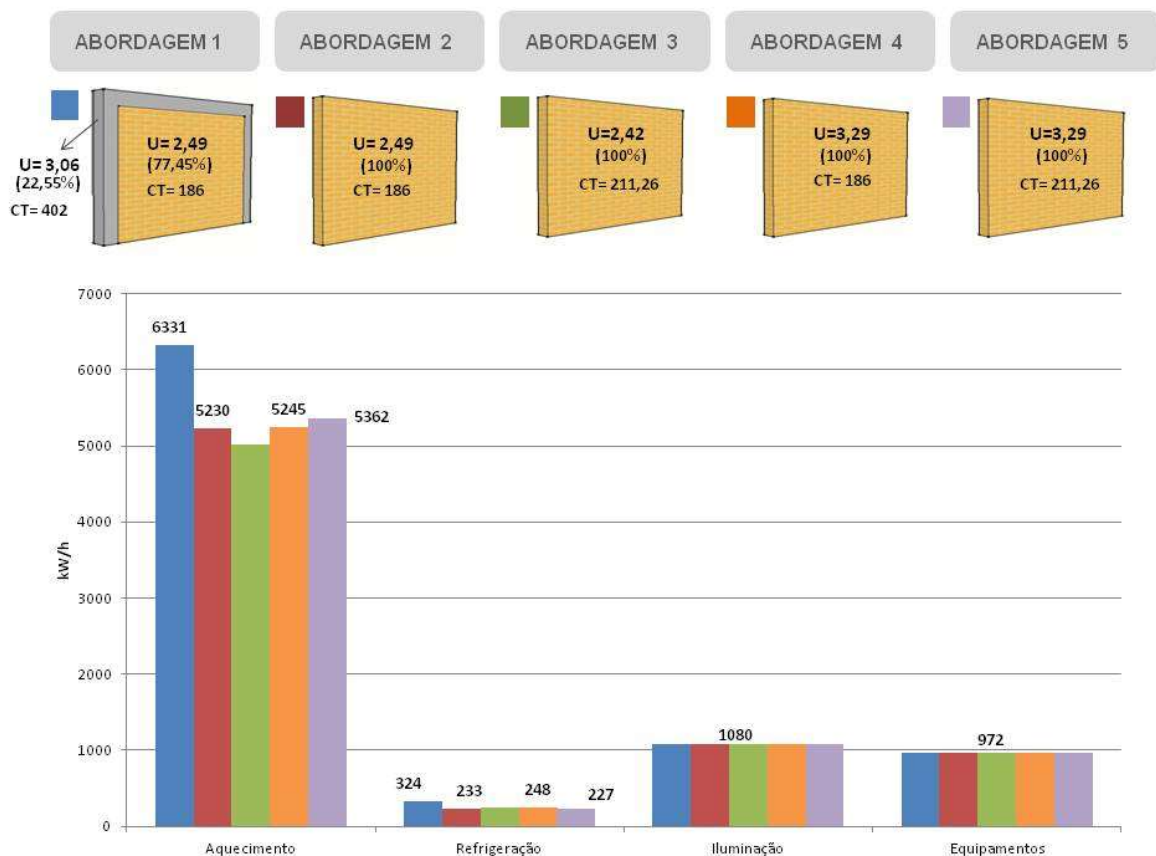
As figuras 46 e 47 abaixo ilustram os gráficos de consumo de energia por usos para aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos do prédio mais isolado e menos isolado nas cinco diferentes abordagens em estudo.

Figura 46- Consumo energético por usos prédio mais isolado



Fonte: autor

Figura 47- Consumo energético por usos prédio menos isolado



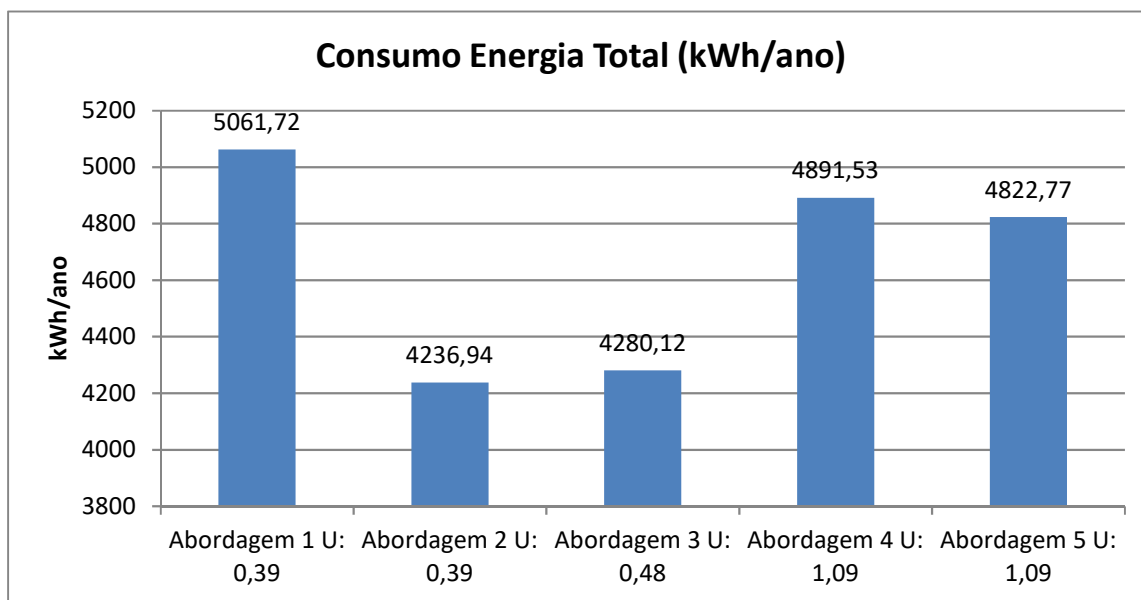
Fonte: autor

Em ambos os casos, a abordagem 1 é a que apresenta um maior consumo energético, tanto para aquecimento como para refrigeração. Sendo essa edificação simulada para a zona bioclimática 2, a maior parte do consumo de energia é destinada para o aquecimento. O consumo de iluminação e equipamentos é o mesmo em ambos os casos, pois as configurações são exatamente iguais para todos os casos.

Por ser simulado para a zona bioclimática 2, o prédio mais isolado apresenta menor consumo para aquecimento, pois no inverno o maior isolamento faz com que seja mais difícil a perda do calor de dentro para fora da edificação, no prédio menos isolado o calor é perdido com mais facilidade, fazendo com que seja usado mais energia para aquecimento. Se tratando do consumo para refrigeração, o prédio menos isolado é o que apresenta menor consumo, pois com a diferença de temperatura entre interior e exterior no verão e o baixo isolamento faz com que o calor saia da edificação com maior facilidade.

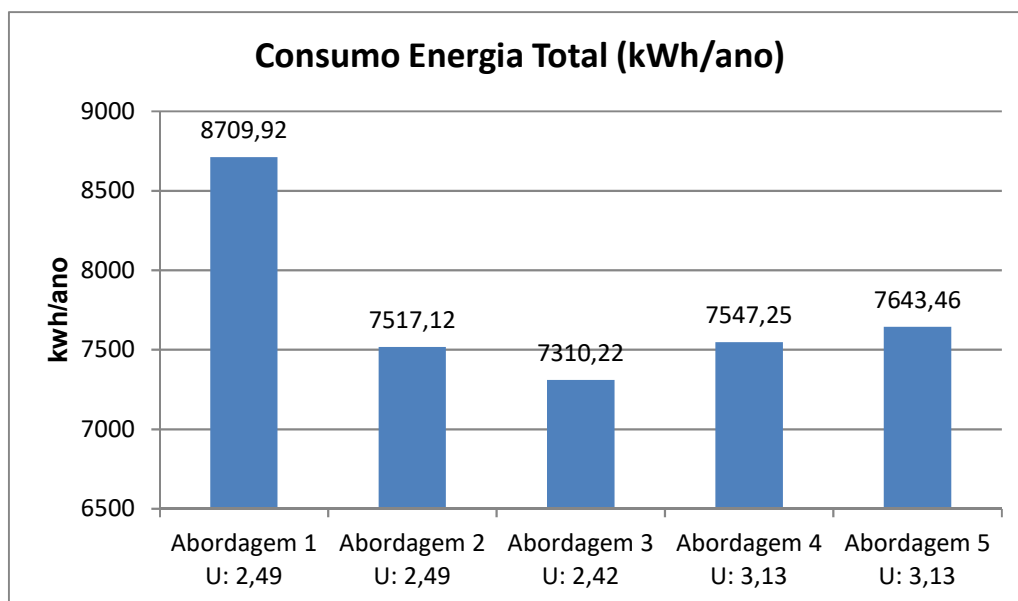
As imagens 48 e 49 abaixo mostram o consumo energético total do prédio com maior transmitância e menor transmitância em todas as abordagens analisadas, os resultados seguem o mesmo padrão dos resultados de consumo energético por uso, apresentados acima.

Figura 48- Consumo de energia total prédio mais isolado



Fonte: autor

Figura 49- Consumo de energia total prédio menos isolado



Fonte: autor

Os consumos energéticos totais mostram que existe diferença no consumo energético entre as cinco diferentes abordagens de modelagem que estão sendo analisadas.

A abordagem 1, que considera uma separação do concreto da estrutura e das paredes de alvenaria da edificação na modelagem para a simulação computacional é a que apresenta um consumo de energia mais elevado. Se a abordagem 1 for comparada com as abordagens 4 e 5 que são as que consideram o cálculo de pontes térmicas pela normativa ISO 10.211 a utilização da abordagem 1 pode estar superestimando o consumo de energia na edificação considerando que o software EnergyPlus não consegue calcular por si só o efeito das pontes térmicas em uma edificação. Para o prédio mais isolado a diferença entre a abordagem 1 entre as abordagens que consideram cálculo de pontes térmicas pode chegar a 4%, para o prédio menos isolado essa diferença pode ser até 13%.

A abordagem 2 que considera o método tradicional utilizado para a simulação computacional, sem diferenciação de materiais nos fechamentos verticais e sem cálculo de pontes térmicas apresenta menor consumo energético quando comparada as demais abordagens. Comparando a abordagem 2 com a abordagem 3 que não considera as pontes térmicas mas faz uma ponderação entre as áreas de estrutura de concreto e paredes de alvenaria podemos encontrar uma diferença de 3% no consumo energético quando o prédio é mais isolado e 1% quando o prédio é menos isolado. Neste caso a ponderação das áreas de estrutura e concreto não apresentou grandes diferenças nos resultados, porém se a abordagem 2 for comparada com as abordagens 4 e 5 que considera o cálculo de pontes térmicas as diferenças de consumo são de até 13% quando o prédio for mais isolado e até 3% quando o prédio é menos isolado. Portanto tanto a utilização da abordagem 2 como da abordagem 3 podem subestimar o consumo energético de uma edificação.

As abordagens 4 e 5 são as que consideram o cálculos de pontes térmicas pela ISO 10.211 e apenas diferem na a consideração da capacidade térmica apenas da cerâmica (abordagem 4) e a ponderação da capacidade térmica entre cerâmica e concreto (abordagem 5). Tanto para o prédio mais

isolado como menos isolado as duas abordagens apresentaram pequenas diferenças quando comparadas entre si. No prédio mais isolado a abordagem 4 sem ponderação de capacidade térmica é a que apresenta maior consumo, com uma diferença de 1% pra abordagem 5, no prédio menos isolado a abordagem 5 que pondera a capacidade térmica apresentou o maior consumo, também com uma diferença de 1% quando comparada com a abordagem 4.

5. CONCLUSÕES

O estudo apresentou a influência de cinco tipos diferentes de modelagem para simulação computacional com a consideração ou não de pontes térmicas, no consumo energético de uma edificação. Podemos concluir a importância do cálculo de pontes térmicas e a importância da consideração das pontes térmicas na modelagem para simulação computacional visto que, os resultados mostraram que o tipo de modelagem utilizado na simulação computacional pode significar uma diferença de consumo energético de até 13%, na edificação analisada.

Podemos concluir que a utilização da abordagem 1, apesar de simular a presença de pontes térmicas através da diferenciação de materiais na sua modelagem, não é a ideal para simular consumo energético de uma edificação, visto que o software *EnergyPlus* não consegue calcular efetivamente o efeito da ponte térmica linear. Porém, essa abordagem é a única que permite uma avaliação das temperaturas superficiais nos diferentes materiais que compõe a envoltória de uma edificação. A utilização dessa abordagem pode ser útil para o estudo do impacto de pontes térmicas na possibilidade de condensação e formação de fungos filamentosos nas superfícies internas de paredes externas das edificações.

Ficou evidenciado no estudo que as abordagens 4 e 5 que consideram as pontes térmicas por meio de cálculo são as que mais se aproximam da realidade, levando em consideração que maior parte das edificações possuem pontes térmicas nos seus fechamentos verticais, principalmente edificações mais isoladas onde foram observadas as maiores diferenças de consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASCIONE, F.; BIANCO, N.; ROSSI, F.; TURNI, G.; VANOLI, G. Different methods for the modelling of thermal bridges into energy simulation programs: Comparisons of accuracy for flat heterogeneous roofs in Italian climates. *Applied Energy*. Elsevier. v. 97, p. 405-418. 2012.

ASHRAE, ASHRAE Handbook - **Psychometrics**, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2009.

ASHRAE STANDARD 55 – 2010. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, GA, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3: desempenho térmico de edificações - Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro. 2005.

____NBR 15.575: **Desempenho: Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos. parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013

BEN 2017 – **Balanco Energético Nacional 2017**. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br/> >. Acessado em 02 de abril de 2017.

COSTA, Manuel Francisco. **Aplicação do DesignBuilder à avaliação de soluções de aquecimento e arrefecimento de edifícios para diferentes zonas portuguesas**. Dissertação de mestrado em Engenharia Cívil. Universidade do Porto. Portugal, 2013.

CUNHA, E.; GIOIELLI, B. **Analysis of Thermal Bridge Impact in a Hotel Building for the Eight Brazilian Bioclimatic Zones**. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, v. 9, p. 393-400, 2015.

CUNHA, E.; VAUPEL, K.; LÜKING, R. **Verificação da Formação de Mofo e Bolor em Superfícies Interiores de Paredes Exteriores Situadas na Zona Bioclimática 3 de Acordo com a NBR 15220 e PNBR 02.136.01**. 7º Seminário Internacional Espaço Sustentável "Inovações em Edifícios e Cidades". São Paulo, 2008.

DALBEM, R.; KNOP, S.; CUNHA, E.; OLIVEIRA, R. F. P.; RODRIGUES, M. F.; VICENTE, R.; **Verification of the Passive House Concept to the**

South of Brazil Climate. Journal of Civil Engineering and Architecture, v. 10, p. 937-945, 2016.

DE DEAR, R.; BRAGER, G. **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.** *ASHRAE Transactions*, 104 (1): 145-167, 1998.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NÖRMUNG. **DIN 4108** – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. Alemanha, 2001.

EVANS, M.; SCHILLER, S. **Verificación de puentes térmicos normas para definir soluciones admisibles.** 2010. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v.14 p. 51-58.

FREITAS, J.; DALBEM, R; KREBS, L. ; RODRIGUES, M. F. ; CUNHA, E. ; BRANDALISE, M.; PEGLOW, J ; FEDRIZZI, B ; SILVA, A. C. . Eficiência Energética de Edificações: Uma revisão dos Regulamentos Brasileiro e Português. In: II Encontro Nacional de Tecnologia Urbana, 2015, Passo Fundo. II Encontro Nacional de Tecnologia Urbana, 2015.

FREITAS, J.R. ; LEITZKE, R. K. ; ECHENIQUE, Beatriz ; GRALA DA CUNHA, EDUARDO . **Análise Do Impacto De Pontes Térmicas No Consumo De Energia Em Edificações Residenciais Nas Zonas Bioclimáticas 1, 2 E 3.** In: XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, São Paulo, 2016.

FRIESS, W.; RAKHSHAN, K.; HENDAWI, T.; TAJERZADEH, S.; **Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency.** Energy and Buildings, Netherlands. Elsevier, v. 44, p. 26-32, 2012.

GE, H; MCKLUNG; V; ZHANG; S. **Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study.** Energy and Buildings, Netherlands, Elsevier, v. 60, p. 163-173, 2013.

GE, H.; BABA, F. **Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building,** Energy and Buildings, Netherlands, Elsevier, v. 115, p. 106-118, 2015.

GUERRA, Fernanda Lamego. **Biodeterioração de conjunto histórico do século XIX em Pelotas/RS: fungos filamentosos.** 2012. 169p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

HENSEN, Jan L. M., LAMBERTS, Roberto. **Building Performance Simulation for Design and Operation.** Abingdon: Spon Press, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14.683** - Thermal bridges in building construction — Linear thermal transmittance — simplified methods and default values. Suíça: ISO, 2007.

___ **ISO 10.211** - Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations. Suíça: ISO, 2007.

INMETRO - Instituto Nacional de Meteorologia, Normalização e Qualidade Industrial. **RTQ-R**. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. Eletrobrás, 2010.

INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN. **IRAM 11.549**. Aislamiento térmico de edificios. Argentina: IRAM. 2002.

___ **IRAM 11.605**— Condicionamento Térmico de Edifícios – Condições de Habitabilidade nos Edifícios – Valores máximos de transmitância térmica em fechamentos opacos. Argentina: IRAM. 1996.

KIEBL, Kurt, SEDLBAUER, Klaus. **Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung**. 2001, Weimar.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. São Paulo: ProLivros, 2014.

LEVINSKYTĖ, A.; BANIONIS, K.; GELEŽIŪNAS, V. **The Influence of Thermal Bridges for Buildings Energy Consumption of “A” Energy Efficiency Class**. Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering. v. 2, n. 15, p. 44-58. Lituânia, 2016.

MARTIN, K; A. ERKOREKA; I. FLORES; M. ODRIOZOLA, SALA, J. M.. **Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions**. Energy and Buildings, Netherlands, Elsevier, v. 43, p. 529-535, 2011.

MARTINS, David; RAU, Sabrina; RECKZIEGEL, Simone; FERRUGEM, Anderson; SILVA, Antônio César. Ensaio sobre a utilização da automação de aberturas na simulação do desempenho térmico de edificações. ENCAC 2009, Natal, RN.

MELO, A.P.; WESTPHAL, F.S.; MATOS, M.. **Apostila do Curso Básico do Programa Energy Plus**. Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf> Acesso em: novembro de 2015.

MENEZES, Milton Serpa. **Avaliação do Desempenho Térmico de Habitações Sociais de Passo Fundo – RS**. Passo Fundo, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo.

OLIVEIRA, R. F.; **Construir segundo requisitos Passivhaus: Modelação de Pontes Térmicas**. Dissertação de mestrado. Aveiro. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, 2013.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulação no visual doe- 3.1**. Relatório de Pesquisa. Florianópolis, 2013.

PEREIRA, C; GHISI, E. **Calibração de um Modelo Computacional de uma Residência Unifamiliar Localizada em Florianópolis**- XIII Encontro nacional e IX Encontro Latino Americano de Conforto do Ambiente Construído. Anais do evento. 2015

PESSOA, Júlio Henrique Marques. **Análise da influência das pontes térmicas nos edifícios residenciais**. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2011.

SANTOS, G.; MENDES, N. **Hygrothermal bridge effects on the performance of buildings**. International Communications in Heat and Mass Transfer, Chicago, Elsevier, v. 53, p. 133-138, 2014.

THEODOSIOU, T. G.; PAPADOPOULOS, A.M.; **The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions**. Energy and Buildings, Netherlands. Elsevier, v. 40, p. 2083-2089, 2008.

WASSOUF, Micheel. **Da casa passiva à norma *Passivhaus*: a arquitetura passiva em climas quentes**. Editora Gustavo Gili, Barcelona, 2014

APÊNDICE A: Cálculos de transmitância térmica incrementada pelas pontes térmicas

A.1. Prédio mais isolado- transmitância base 0.39 W/(m².K)

$$(U \times A)_{parede\ alvenaria} + (U \times A)_{PT\ plana} + \Sigma (\Psi \times l)_{PT\ linear} = X$$

$$\left(0,39 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 194,61 m^2\right) + \left(2,23 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 27,634 m^2\right) + (103,30 W/K) = X$$

$$(75,89 W/K) + (61,62 W/K) + (103,30 W/K) = X$$

$$X = 263,75 W/K$$

$$U = \frac{X \left(\frac{W}{K}\right)}{AT_{(PT+alvenaria)(m^2)}}$$

$$U = \frac{240,81 W/K}{251,28 m^2}$$

$$U = 0,95 W/(m^2 \cdot K)$$

A.2. Prédio menos isolado- transmitância base 2.49 W/(m².K)

$$(U \times A)_{parede\ alvenaria} + (U \times A)_{PT\ plana} + \Sigma (\Psi \times l)_{PT\ linear} = X$$

$$\left(2,49 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 204,66 m^2\right) + \left(3,06 \frac{W}{m^2 \cdot K} \times 50,06 m^2\right) + (193,6022 W/K) = X$$

$$(509,60) + (153,18) + (193,60) = X$$

$$X = 856,38 W/K$$

$$U = \frac{X \left(\frac{W}{K}\right)}{AT_{(PT+alvenari)(m^2)}}$$

$$U = \frac{856,38 W/K}{259,86 m^2}$$

$$U = 3,29 W/(m^2 \cdot K)$$

APÊNDICE B: Cálculos de parede equivalente

B.1. Espessura equivalente da cerâmica $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ – Abordagem 1 e 2

$$U = \frac{1}{RT} \quad 0,39 = \frac{1}{RT} \quad RT = 2,5641$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 2,5641 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 2,3941}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$2,3941 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(eps)}{\lambda(eps)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + R_{ar} \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$2,3941 = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,03}{0,035} + \frac{X}{1,05} + 0,17 + \frac{X}{1,05} + \frac{0,02}{1,15}$$

$$2,3941 = 0,0173 + 0,8571 \frac{2X}{1,05} + 0,17 + 0,0173$$

$$\frac{2X}{1,05} = 1,3324$$

$$\mathbf{\underline{X = 0,66 \text{ m}}}$$

B.2. Densidade equivalente da cerâmica $U=0,39 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ e $CT=412,9 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$ - Abordagem 1 e 2

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$412,9 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{eps} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$412,9 = (0,02.1.2000) + (0,03.1,42.40) + (0,66.0,92.\rho) + (0,66.0,92.\rho) + (0,02.1.2000)$$

$$412,9 = 40 + 1,70 + 0,6072\rho + 0,6072\rho + 40$$

$$1,2144\rho = 331,2$$

$$\mathbf{\underline{\rho = 272,72 \text{ kg/m}^3}}$$

B.3. Espessura equivalente da cerâmica U= 2,49 W/(m².K)- Abordagem 1 e 2

$$U = \frac{1}{RT} \quad 2,49 = \frac{1}{RT} \quad RT = 0,4016$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 0,4016 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 0,2316}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$0,2316 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + R_{ar} \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$0,2316 = \frac{0,025}{1,15} + \frac{X}{1,05} + 0,14 + \frac{X}{1,05} + \frac{0,025}{1,15}$$

$$0,2316 = 0,0273 + \frac{2X}{1,05} + 0,14 + 0,0173$$

$$\frac{2X}{1,05} = 0,037$$

$$\mathbf{\underline{X = 0,02 m}}$$

B.4. Densidade equivalente da cerâmica U=2,49 W/(m².K) e CT=186 kJ/(m².K)- Abordagem 1 e 2

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$186 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$186 = (0,025.1.2000) + (0,02.1,42.40) + (0,02.0,92.\rho) + (0,66.0,92.\rho) + (0,025.1.2000)$$

$$186 = 45 + 0,0184\rho + 0,0184\rho + 45$$

$$0,0368\rho = 96$$

$$\mathbf{\underline{\rho = 2608,29 kg/m^3}}$$

B.5. Espessura equivalente da cerâmica U= 0,48 W/(m².K)- Abordagem 3

$$U = \frac{1}{RT} \quad 0,48 = \frac{1}{RT} \quad RT = 2,0833$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 2,0833 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 1,9133}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$1,9133 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(eps)}{\lambda(eps)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + R_{ar} \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$1,9133 = \frac{0,02}{1,15} + \frac{0,03}{0,035} + \frac{X}{1,05} + 0,17 + \frac{X}{1,05} + \frac{0,02}{1,15}$$

$$1,9133 = 0,0173 + 0,8571 \frac{2X}{1,05} + 0,17 + 0,0173$$

$$\frac{2X}{1,05} = 0,8516$$

$$\mathbf{\underline{X = 0,44 m}}$$

B.6. Densidade equivalente da cerâmica U= 0,48 W/(m².K) e CT=460 kJ/(m².K)- Abordagem 3

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$460 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{eps} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$460 = (0,02.1.2000) + (0,03.1,42.40) + (0,44.0,92.\rho) + (0,44.0,92.\rho) + (0,02.1.2000)$$

$$460 = 40 + 1,70 + 0,4048\rho + 0,4048\rho + 40$$

$$0,8096\rho = 378,3$$

$$\mathbf{\underline{\rho = 467,26 kg/m^3}}$$

B.7. Espessura equivalente da cerâmica U= 2,42 W/(m².K)- Abordagem 3

$$U = \frac{1}{RT} \quad 2,42 = \frac{1}{RT} \quad RT = 0,4132$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 0,4132 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 0,2432}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$0,2432 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$1,9133 = \frac{0,025}{1,15} + \frac{X}{1,05} + 0,14 + \frac{X}{1,05} + \frac{0,025}{1,15}$$

$$1,9133 = 0,0217 + \frac{2X}{1,05} + 0,14 + 0,0217$$

$$\frac{2X}{1,05} = 0,598$$

$$\mathbf{\underline{X = 0,03 m}}$$

B.8. Densidade equivalente da cerâmica U= 2,42 W/(m².K) e CT=211,26 kJ/(m².K)- Abordagem 3

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$211,26 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$211,26 = (0,025.1.2000) + (0,03.0,92.\rho) + (0,03.0,92.\rho) + (0,025.1.2000)$$

$$211,26 = 45 + 0,0276\rho + 0,0276\rho + 45$$

$$0,0552\rho = 121,26$$

$$\mathbf{\underline{\rho = 2.196 \text{ kg/m}^3}}$$

B.9. Espessura equivalente da cerâmica U= 0,95 W/(m².K)- Abordagem 4

$$U = \frac{1}{RT} \quad 0,95 = \frac{1}{RT} \quad RT = 1,0526$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 1,0526 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 0,8826}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$0,8826 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + R_{ar} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$0,8826 = \frac{0,02}{1,15} + \frac{X}{1,05} + 0,17 + \frac{X}{1,05} + \frac{0,02}{1,15}$$

$$1,9133 = 0,0173 + \frac{2X}{1,05} + 0,17 + 0,0173$$

$$\frac{2X}{1,05} = 0,678$$

$$\mathbf{X = 0,35 m}$$

B.10. Densidade equivalente da cerâmica U= 0,95 W/(m².K) e CT= 412,90 kJ/(m².K)- Abordagem 4

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$412,90 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$412,90 = (0,02.1.2000) + (0,35.0,92.\rho) + (0,35.0,92.\rho) + (0,02.1.2000)$$

$$412,90 = 40 + 0,322\rho + 0,322\rho + 40$$

$$0,644\rho = 332,9$$

$$\mathbf{\rho = 516,92 kg/m^3}$$

B.11. Espessura equivalente da cerâmica U= 3,29 W/(m².K)- Abordagem 4

$$U = \frac{1}{RT} \quad 3,29 = \frac{1}{RT} \quad RT = 0,3039$$

$$rt = RT - r_{si} - r_{se} \quad rt = 0,3039 - 0,13 - 0,04 \quad \mathbf{rt = 0,1339}$$

$$R_{real} = R_{equiv}$$

$$0,1339 = \frac{e(reb)}{\lambda(reb)} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + R_{ar} + \frac{e(cer)}{\lambda(cer)} + \frac{e(reb)}{\lambda(reb)}$$

$$0,1339 = \frac{0,025}{1,15} + \frac{X}{1,05} + \frac{X}{1,05} + \frac{0,025}{1,15}$$

$$0,1339 = 0,0217 + \frac{2X}{1,05} + 0,0217$$

$$\frac{2X}{1,05} = 0,0905$$

$$\mathbf{\underline{X = 0,05 m}}$$

B.12. Densidade equivalente da cerâmica U= 3,29 W/(m².K) e CT= 186 kJ/(m².K)- Abordagem 4

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$186 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$186 = (0,025.1.2000) + (0,05.0,92.\rho) + (0,05.0,92.\rho) + (0,025.1.2000)$$

$$186 = 45 + 0,046\rho + 0,046\rho + 45$$

$$0,092\rho = 96$$

$$\mathbf{\underline{\rho = 1043,47 kg/m^3}}$$

B.13. Densidade equivalente da cerâmica U= 0,95 W/(m².K) e CT= 460 kJ/(m².K)- Abordagem 5

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$460 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$460 = (0,02.1.2000) + (0,35.0,92.\rho) + (0,35.0,92.\rho) + (0,02.1.2000)$$

$$460 = 40 + 0,322\rho + 0,322\rho + 40$$

$$0,644\rho = 380$$

$$\rho = \underline{\underline{590,06 \text{ kg/m}^3}}$$

B.14. Densidade equivalente da cerâmica U= 3,29 W/(m².K) e CT= 211,26kJ/(m².K)- Abordagem 5

$$CT_{real} = CT_{equiv}$$

$$211,26 = (e.c.\rho)_{reb} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{cer} + (e.c.\rho)_{reb}$$

$$211,26 = (0,025.1.2000) + (0,05.0,92.\rho) + (0,05.0,92.\rho) + (0,025.1.2000)$$

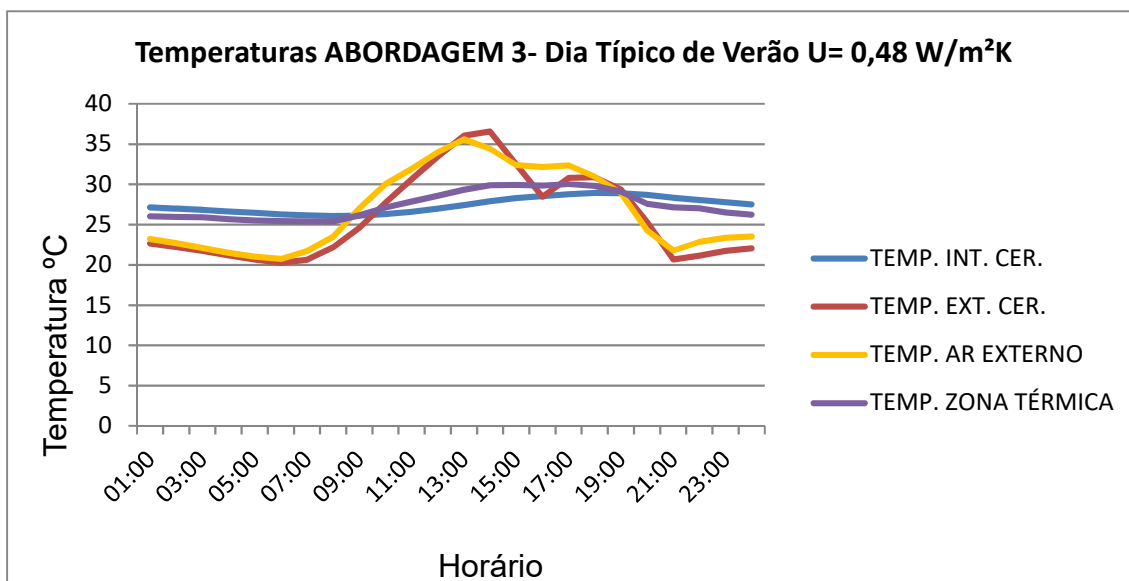
$$211,26 = 45 + 0,046\rho + 0,046\rho + 45$$

$$0,092\rho = 121,26$$

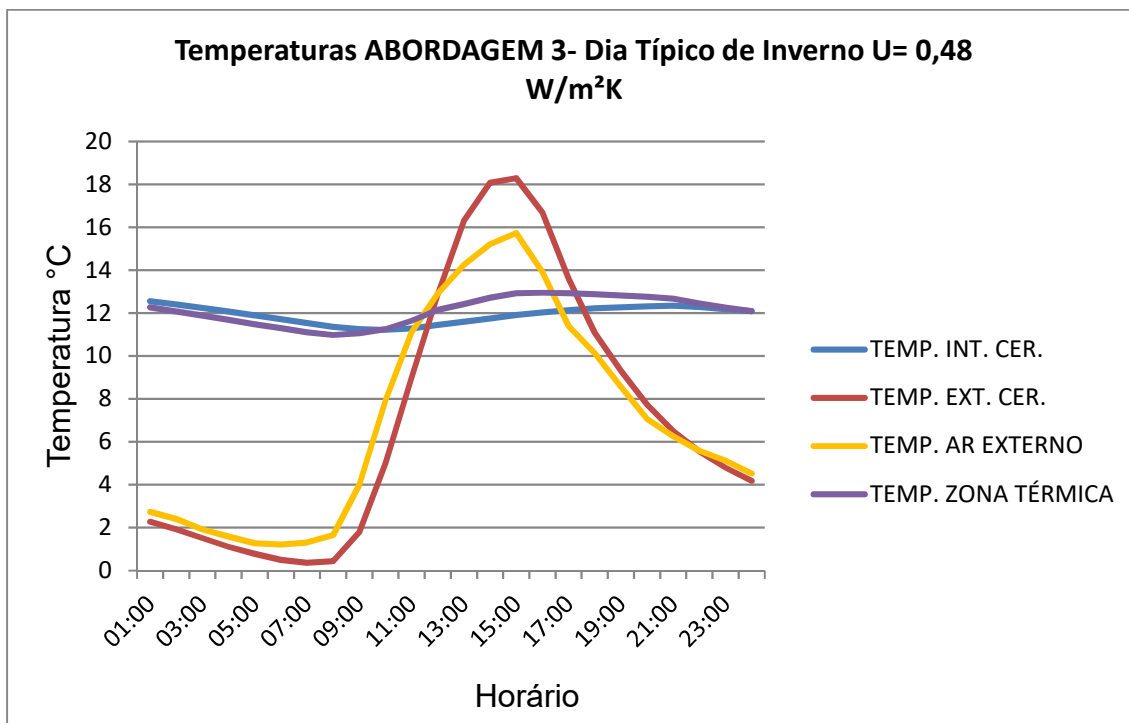
$$\rho = \underline{\underline{1318,04 \text{ kg/m}^3}}$$

APÊNDICE C: Comportamento térmico das paredes na abordagem 3

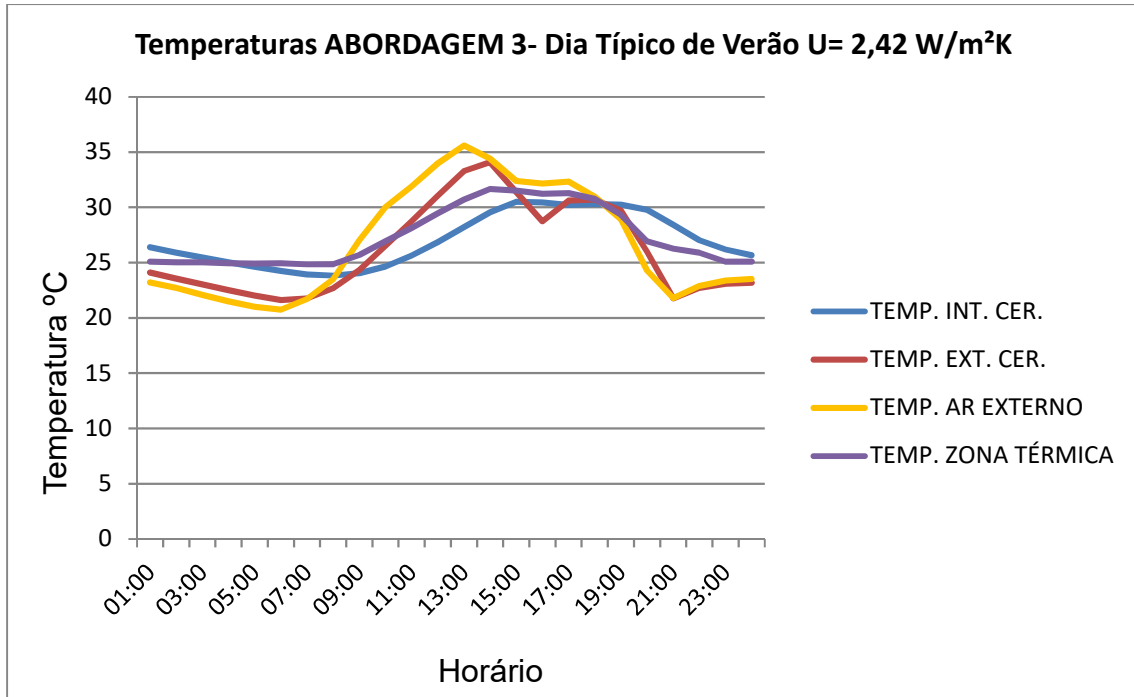
C.1- Temperaturas dia típico de verão abordagem 3 $U=0,48 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



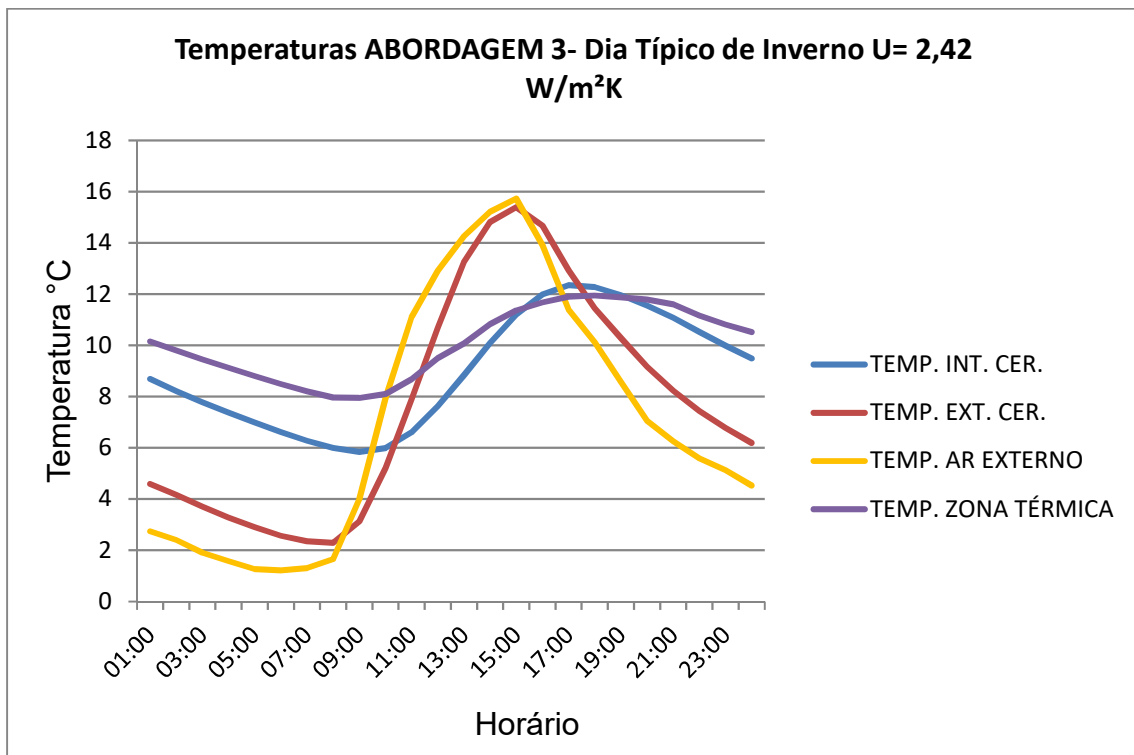
C.2- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 3 $U=0,48 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



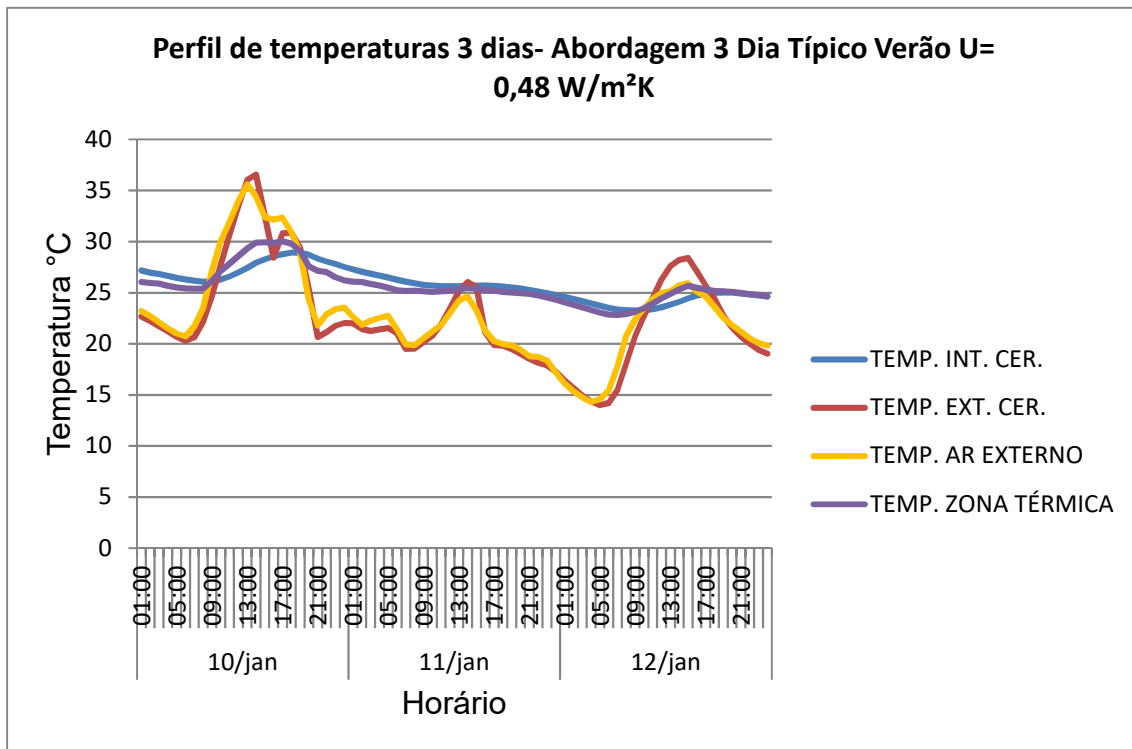
C.3- Temperaturas dia típico de verão abordagem 3 $U=2,42 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$



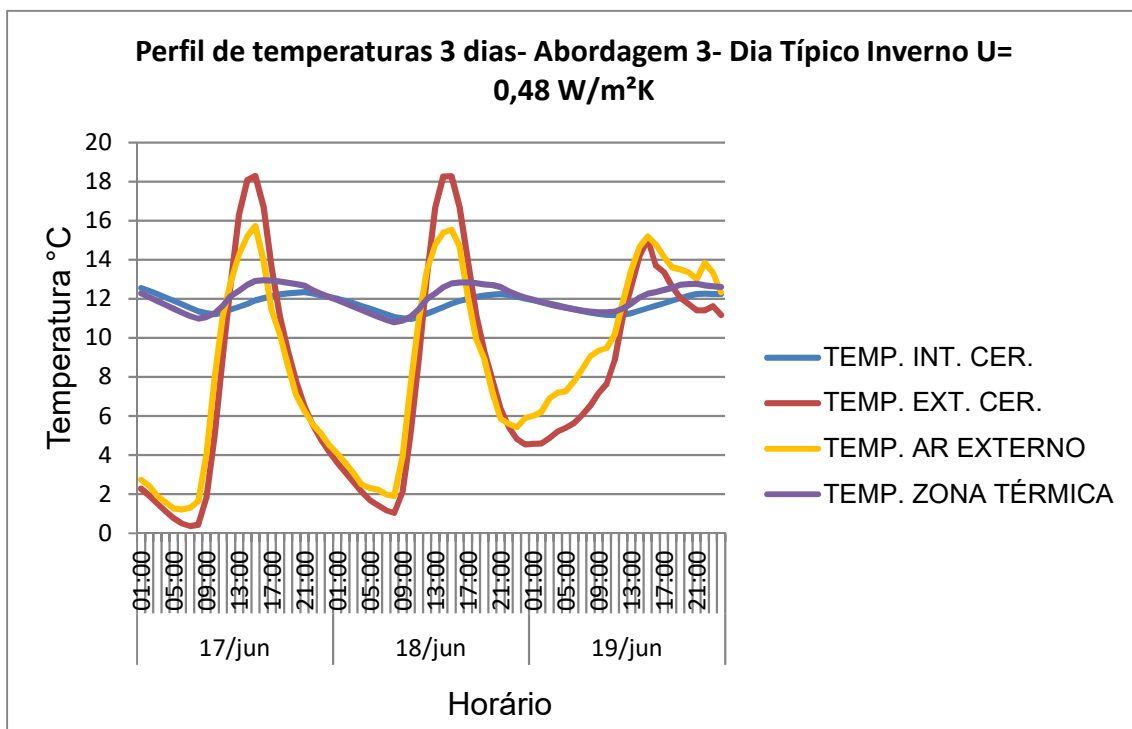
C.4- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 3 $U=2,42 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$



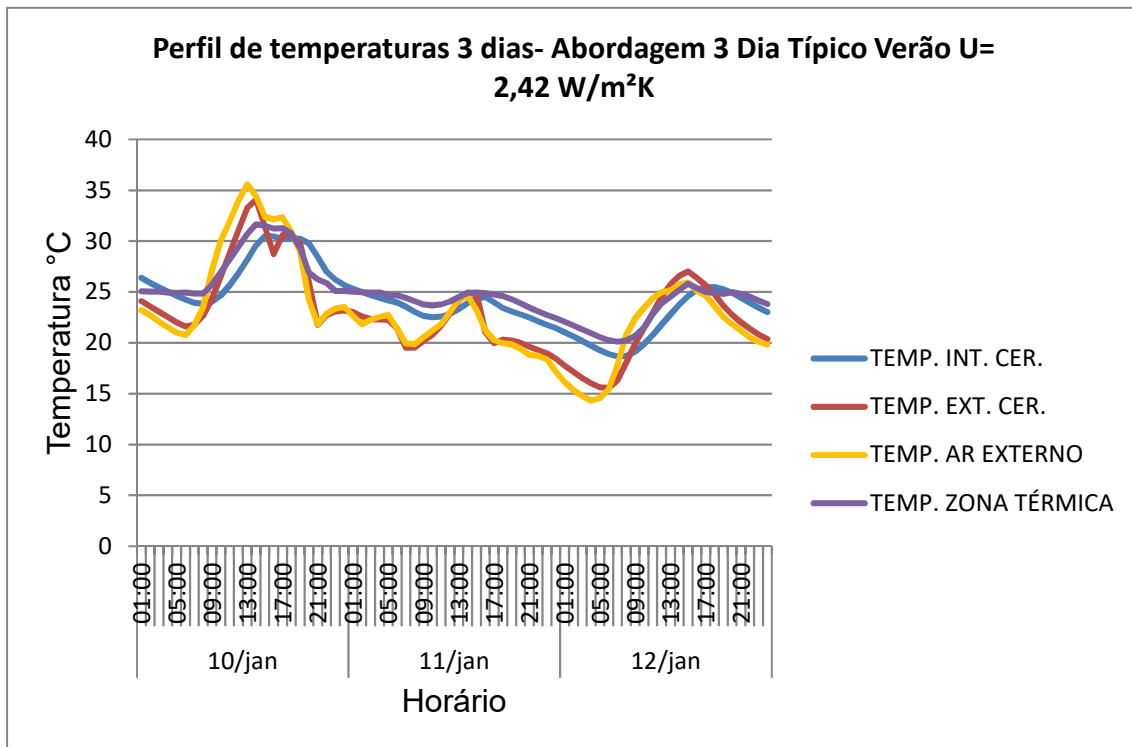
C.5- Perfil de temperatura em 3 dias verão U=0,48 W/(m².K)



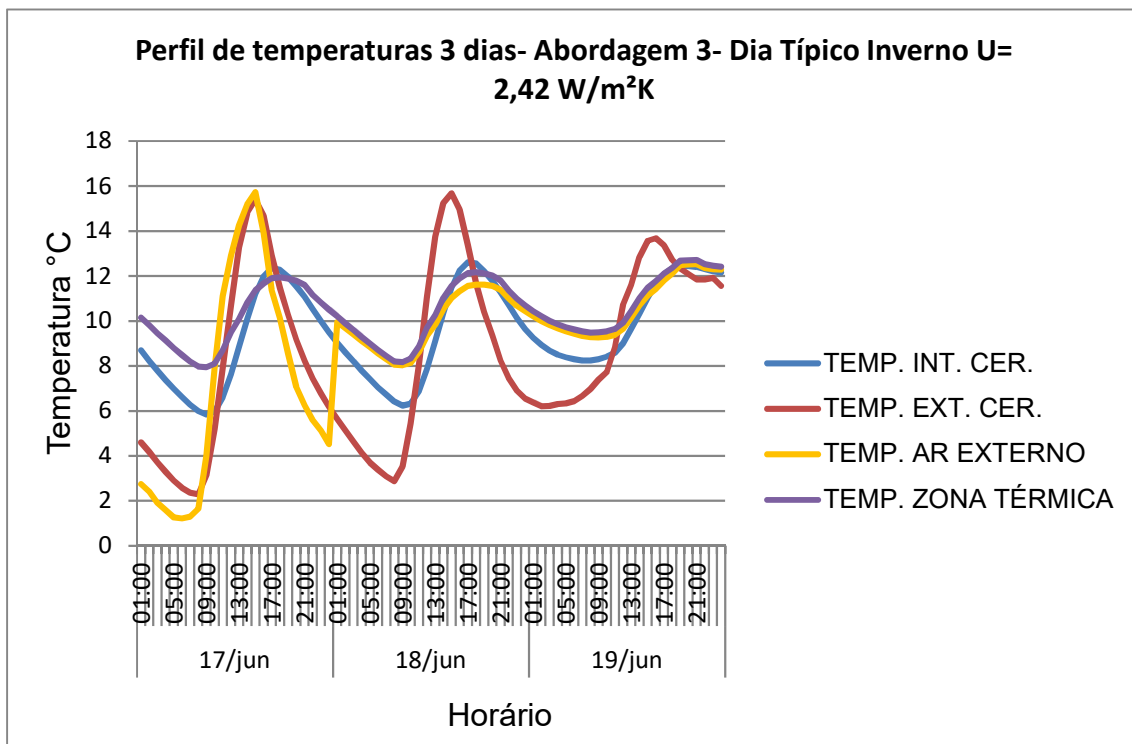
C.6- Perfil de temperatura em 3 dias inverno U=0,48 W/(m².K)



C.7- Perfil de temperatura em 3 dias verão U=2,42 W/(m².K)

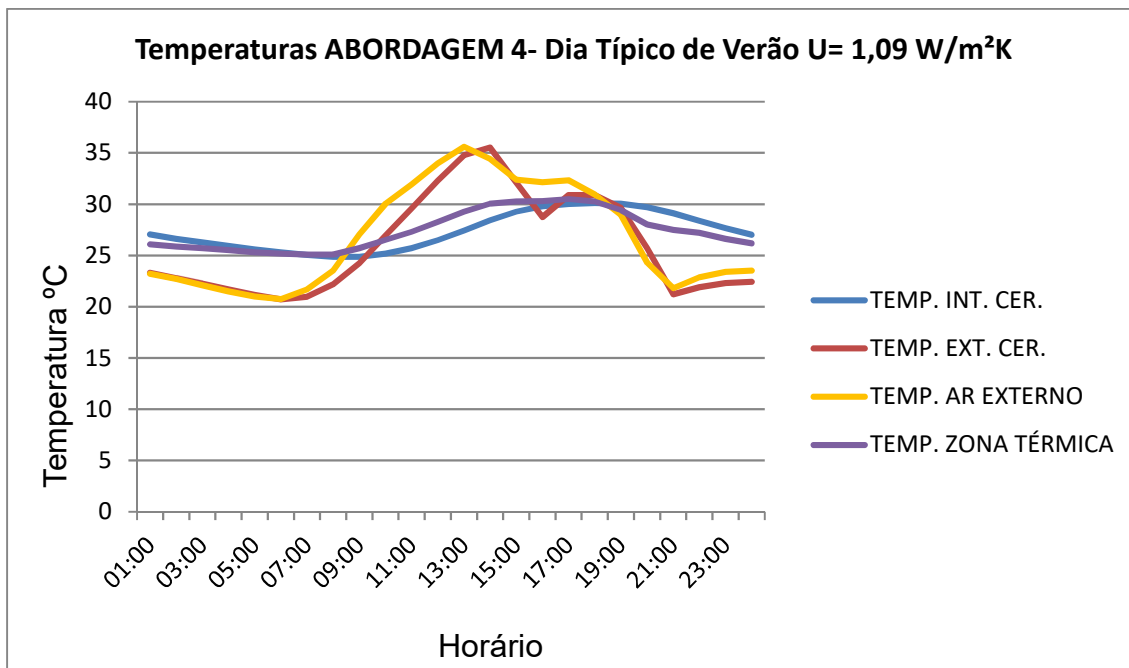


C.8- Perfil de temperatura em 3 dias inverno U=2,42 W/(m².K)

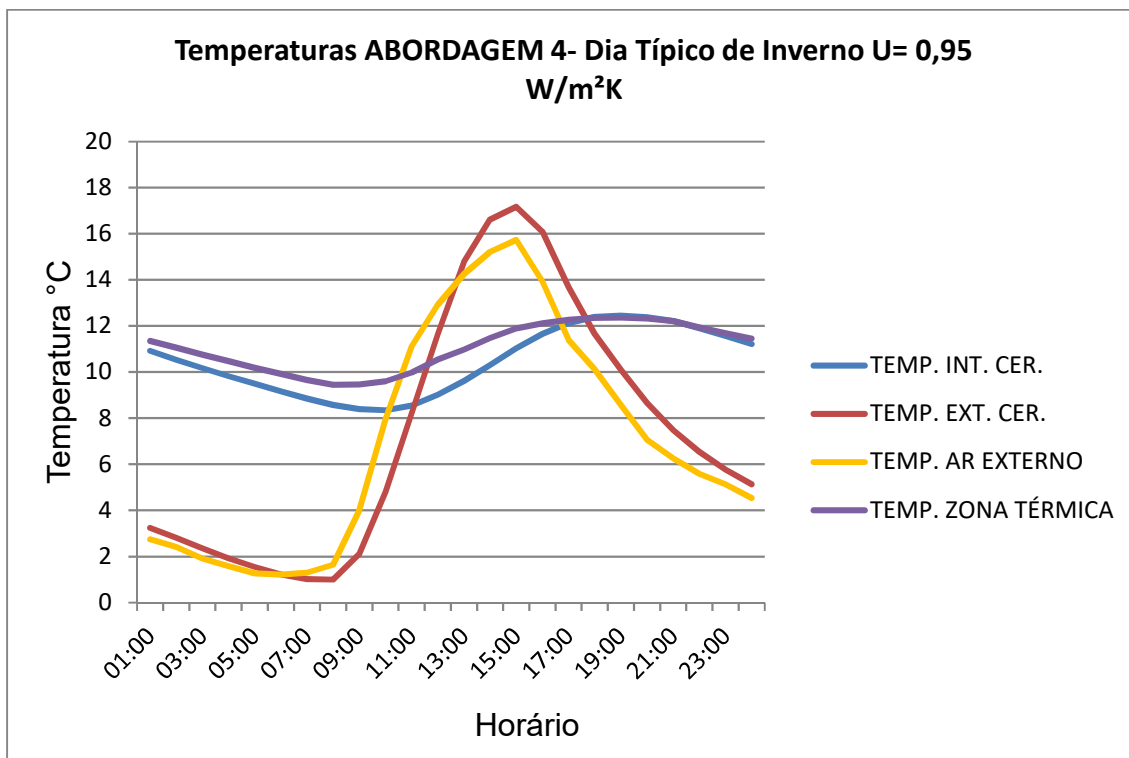


APÊNDICE D: Comportamento térmico das paredes na abordagem 4

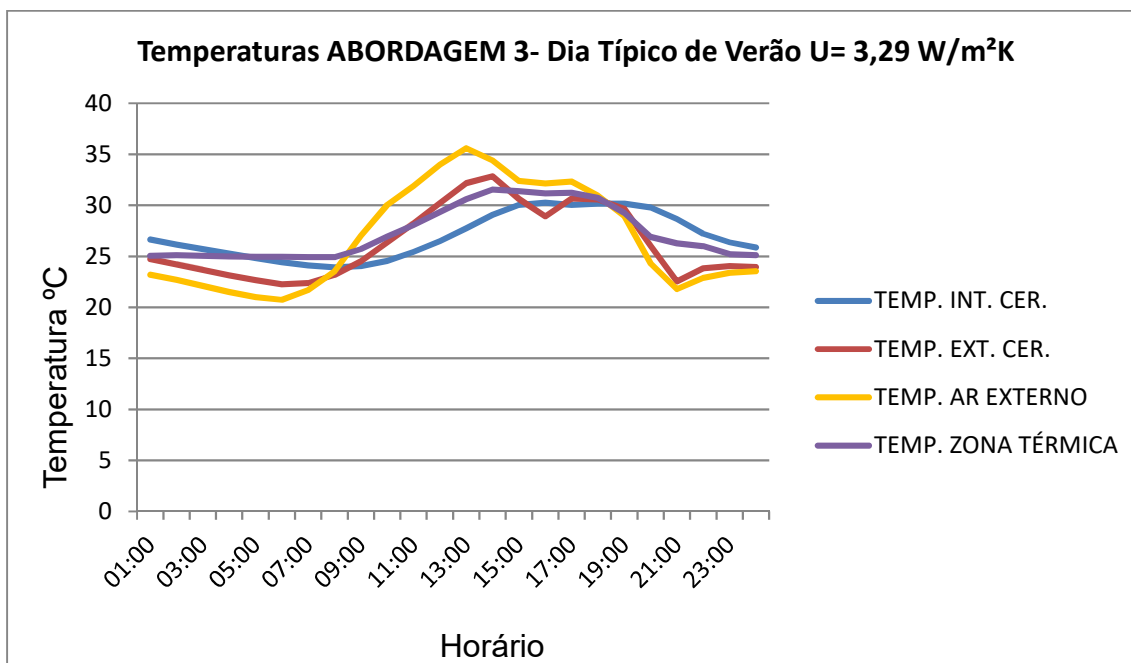
D.1- Temperaturas dia típico de verão abordagem 4 $U=0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



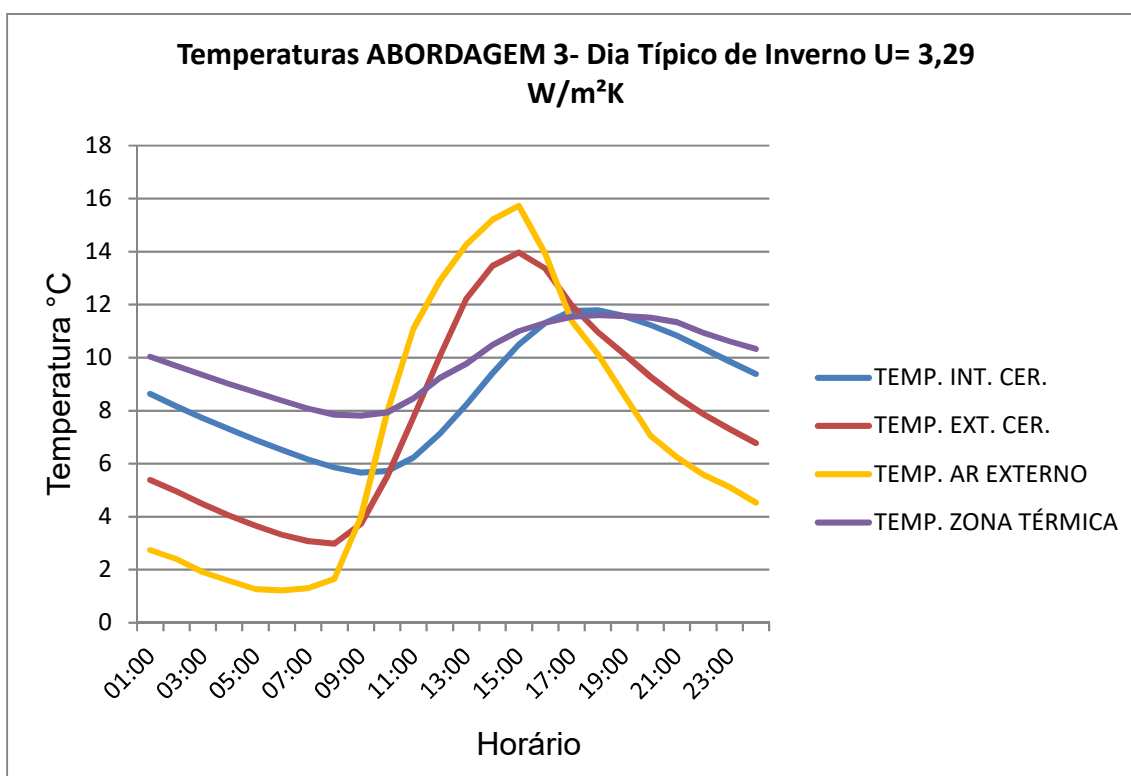
D.2- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 4 $U=0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



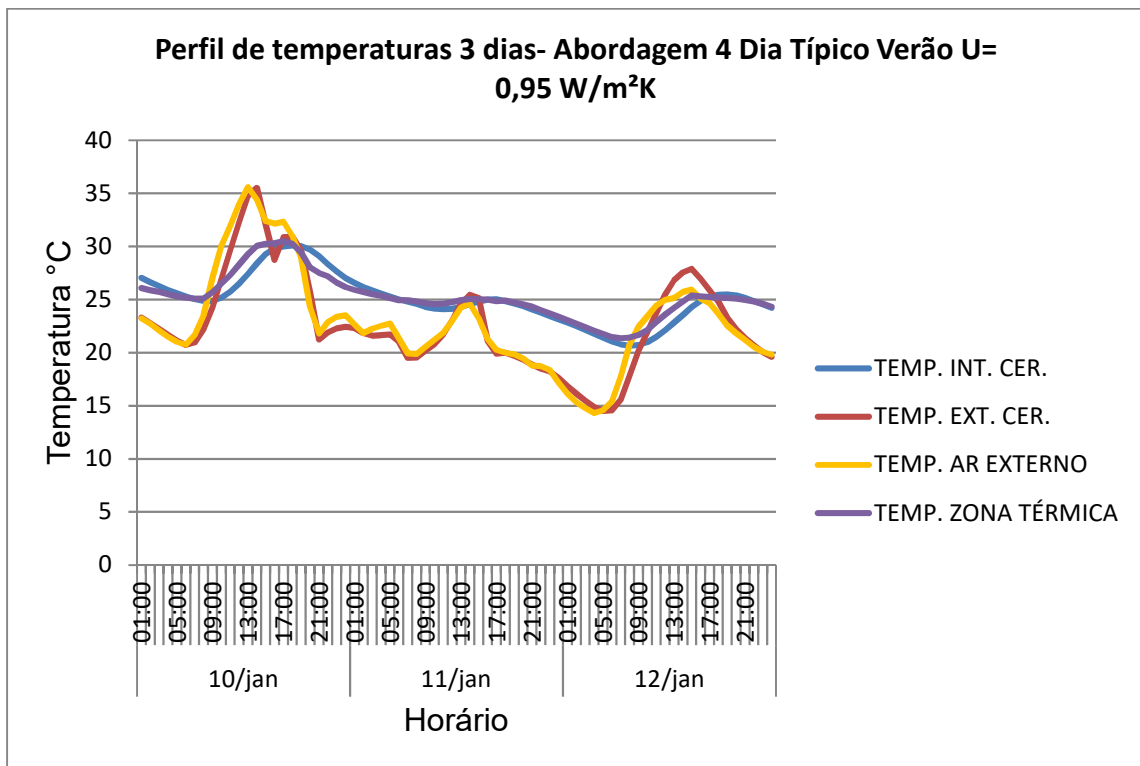
D.3- Temperaturas dia típico de verão abordagem 4 $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



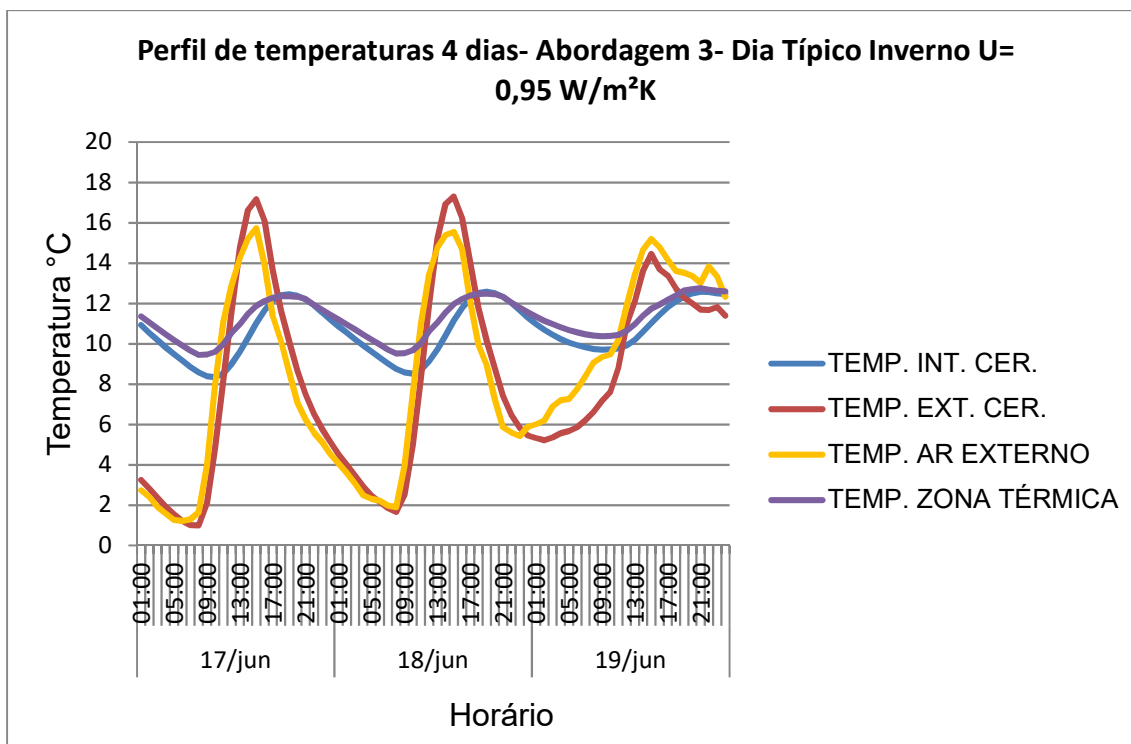
D.4- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 4 $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



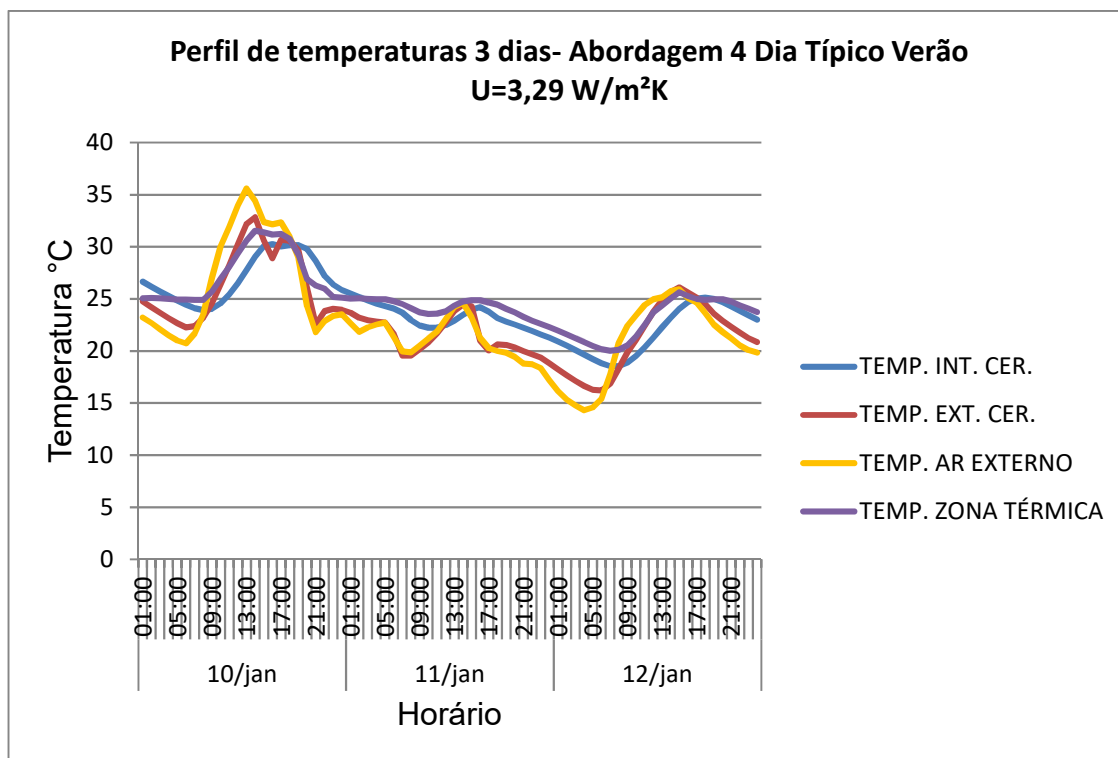
D.5- Perfil de temperatura em 3 dias verão $U=0.95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



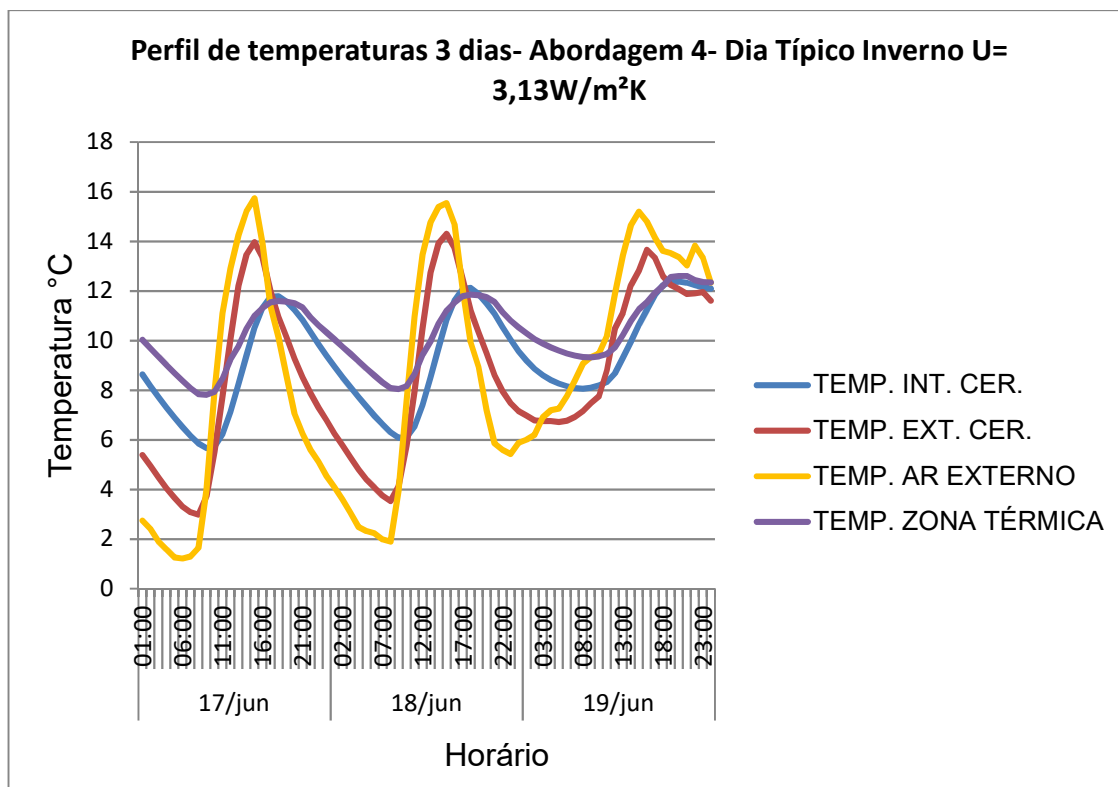
D.6- Perfil de temperatura em 3 dias inverno $U=0.95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



D.7- Perfil de temperatura em 3 dias verão U=3,29 W/(m².K)

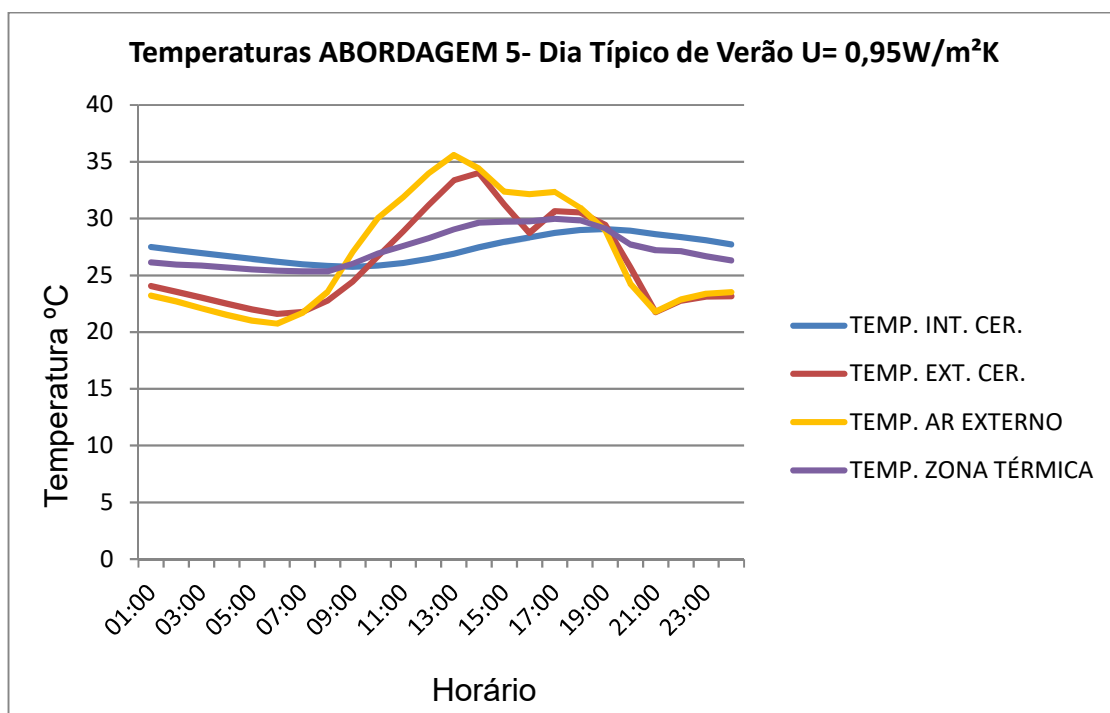


D.8- Perfil de temperatura em 3 dias inverno U=3,13 W/(m².K)

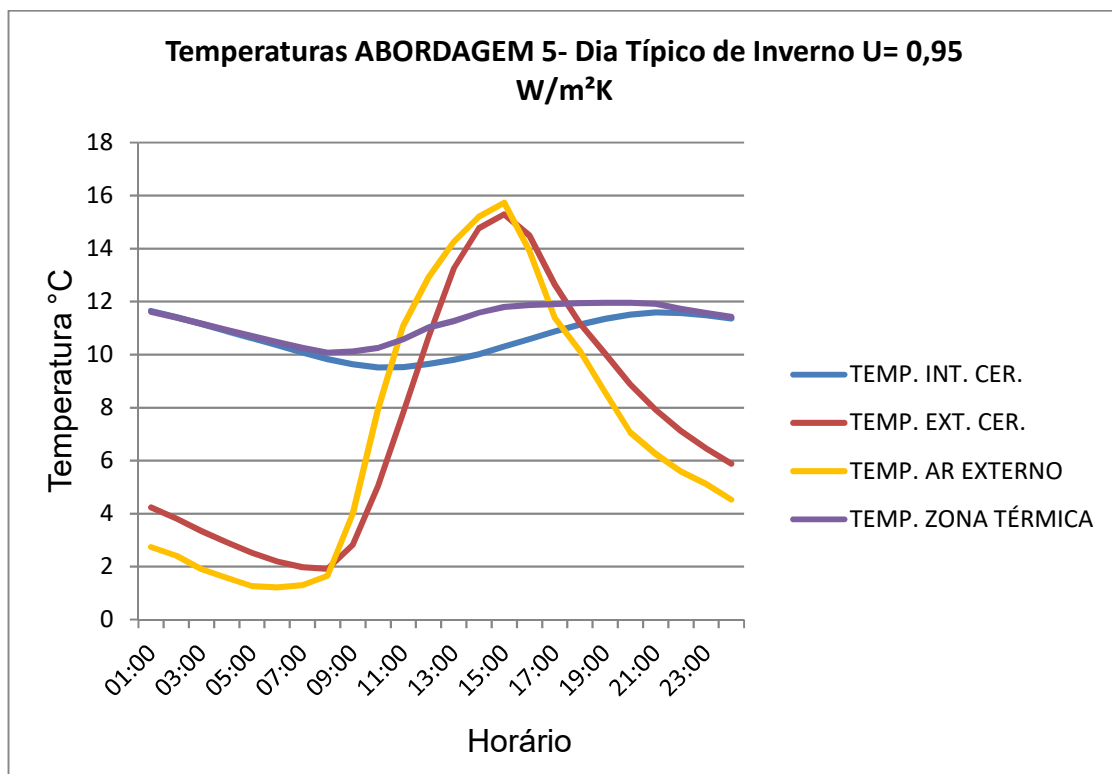


APÊNDICE E: Comportamento térmico das paredes na abordagem 5

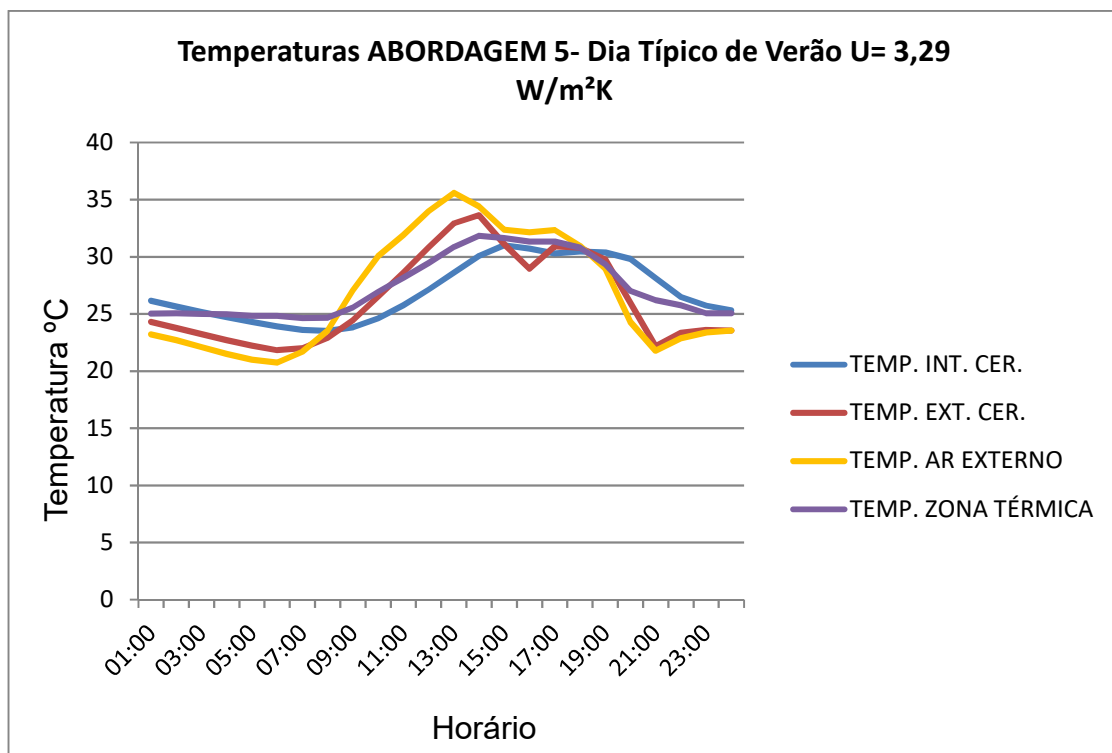
E.1- Temperaturas dia típico de verão abordagem 5 U=0,95 W/(m².K)



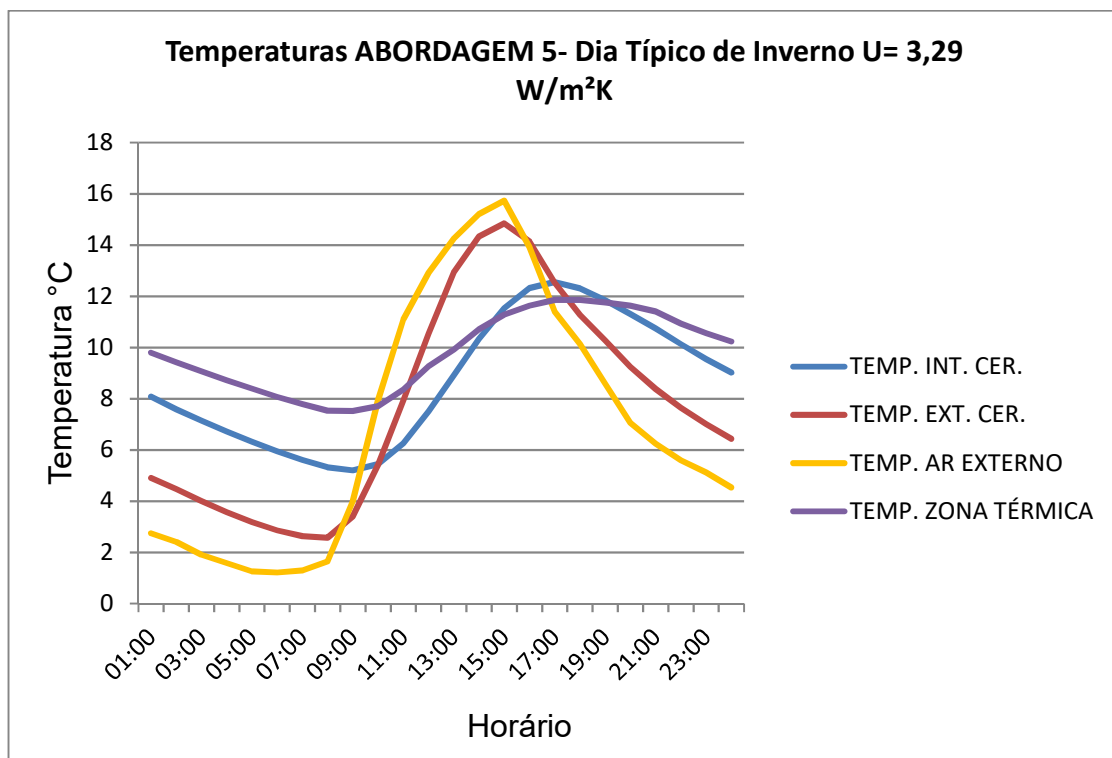
E.2- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 5 $U=0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



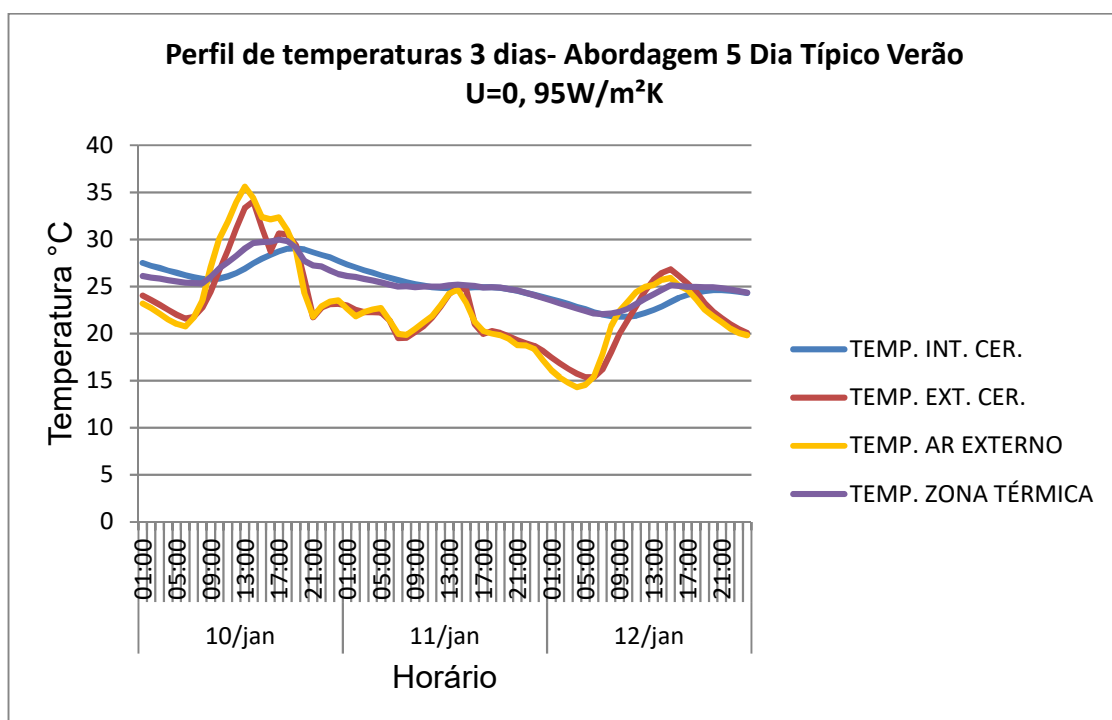
E.3- Temperaturas dia típico de verão abordagem 5 $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



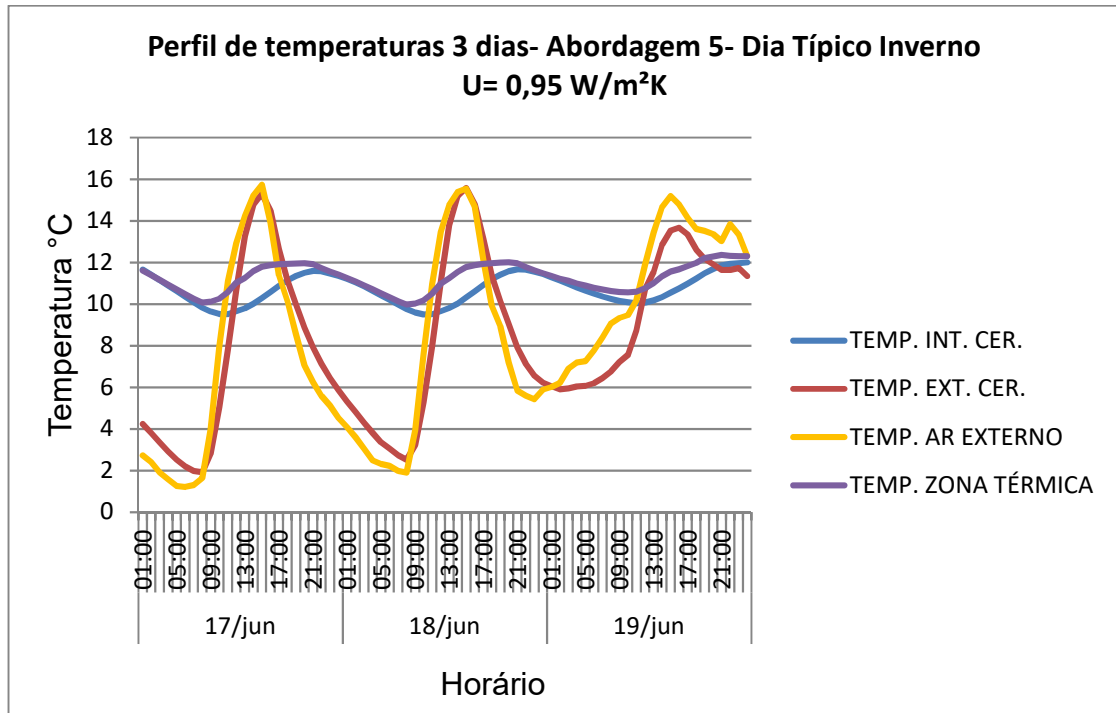
E.4- Temperaturas dia típico de inverno abordagem 5 $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



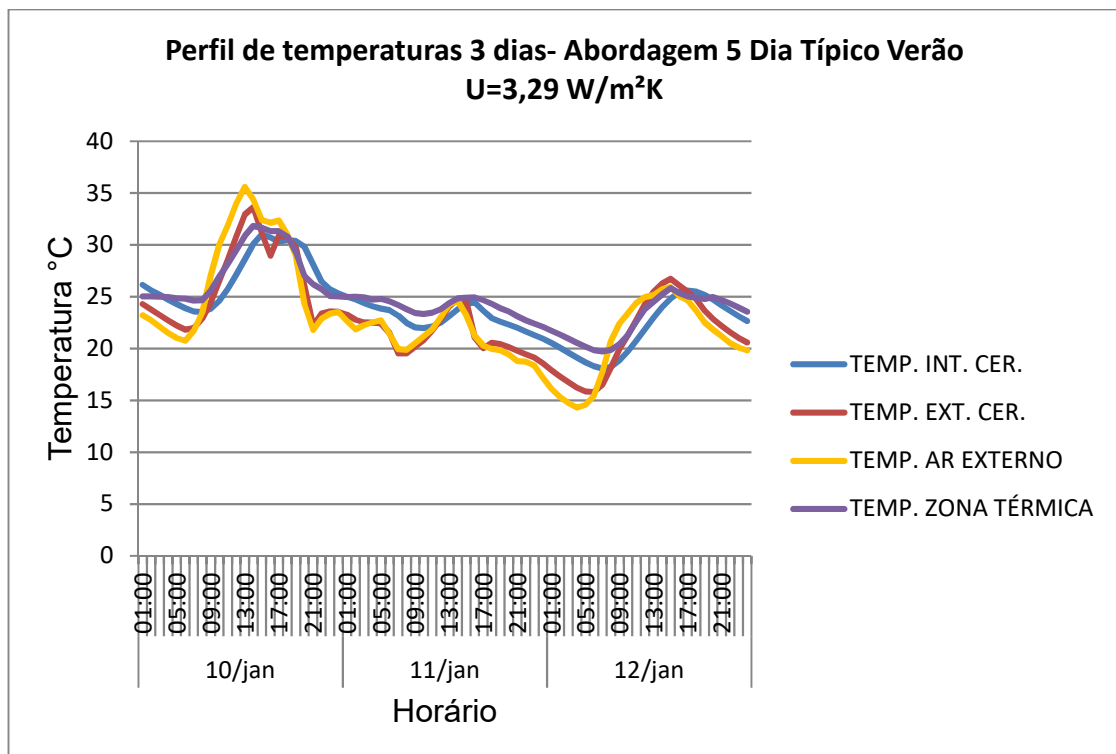
E.5- Perfil de temperatura em 3 dias verão $U=0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



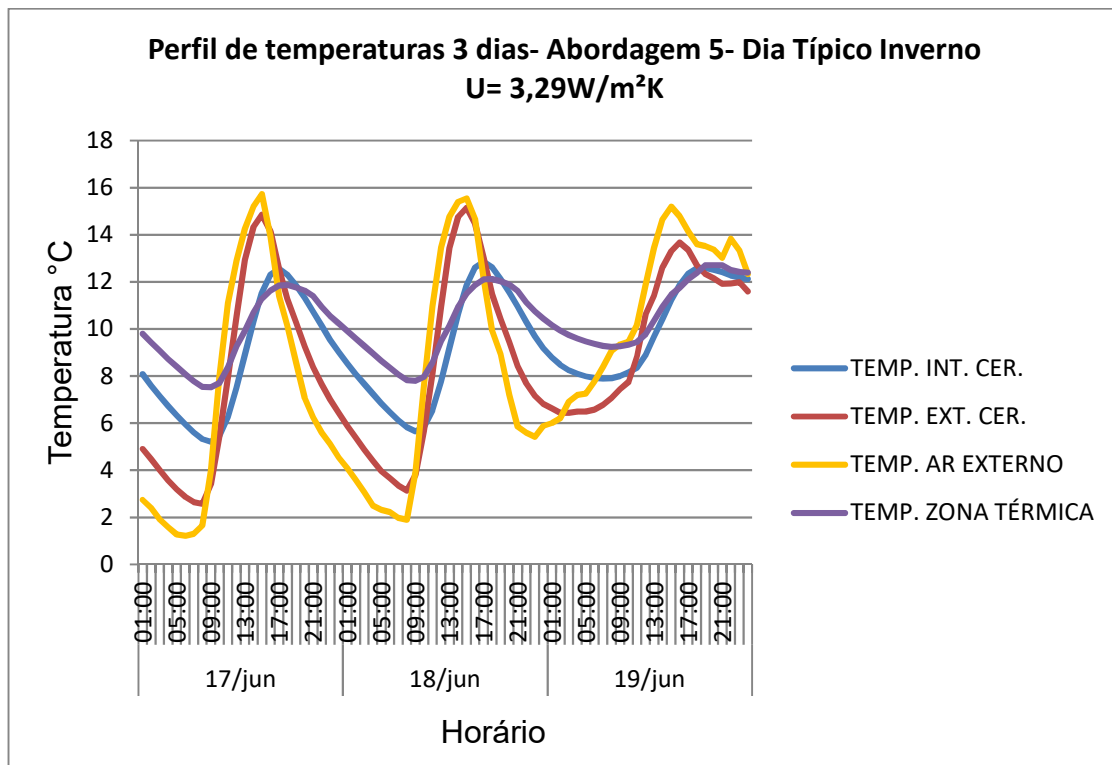
E.6- Perfil de temperatura em 3 dias inverno $U=0,95 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



E.7- Perfil de temperatura em 3 dias verão $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



E.8- Perfil de temperatura em 3 dias inverno $U=3,29 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$



Trabalhos Publicados

2016

- FREITAS, J. M. R. ; CUNHA, Eduardo . **Simulação Computacional de Pontes Térmicas: Probabilidade da Formação de Fungos Filamentosos**. In: XVIII Encontro de Pós-graduação da Universidade Federal de Pelotas, 2016, Pelotas. ENPOS 2016, 2016.
- FREITAS, J. M. R. ; LEITZKE, R. K. ; GIOIELLI, B. E. ; CUNHA, Eduardo . **Análise do Impacto de Pontes Térmicas no Consumo de Energia em Edificações Residenciais nas Zonas Bioclimáticas 1,2 e 3**. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2016, São Paulo. Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção, 2016. v. 2. p. 0931-0946.
- FREITAS, J. M. R. ; CUNHA, Eduardo ; GIOIELLI, B. E. ; LEITZKE, R. K. ; BENINCA, L. **Thermal Bridges Impact on Energy Consumption in Residential Buildings Considering the Brazilian Bioclimatic Zoning**. Journal of Civil Engineering and Architecture (Print), v. 10, p. 1114-1130, 2016.
- FREITAS, J. M. R. ; CUNHA, Eduardo ; LEITZKE, R. K. ; GIOIELLI, B. E. . **Análise da influência das pontes térmicas na simulação de eficiência energética nas paredes de edificações residenciais**. Revista de Arquitetura IMED , v. 5, p. 24-41, 2016.

2017

- FREITAS, J. M. R. ; CUNHA, Eduardo ; SILVA, A. C. ; LEITZKE, R. K. . **Pontes Térmicas em Estruturas De Concreto Armado: Análise das Condições Para Formação de Fungos Filamentosos para Zona Bioclimática Brasileira 2**. In: XIV ENCAC & X ELACAC, 2017, Balneário Camboriu. 2017.
- FREITAS, J. M. R. ; CUNHA, Eduardo . **Estudo Do Impacto De Pontes Térmicas No Conforto Térmico de Edificação Residencial na Zona Bioclimática 2 Segundo Três Diferentes Abordagens**. In: XIX Encontro de Pós Graduação da Universidade Federal de Pelotas, 2017, Pelotas. ENPOS, 2017.

Artigos aceitas para publicação

2018

- **FREITAS, J. M. R.; CUNHA, Eduardo.** Thermal Bridges Modeling in South Brazil Climate: Three Different Approaches. **Energy and Buildings. 2018.**