

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

FELIPE GABRIEL BERNARDI

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR MULTIDIMENSIONAL
EM SOLO E FUNDAÇÃO SOB EDIFICAÇÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2017

FELIPE GABRIEL BERNARDI

**ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR MULTIDIMENSIONAL
EM SOLO E FUNDAÇÃO SOB EDIFICAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos

PONTA GROSSA

2017



TERMO DE APROVAÇÃO

ANÁLISE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR MULTIDIMENSIONAL EM SOLO E FUNDAÇÃO SOB EDIFICAÇÕES

por

FELIPE GABRIEL BERNARDI

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 17 de fevereiro de 2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos
Orientador

Prof. Me. Gilberto Zammar
Membro Titular

Prof. Me. Tarik Linhares Tebchirani
Membro Titular

Prof. Dr. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Marcelo Vasconcelos de Carvalho
Coordenador do Curso

Dedico este trabalho à minha família,
namorada e amigos, pelos momentos de
ausência,

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço aos meus pais, Celso e Nice, pelo apoio e incentivo ofertados durante a trajetória de minha graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos, pela sabedoria que me guiou nesta trajetória.

Agradeço também aos professores que contribuíram nesta etapa, sendo de forma direta ou indireta.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Gostaria de deixar registrado também, o meu reconhecimento à minha família e minha namorada, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

Toda ação humana, quer se torne positiva
ou negativa, precisa depender de
motivação. (LAMA, Dalai)

RESUMO

BERNARDI, Felipe Gabriel. **Análise da Transferência de Calor Multidimensional em Solo e Fundação sob Edificações**. 2017. 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2017.

A transferência de calor ocorre devido a um diferencial de temperatura. Esse fenômeno tem direção e intensidade, sendo influenciada conforme as propriedades térmicas do material ou do diferencial de temperatura que o mesmo está sujeito. O cálculo do fluxo de calor pode variar devido as considerações tomadas, tais como os efeitos dimensionais e as condições impostas. Tratando-se de edificações, o fluxo térmico pode sofrer desvios em sua direção devido a mudanças de resistência térmica dos materiais e geometrias não regulares, formando as chamadas pontes térmicas. Esse trabalho tem como objetivo analisar os efeitos multidimensionais nas simulações de fluxo de calor na estrutura inferior de uma edificação. Nesta região, é estudada a interação entre ambientes interno e externo por intermédio do piso, baldrame e solo. Para essa análise, foram realizadas simulações em regime permanente através do software ANSYS Mechanical APDL Solver, variando os efeitos em unidimensional, bidimensional e tridimensional. Além disso, foram impostas nas simulações duas condições climáticas, sendo elas o verão, com temperaturas mais elevadas, e o inverno, com temperaturas mais amenas. Os resultados de tais simulações são ilustrados através de perfis de temperatura e de fluxo de calor das condições estudadas. Dessa maneira, é possível comparar os efeitos multidimensionais na transferência de calor em uma edificação e avaliar a atuação das pontes térmicas.

Palavras-chave: Pontes Térmicas. Simulações. Efeitos multidimensionais.

ABSTRACT

BERNARDI, Felipe Gabriel. **Analysis of Multidimensional Heat Transfer in Soil and Foundation under Buildings**. 2017. 54 p. Course Conclusion Paper of Bachelor's degree in Mechanical Engineering – Federal Technology University of Parana. Ponta Grossa, 2017.

The heat transfer occurs due to temperature differential. This phenomenon has direction and intensity, being influenced according to the thermal properties of the material or the temperature differential that it is subjected. The heat flux calculation can vary due to the considerations that are taken, for instance the multidimensional effect and the conditions imposed. In the case of buildings, the heat flux may suffer deviations in its direction due to changes in the thermal resistance of the materials and irregular geometries. These variations generate the called thermal bridges. This work has as objective to analyse the multidimensional effects in the simulations of heat flux in the lower structure of a building. In this region, the interaction between internal and external environments is studied through the floor, foundation and soil. For this analysis, simulations in steady flow had were performed through the software ANSYS Mechanical APDL Solver varying in one-dimensional, two-dimensional and three-dimensional effects. In addition, two weather conditions were imposed in the simulations: summer, with higher temperatures, and winter, with lower temperatures. The results of these simulations are illustrated by temperature and heat flux profiles in the studied conditions. Thus, it is possible to compare the multidimensional effects in the heat transfer of the lower structure of a building and evaluate the influence of thermal bridges.

Palavras-chaves: Thermal Bridges. Simulations. Multidimensional Effects.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transferência de calor unidimensional por condução	16
Figura 2 - Transferência de calor unidimensional por convecção	18
Figura 3 - Exemplificação de pontes térmicas.....	19
Figura 4 - Modelo para simulação unidimensional	25
Figura 5 - Modelo para simulação bidimensional	26
Figura 6 - Modelo para simulação tridimensional	27
Figura 7 - Volume de controle para modelo unidimensional	29
Figura 8 - Volume de controle para modelo bidimensional	30
Figura 9 - Volume de controle para primeiro modelo tridimensional	31
Figura 10 - Malhas para modelo unidimensional.....	33
Figura 11 - Malhas para modelo bidimensional.....	34
Figura 12 - Malhas para modelo tridimensional.....	35
Figura 13 - Perfis de temperatura para modelo unidimensional conforme relevância de malha.....	37
Figura 14 - Perfis de temperatura em análise bidimensional conforme relevância de malha, condição de verão	40
Figura 15 - Perfil de temperatura na região do baldrame, condição de verão e relevância de malha 100	41
Figura 16 - Perfis de temperatura em análise bidimensional conforme relevância de malha, condição de inverno.....	42
Figura 17 - Perfil de temperatura na região do baldrame, condição de inverno e relevância de malha 100	43
Figura 18 - Perfis de temperatura em análise tridimensional conforme relevância de malha, condição de verão	45
Figura 19 - Perfil de temperatura na região do baldrame, análise tridimensional na condição de verão e relevância de malha 100	46
Figura 20 - Perfis de temperatura em análise tridimensional conforme relevância de malha, condição de inverno.....	47
Figura 21 - Perfil de temperatura na região do baldrame, análise tridimensional na condição de inverno e relevância de malha 100	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizados.....	28
Tabela 2 - Condições de contorno para simulações	28
Tabela 3 - Fluxo de calor em análise unidimensional.....	38
Tabela 4 - Valores de fluxo de calor para modelo bidimensional	43
Tabela 5 - Fluxo de calor em análise tridimensional	48
Tabela 6 - Fluxo de calor em análise tridimensional para piso com 10 metros de comprimento.....	49
Tabela 7 - Fluxo de calor nas simulações multidimensionais.....	50

LISTA DE SÍMBOLOS

q	Fluxo de calor
k	Condutibilidade térmica
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
T	Temperatura
E	Energia térmica
R	Resistência térmica
L	Distância entre dois pontos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES	15
2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	16
2.2.1 Condução	16
2.2.2 Convecção	17
2.3 PONTES TÉRMICAS	19
2.3.1 Abordagem multidimensional	20
2.4 ANSYS	21
2.4.1 Método dos elementos finitos	21
2.4.2 ANSYS Mechanical APDL Solver	22
3 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO	24
3.1 CONSIDERAÇÕES DE EDIFICAÇÃO	24
3.1.1 Modelo unidimensional	24
3.1.2 Modelo bidimensional	25
3.1.3 Modelos tridimensionais	26
3.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	27
3.2.1 Condições de contorno	27
3.2.2 Volume de controle para modelos unidimensionais	28
3.2.3 Volume de controle para modelo bidimensional	29
3.2.4 Volumes de controle para modelos tridimensionais	30
3.3 DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 ANÁLISE UNIDIMENSIONAL	36
4.1.1 Verificação do modelo unidimensional	38
4.2 ANÁLISE BIDIMENSIONAL	39
4.2.1 Verificação do modelo bidimensional	44
4.3 ANÁLISE TRIDIMENSIONAL	44
4.3.1 Verificação do modelo tridimensional	49
4.4 COMPARAÇÃO MULTIDIMENSIONAL	49
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A elevação do consumo energético surgiu visando suprir as necessidades da indústria, e conseqüentemente do estilo de vida adotado pela sociedade moderna. Teve início com a revolução industrial no século XX quando passaram a ser adotadas medidas de tecnologia para elevar a quantidade e qualidade da produção. Aliado a isso, houve também desenvolvimento tecnológico no que diz respeito ao bem-estar humano. Neste quesito pode-se citar as adequações em infraestruturas voltadas a moradias e ambientes de trabalho.

Dentre estas melhorias, salienta-se o controle térmico de ambientes. O qual consiste em manter um determinado local na condição térmica desejada, equilibrando o ambiente com as perdas ou ganhos de energia, sobretudo em edificações buscando o conforto térmico.

Essa necessidade surge do diferencial de temperatura e de condições climáticas entre os ambientes interno e externo. Quanto maiores as diferenças destas condições entre os ambientes, maior será a dificuldade para manter a temperatura e demais condições desejadas no ambiente determinado. O que conseqüentemente gerará aumento no consumo energético. Tendo em vista o diferencial de temperatura, pode-se dizer que o consumo de energia está diretamente relacionado à transferência de calor entre ambientes em uma edificação.

A transferência de calor em edificações é variável ao longo de sua estrutura. Tal variação ocorre devido à composição da estrutura, visto que possui componentes feitos de materiais e formas distintas. Essas diferenças resultam em um efeito chamado pontes térmicas, que consiste em modificações da direção do fluxo de calor e perfil de temperatura ao longo da estrutura.

1.1 JUSTIFICATIVA

Para obtenção de maior eficiência energética é necessária maior compreensão dos efeitos da transferência de calor em uma edificação. Diversos software de simulação termo energéticas foram desenvolvidos com o objetivo de facilitar análises térmicas estruturais. Entretanto, há programas que simplificam os

cálculos de carga térmica em estruturas, tal como a utilização de modelos unidimensionais para quantificar o fluxo de calor. Essas simplificações podem gerar discrepâncias nos resultados finais, principalmente na carga térmica no piso das edificações.

Nesse contexto, um estudo mais aprofundado sobre os efeitos multidimensionais na transferência de calor na estrutura inferior de edificações pode ser útil para avaliar a necessidade de se contabilizar tais efeitos nos valores finais do fluxo de calor.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho pretende verificar os efeitos da transferência de calor na estrutura inferior de edificações, utilizando o software ANSYS Mechanical APDL para realização de simulações em modelos multidimensionais. Essa análise é voltada a estrutura inferior de edificações, onde a transferência de calor entre ambiente interno e externo ocorre por intermédio do piso, solo e baldrame.

1.2.2 Objetivos específicos

Constituem os objetivos específicos desse trabalho:

- Comparação multidimensional de fluxo de calor entre modelos unidimensional, bidimensional e tridimensional. Para isso, são realizadas simulações em modelos similares a partir da diferenciação na abordagem dimensional. Dessa maneira, são quantificados os fluxos de calor em cada abordagem e efetuadas comparações dos resultados entre si.
- Avaliar os efeitos das pontes térmicas. Este trabalho também pretende observar os efeitos das pontes térmicas e conseqüentemente as variações no fluxo de calor e perfis de temperatura. Buscando assim, avaliar a relevância desses efeitos na quantificação de fluxo de calor nas análises térmicas estruturais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentadas revisões bibliográficas a respeito da eficiência energética em edificações, formas de transferência de calor, assim como o que são pontes térmicas e a importância de entendê-las. Além disso, será explicado o funcionamento do método dos elementos e volumes finitos, cujo qual será utilizado nas simulações desse trabalho.

2.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

O estudo de edificações energeticamente eficientes surgiu da necessidade de diminuição do consumo elétrico na sociedade. Considerando o Brasil, cerca de 45% da energia elétrica consumida é voltada às edificações residenciais, comerciais e públicas (SANTOS; MENDES, 2012).

Sistemas de resfriamento e aquecimento do ambiente são responsáveis por uma importante parcela no consumo energético em residências. Estima-se que, nos países desenvolvidos, o consumo de energia para aquecimento, ventilação e condicionamento de ar chegam a aproximadamente metade do consumo de energia nas edificações (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008). Sendo assim, pode-se dizer que a obtenção do conforto térmico está diretamente relacionada com a eficiência energética de uma edificação.

Quanto maior a taxa de transferência de calor em uma edificação, maior será a dificuldade do controle de temperatura do local. Essa dificuldade converge em um gasto maior de energia elétrica. Sendo assim, o estudo das perdas e ganhos caloríficos em uma edificação torna-se justificável.

Visando melhoria no conforto térmico e na eficiência energética, mudanças foram feitas nas edificações. Essas mudanças constam como, por exemplo, utilização de isolamento e melhor instalação de elementos. Deru (2003) cita em sua pesquisa que, em uma casa bem construída, devido a eficiência melhorada principalmente na parte superior de uma construção, cerca de 30 a 50% do calor perdido passa a ser direcionado para o solo. Isso ilustra a importância na análise da transferência de calor entre o solo em uma edificação.

2.2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Esse trabalho considera a atuação de duas formas primárias de transferência de calor: por condução e por convecção.

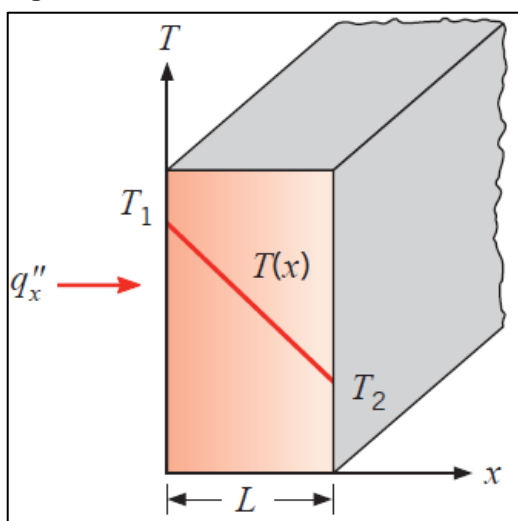
2.2.1 Condução

Condução está relacionado com atividades atômicas e moleculares. Entende-se como condução a transferência de energia no nível atômico e molecular, onde devido à interação entre as partículas, aquelas mais energéticas transferem parte de sua energia para as menos energéticas.

O nível de energia depende da temperatura da molécula. Moléculas com temperatura mais elevada possuem maior agitação entre elas. Durante esse movimento, as moléculas colidem e interagem entre si, onde há a transferência de energia no sentido da molécula mais energética para a menos energética (Bergman et al. 2011).

O perfil de temperatura para um fluxo de calor unidimensional em regime permanente pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Transferência de calor unidimensional por condução



Fonte: Bergman (Bergman et al. 2011)

Nota-se nessa figura a variação da temperatura em função do comprimento L da parede, e que o fluxo de calor q_x'' encontra-se no sentido da maior temperatura para

a menor. A equação de transferência de calor por condução é dada pela equação de Fourier, expressa pela Equação 1:

$$q_x'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [1]$$

Onde k é a condutibilidade térmica do material e $\frac{dT}{dx}$ é entendida como a variação da temperatura ao longo do eixo X.

2.2.2 Convecção

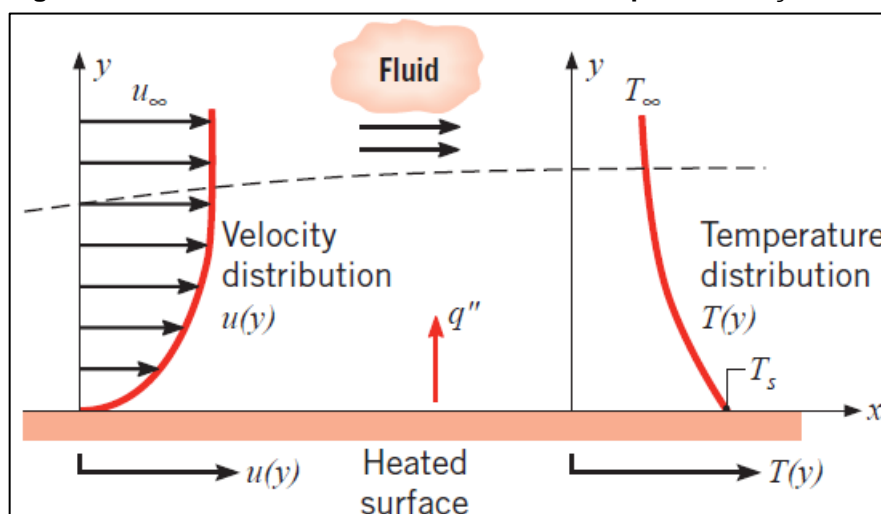
Convecção consiste na transferência de calor devido ao movimento de um fluido. Essa transferência de energia ocorre no contato do fluido e uma superfície, quando esses apresentam diferença de temperatura entre si (Bergman et al. 2011).

A interação do fluido em movimento com a superfície cria uma região denominada Camada Limite. Nessa região há uma variação da velocidade do fluido de zero até a velocidade do fluido em movimento livre. A velocidade nula encontra-se no contato do fluido com a superfície ($y=0$) onde, ao se afastar da superfície, ganha intensidade até alcançar a velocidade do fluido em escoamento.

Quando há diferença de temperatura entre fluido e superfície, uma região denominada Camada Limite Térmica é observada. A temperatura de contato do fluido com a superfície é a mesma e, ao se afastar da superfície, ela aumenta ou diminui, dependendo do sentido da transferência de calor, até o momento em que esse valor se equaliza à temperatura do fluido em escoamento livre.

A convecção unidimensional é exemplificada na Figura 2.

Figura 2 - Transferência de calor unidimensional por convecção



Fonte: Bergman (Bergman et al. 2011)

Na Figura 2, u_∞ e T_∞ são a velocidade e a temperatura do fluido em movimento, respectivamente. A camada limite está representada na região onde a distribuição de velocidade e temperatura é variável, tendo início na região de contato com a superfície até o momento em que os valores se igualam com os do fluido.

O fluxo térmico por convecção é dado pelo produto do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) pela diferença entre as temperaturas da superfície (T_s) e do fluido em escoamento (T_∞). Esta relação é dada pela equação de Newton do resfriamento:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad [2]$$

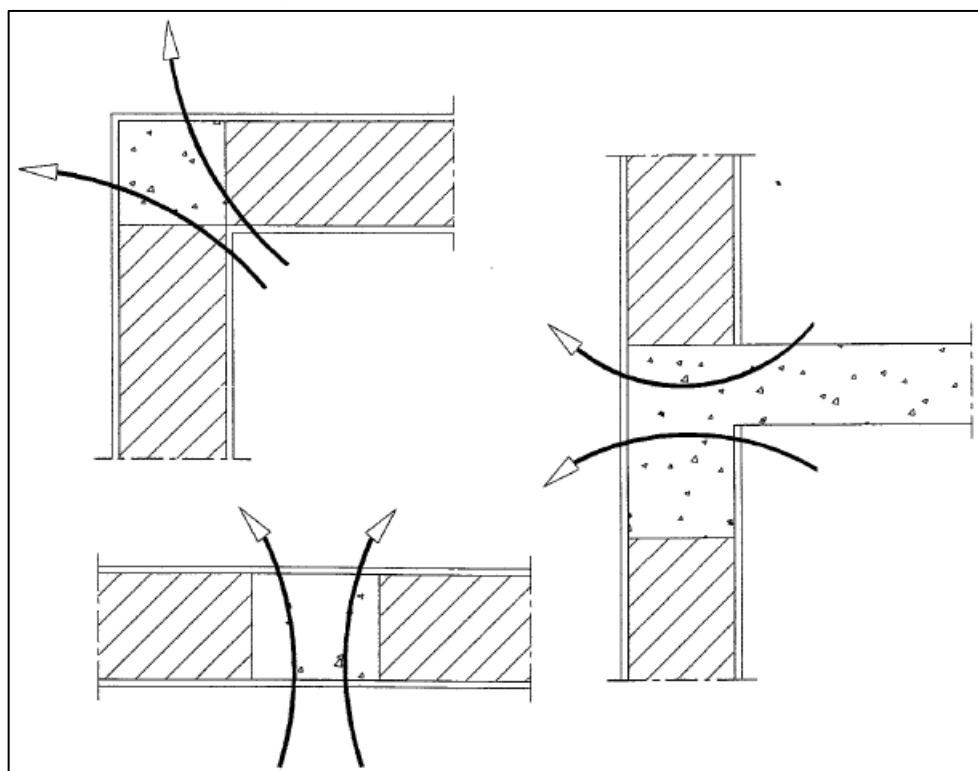
A convecção pode ser classificada como forçada ou natural, dependendo da natureza do escoamento do fluido. A convecção forçada é aquela em que o escoamento é causado por excitação externa, como por exemplo ventiladores, bombas ou até mesmo ventos atmosféricos. No caso da convecção natural, o movimento do fluido é causado por forças de empuxo resultantes da densidade do fluido. Ao receber ou ceder calor, a densidade do fluido varia, sendo assim, a parte com maior densidade tende a se locomover para baixo, e aquela com menor densidade fará o movimento contrário (Bergman et al. 2011).

2.3 PONTES TÉRMICAS

Regiões onde encontra-se significativa mudança na resistência térmica em um edifício são denominadas pontes térmicas. Tais alterações são mais notáveis quando se há variação de material, causando mudança abrupta da condutibilidade térmica do local, ou onde há modificação na geometria da estrutura (Corvacho 1996).

Algumas localizações das pontes térmicas em edificações são ilustradas na Figura 3.

Figura 3 - Exemplificação de pontes térmicas



Fonte: Corvacho (Corvacho 1996)

Tendo em vista tais variações da resistência térmica, as pontes térmicas tratam-se de um fluxo de calor multidimensional. Esse fenômeno está presente em regiões tais como juntas do teto, paredes, piso e solo. Dessa maneira, mesmo com a utilização de elementos isolantes, as pontes térmicas continuarão presentes. (Fukuyo 2003; "Tb.pdf," n.d.; Ollivier and Roux 2001)

O fluxo total de calor passa a sofrer influência mais significativa das pontes térmicas com o isolamento térmico dos elementos de uma construção. A utilização de elementos com maior resistência térmica ocasiona a diminuição do fluxo de calor unidimensional nessas regiões. Em contrapartida, os locais caracterizados pelas

pontes térmicas passam a ter maior influência no fluxo de calor total da estrutura. (“Tb.pdf,” n.d.; Ollivier and Roux 2001)

Pode-se classificar as pontes térmicas em dois tipos: as bidimensionais e as tridimensionais. As pontes térmicas bidimensionais, também conhecidas como lineares, estão localizadas em pontos onde a variação de material ocorre em um plano dimensional e se estendem uniformemente na terceira dimensão. Em contrapartida, as pontes térmicas tridimensionais estão presentes em locais onde um elemento está envolto por outro com resistência térmica diferente, tal como uma janela instalada em uma parede. Além disso, esse efeito tridimensional também pode ser encontrado em quinas, como por encontro de duas paredes e o solo. (“Tb.pdf,” n.d.)

Dessa maneira, é importante que haja um entendimento das variações multidimensionais e seus efeitos na transferência de calor em uma edificação para poder quantificar corretamente a carga térmica que passa pelo seu envoltório.

2.3.1 Abordagem multidimensional

A análise térmica de edificações é, na maioria das vezes, caracterizada como unidimensional. Essa análise ignora os efeitos das pontes térmicas na estrutura da edificação. Desta maneira, para obtenção de resultados mais precisos e próximos da realidade é necessária uma análise bidimensional ou tridimensional em elementos como quinas, juntas e outros (Garay, Uriarte, and Apraiz 2014).

Testes e simulações para analisar a influência que as pontes térmicas apresentam na eficiência energética de uma edificação foram realizados por Theodosiou e Papadopoulos (Theodosiou and Papadopoulos 2008). Através de análises e simulações com considerações de regime permanente e em duas dimensões, com base em construções típicas gregas, chegaram à conclusão de que as perdas energéticas considerando a existência de pontes térmicas foram até 35% maiores se comparado com os modelos unidimensionais. Tal diferença é elevada devido à suscetibilidade que as construções gregas têm de apresentarem pontes térmicas. Sendo assim, a não consideração desses elementos levam a estimativas de trocas térmicas muito abaixo dos reais.

As considerações adotadas e métodos de cálculos na análise das pontes térmicas é de suma importância para a confiabilidade da resposta. Programas de

simulações que englobam o efeito das pontes térmicas em simulações geralmente adotam diversas simplificações, o que leva a erros no cálculo de cargas térmicas na solução (Martin et al. 2012).

A maior parte das pesquisas nessa área são realizados a partir de análises bidimensionais. Em um estudo realizado na União Europeia, com projetos mais renovados e o uso de estruturas otimizadas, a influência energética das pontes térmicas foi reduzida de 30% para 15%. Nesse estudo também foi notada a influência que a análise bidimensional tem sobre a unidimensional. Estima-se que as diferenças entre essas abordagens se encontram entre 10% e 20% (Garay, Uriarte, and Apraiz 2014).

Outro estudo compara a consideração de regime permanente e transiente na transferência de calor. As análises em regime transiente, feitas em estruturas em formato “T” ou “L”, apresentaram diferença de 5% se comparadas com o regime permanente (Tadeu et al. 2011), sendo considerada uma variação não significativa. As diferenças de transferência de calor entre regime transiente e permanente podem ser negligenciadas, assim como evidenciado por Martin (Martin et al. 2011).

2.4 ANSYS

ANSYS é uma plataforma que contém softwares utilizados para efetuar simulações na engenharia. Dentre os softwares utilizados por essa plataforma está o Mechanical APDL Solver, onde o APDL é uma sigla na língua inglesa para “linguagem paramétrica de design do ANSYS”. Esse software é utilizado em análises estruturais através do método dos elementos finitos e, dentro do mesmo, existe um módulo que permite realizar análises térmicas em estruturas.

2.4.1 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos, também conhecido por MEF, é um método numérico para resolver problemas físicos e matemáticos. Esse método é utilizado principalmente em problemas onde a geometria, condições e propriedades dos

materiais ou sistemas são de maior complexidade, uma vez que essa característica torna a solução analítica matemática imprecisa e de difícil análise. (Logan et al. 2007)

A lógica apresentada pelo MEF consiste em modelar o material estudado dividindo o mesmo em um sistema equivalente composto por partes menores. Essas pequenas parcelas da estrutura são denominadas de elementos finitos e são interconectadas, criando assim uma malha. (Logan et al. 2007)

Esse método difere da solução analítica, onde a análise do problema é realizada sobre o corpo ou localização como um todo. No caso do MEF, equações são formuladas para cada elemento da malha criada, para então esses resultados serem combinados, obtendo a solução para o elemento por completo. (Logan et al. 2007)

2.4.2 ANSYS Mechanical APDL Solver

Dentre as funções que o ANSYS Mechanical APDL Solver trás, está a análise térmica. Essa análise calcula as temperaturas nodais dos elementos finitos, para então utilizar essa temperatura para obter outras grandezas térmicas, tais como o gradiente de temperatura e os fluxos de calor. (Canonsburg 2013)

Esse software aborda os três modos primários de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A condução é calculada ao longo do elemento através da especificação da condutividade térmica e propriedades do material. No caso da convecção, é especificado uma superfície onde essa condição atua e o coeficiente convectivo e temperatura de fluido que esse local está sujeito (condições de contorno). Dessa maneira o software calcula a transferência de calor que a superfície especificada está sujeita. (Canonsburg 2013; Inc 2013)

A radiação (não considerada neste trabalho), por sua vez, pode ser resolvida por quatro métodos diferentes. Tem-se a análise pela radiação entre dois ou mais pontos ou a análise entre ponto e superfície. Outro recurso que pode ser utilizado, é o uso de matrizes para o cálculo da radiação entre duas ou mais superfícies. Além disso, é possível utilizar o Radiosity Solver, que consiste em um método para casos de transferência de calor por radiação em elementos bidimensionais e tridimensionais. (Canonsburg 2013; Inc 2013)

Deste modo, esse trabalho propõe a análise térmica multidimensional focada na parte inferior de uma edificação, considerando as interações entre solo, piso e baldrame (fundação), através do software ANSYS Mechanical APDL Solver.

3 PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

Os programas utilizados para a simulação foram o SolidWorks 2014 e o ANSYS Mechanical APDL Solver. As simulações consistem na análise multidimensional de transferência de calor em uma estrutura de edificação, contendo o baldrame e o piso de uma edificação, assim como o solo.

Para realizar a análise, realiza-se a modelagem do sistema para então predeterminar as condições de contorno em que o mesmo está sujeito. Primeiramente foram feitas as modelagens dos sistemas multidimensionais da edificação no software SolidWorks 2014. Em seguida, transferem-se esses modelos para o ANSYS Mechanical APDL, onde as condições de contorno são arbitradas e a malha para aplicação dos elementos e volumes finitos é definida, realizando-se assim a simulação do problema.

3.1 CONSIDERAÇÕES DE EDIFICAÇÃO

O foco desse trabalho é a análise de transferência de calor multidimensional na parte inferior de uma edificação. Uma edificação pode ser considerada por uma área comum cercada por paredes. Tais paredes são sustentadas por vigas conhecidas como baldrame, envoltas pelo solo. Dessa maneira, a interação entre piso, solo e baldrame será analisada em condições multidimensionais.

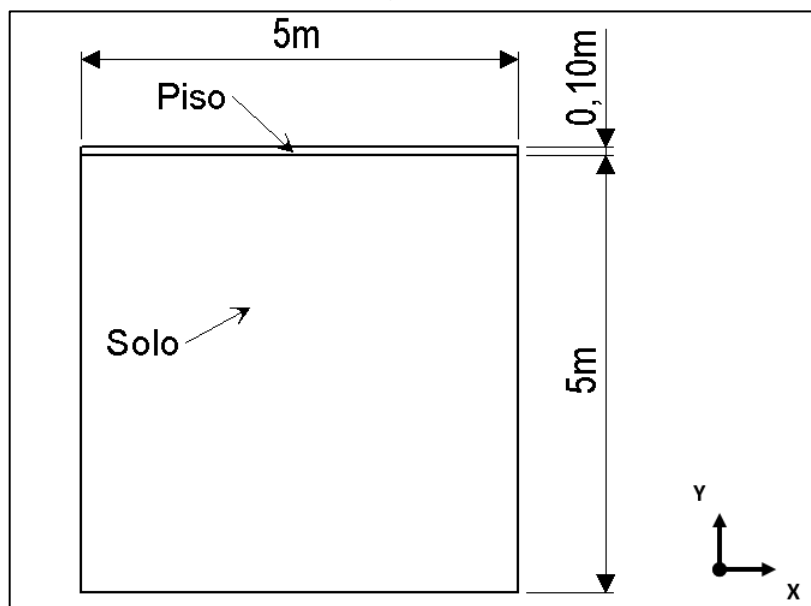
A transferência de calor do sistema foi analisada em três condições: unidimensional, bidimensional e tridimensional. Sendo assim, foram criados modelos no software SolidWorks 2014 direcionados para cada tipo de análise. Esses modelos estão descritos a seguir.

3.1.1 Modelo unidimensional

A transferência de calor unidimensional caracteriza o fluxo de calor em apenas uma direção. Analisando o interior de uma edificação, a transferência de calor unidimensional leva em consideração o fluxo de calor entre ambiente interno e os elementos inferiores da edificação, piso e solo, na direção Y.

Dessa maneira, considera-se uma sala com largura de 5 metros, piso com espessura de 0,1 metro, e limitando a profundidade do solo para 5 metros, como o representado pela Figura 4.

Figura 4 - Modelo para simulação unidimensional



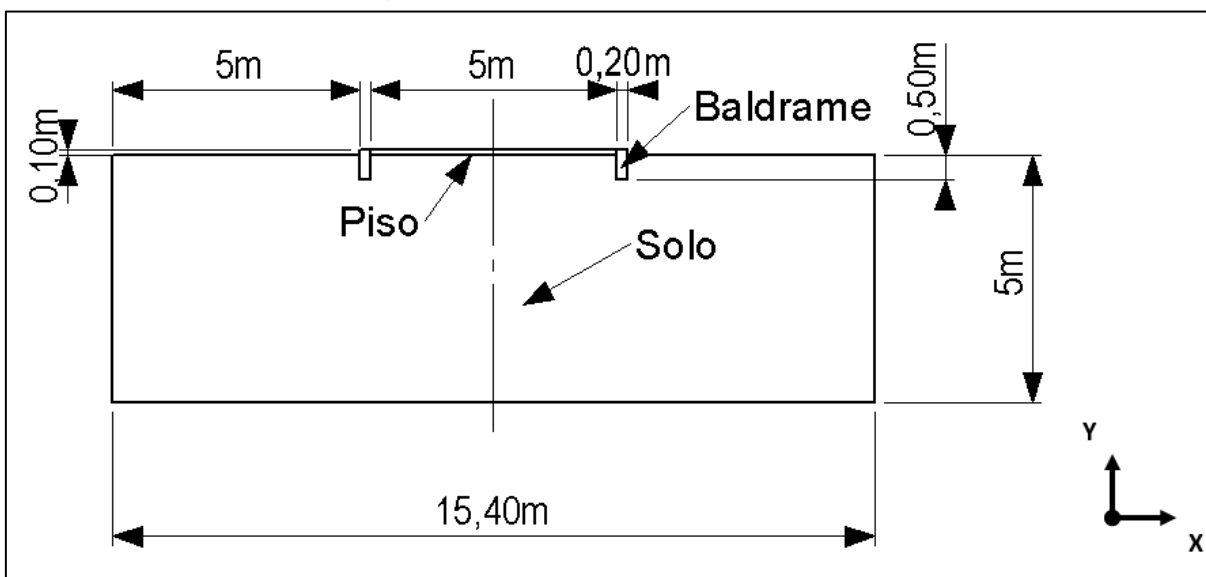
Fonte: Autoria própria

3.1.2 Modelo bidimensional

A transferência de calor bidimensional leva em consideração a transferência de calor entre duas direções. Para o caso estudado, o modelo criado refere-se à transferência de calor no plano XY e neste caso, considerou-se o sistema composto dos elementos: piso, solo e baldrame.

O modelo bidimensional apresenta, em comparação com o unidimensional, a atuação do baldrame em sua estrutura, assim como a influência do ambiente externo. As dimensões do solo passam a ser de 15,4 metros de largura e 5 metros de comprimento. O baldrame, por sua vez, tem largura de 0,2 metro, se estende até 0,5 metro da superfície do solo e possui espessura de 5 metros, como os demais componentes. Representa-se este modelo na Figura 5, onde as cotas estão em metros.

Figura 5 - Modelo para simulação bidimensional

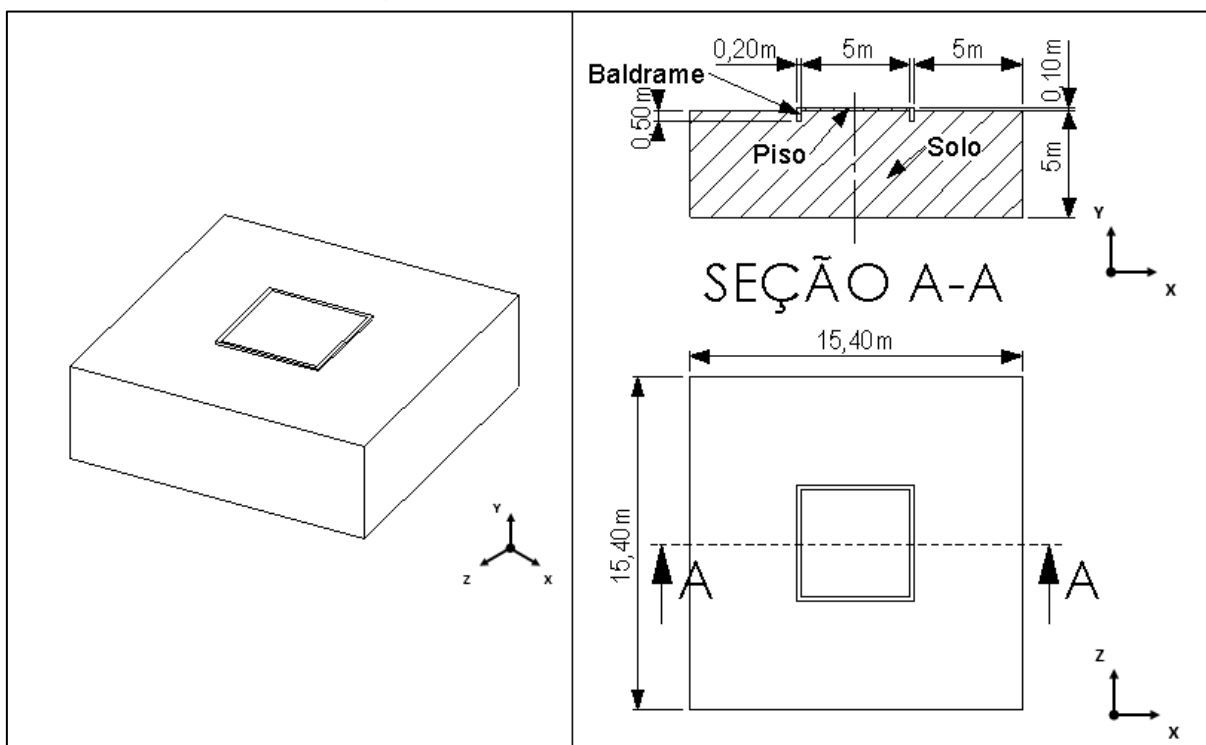


Fonte: Autoria própria

3.1.3 Modelos tridimensionais

A transferência de calor tridimensional é o fluxo de calor que envolve as três dimensões, X, Y e Z. Esse modelo apresenta os mesmos componentes do modelo anterior: piso, solo e baldrame. As dimensões do solo passam a ser de 15,4 metros para a largura e o comprimento e a sua profundidade se mantêm com 5 metros. Com isso, o piso com largura e comprimento de 5 metros está localizado ao centro do modelo e cercado pelo baldrame. A Figura 6 expressa esse modelo.

Figura 6 - Modelo para simulação tridimensional



Fonte: Autoria própria

3.2 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Dois cenários foram considerados nas simulações: o primeiro simulou condições do verão e o segundo do inverno, ambos em regime permanente. As condições de contorno para transferência de calor e os volumes de controle estudados estão descritos a seguir.

3.2.1 Condições de contorno

Esse trabalho aborda duas maneiras de transferência de calor: condução e convecção. A condução é dada pela transferência de calor pelos componentes e a interação entre os demais que estão em contato. Os ambientes interno e externo da edificação, por sua vez, são tratados como ambientes convectivos. Além disso, como condição inicial, a temperatura do sistema foi arbitrada como sendo 293K para ambas condições.

As propriedades dos materiais utilizados foram obtidas em estudo sobre o tema e na norma ABNT (Ribas 2014; ABNT 2003) e estão expressos na Tabela 1, onde o piso e baldrame são considerados como estruturas feitas de concreto.

Tabela 1 - Propriedades dos materiais utilizados

Material	Densidade [kg/m ³]	Condutividade Térmica [W/(m.K)]	Calor Específico [J/(kg.K)]
Concreto	2400	1,75	1000
Solo	2400	0,52	835

Fonte: Autoria própria

O ambiente interno para ambas as condições foi considerado com temperatura de 297K e coeficiente convectivo com valor de 3 W/m²K. Já para o ambiente externo, o coeficiente convectivo foi arbitrado como sendo 15 W/m²K para as duas condições. A temperatura do ambiente externo, por sua vez, foi considerada 308K e 283K para o verão e inverno, respectivamente. Essas condições estão expressas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de contorno para simulações

Condição	Ambiente Externo		Ambiente Interno	
	Temperatura [K]	Coeficiente Convectivo [W/(m ² K)]	Temperatura [K]	Coeficiente Convectivo [W/(m ² K)]
Verão	308	15	297	3
Inverno	283	15	297	3

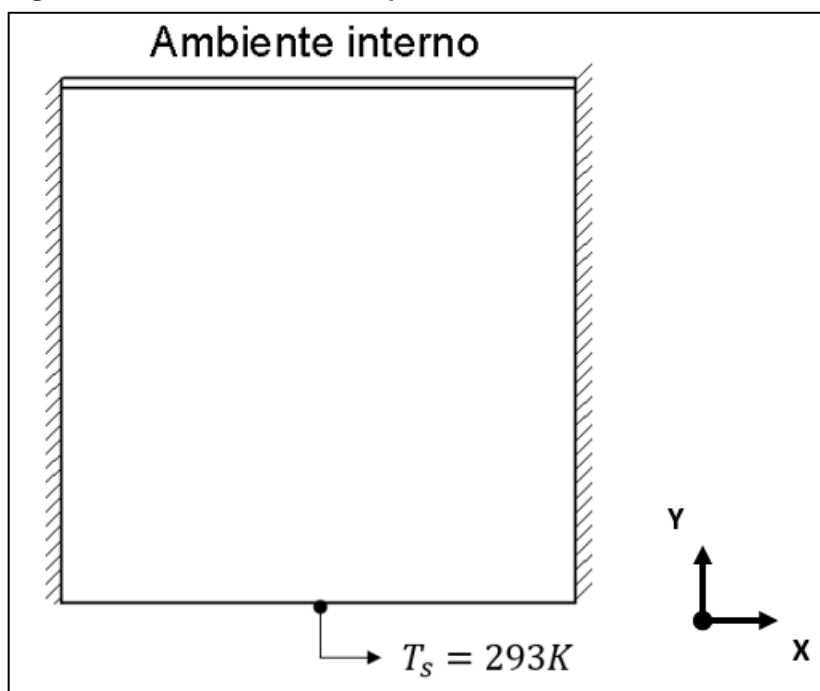
Fonte: Autoria Própria

Como condição inicial, a temperatura do sistema foi arbitrada como sendo 293K para ambas condições.

3.2.2 Volume de controle para modelos unidimensionais

Para a simulação da transferência de calor unidimensional o volume de controle definido foi limitado como ilustrado na Figura 7. Nesse modelo, as condições de convecção para o ambiente interno foram aplicadas na face superior do piso. Além disso, no caso unidimensional, na extremidade inferior do solo foi arbitrado temperatura de 293K para fins de simulação, e as regiões laterais desse modelo foram consideradas como superfícies adiabáticas.

Figura 7 - Volume de controle para modelo unidimensional

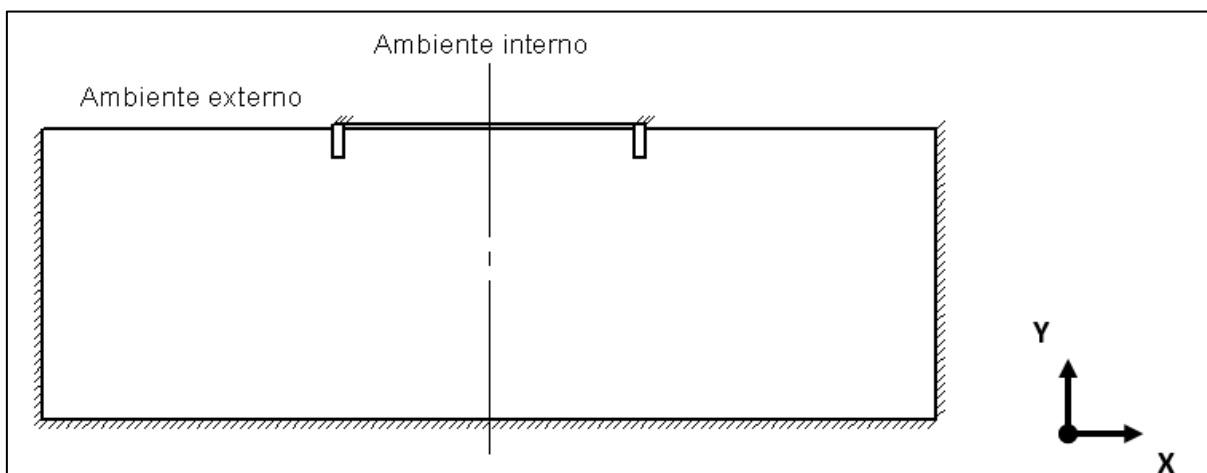


Fonte: Autoria própria

3.2.3 Volume de controle para modelo bidimensional

No caso da transferência de calor bidimensional, o volume de controle foi definido com os limites do modelo referente a essa análise. As condições de convecção foram aplicadas nas faces em contato com o ambiente externo e interno. Além disso, as extremidades laterais e inferior do solo, assim como a delimitação superior do baldrame, foram consideradas superfícies adiabáticas. As dimensões foram consideradas as mesmas.

A Figura 8 ilustra o volume de controle do modelo para esse tipo de análise.

Figura 8 - Volume de controle para modelo bidimensional

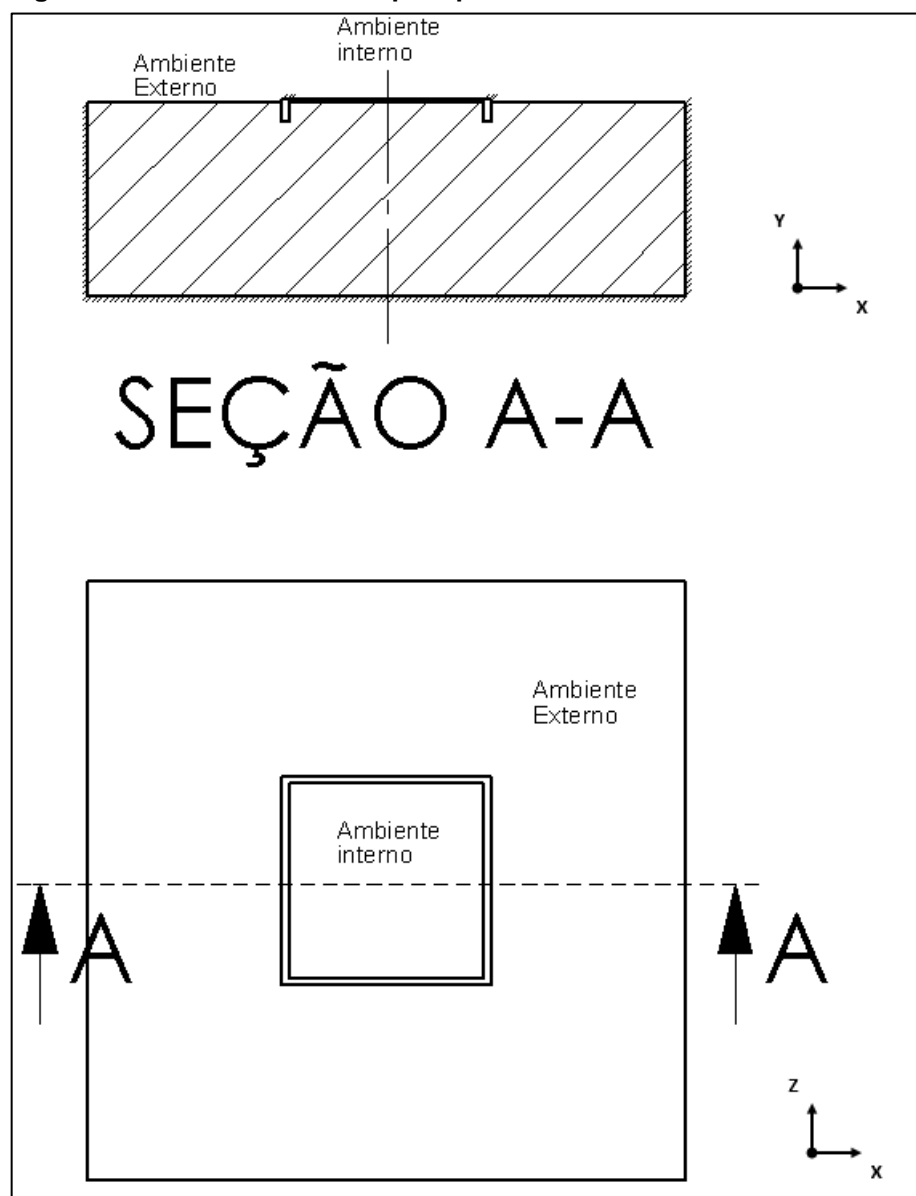
Fonte: Autoria própria

3.2.4 Volumes de controle para modelos tridimensionais

No caso do volume de controle do modelo tridimensional, tem-se como base o modelo antes apresentado, sem alteração nas dimensões do mesmo. Aplicaram-se as condições de convecção dos ambientes interno e externo, descritas anteriormente, nas faces em contato com os respectivos ambientes. Atribuiu-se às faces laterais e inferior do solo, assim como a face superior do baldrame, como superfícies adiabáticas.

Ilustra-se na Figura 9 o volume de controle do primeiro modelo tridimensional.

Figura 9 - Volume de controle para primeiro modelo tridimensional



Fonte: Autoria própria

A Figura X, por sua vez, ilustra o segundo modelo tridimensional.

3.3 DEFINIÇÃO DE ELEMENTOS FINITOS

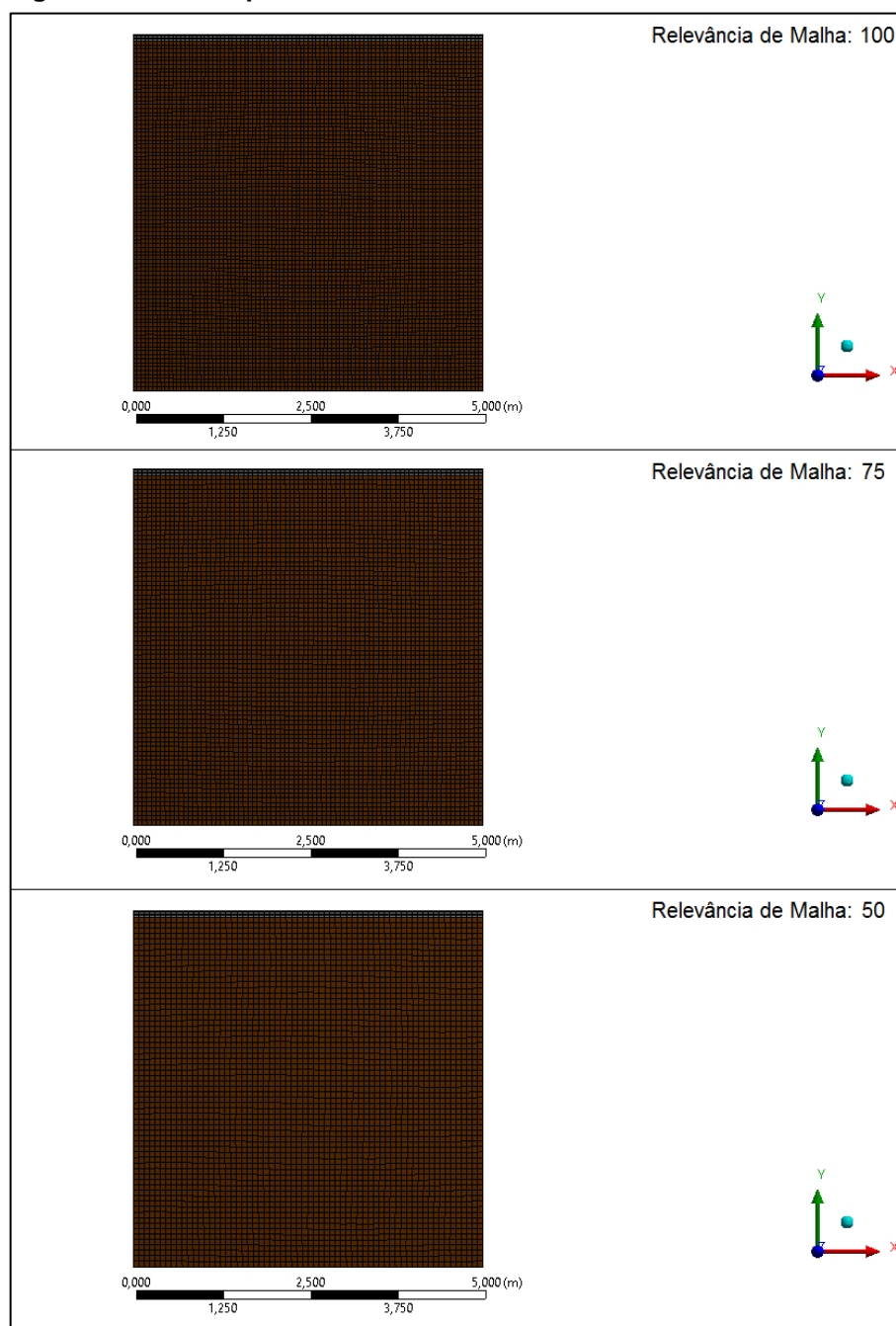
Para realizar as simulações utilizou-se o software ANSYS Mechanical APDL. Esse software utiliza o método dos elementos finitos para realizar os cálculos de transferência de calor nas estruturas.

A malha criada nos modelos multidimensionais obedece uma escala de relevância oferecida pelo software. Essa escala é graduada de 0 a 100, representando

de maneira crescente a relevância com que os elementos ou volumes finitos estarão distribuídos e subdivididos na malha. Dessa maneira, para fins de verificação, foram realizadas simulações com três relevâncias de malha diferentes, sendo elas 50, 75 e 100.

Nas regiões em que as condições de contorno de convecção foram aplicadas, e em áreas de contato entre elementos distintos da edificação, realizou-se o refinamento da malha. Esse refinamento é realizado para que haja maior sensibilidade nos cálculos nessa região, obtendo assim resultados mais precisos.

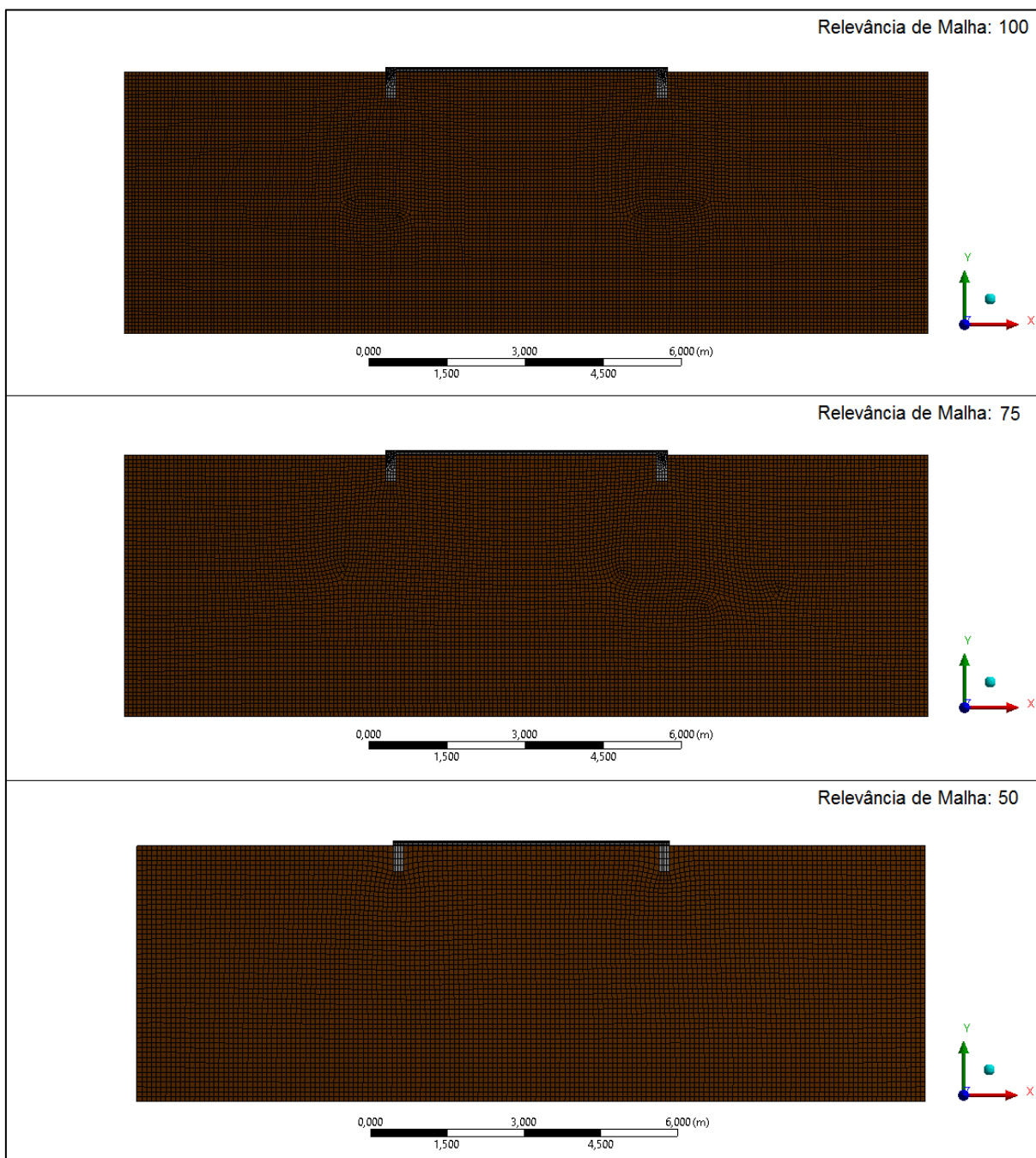
As malhas geradas para o modelo unidimensional são compostas por elementos finitos e estão representadas na Figura 10. Cada malha está indicada conforme sua relevância.

Figura 10 - Malhas para modelo unidimensional

Fonte: Autoria própria

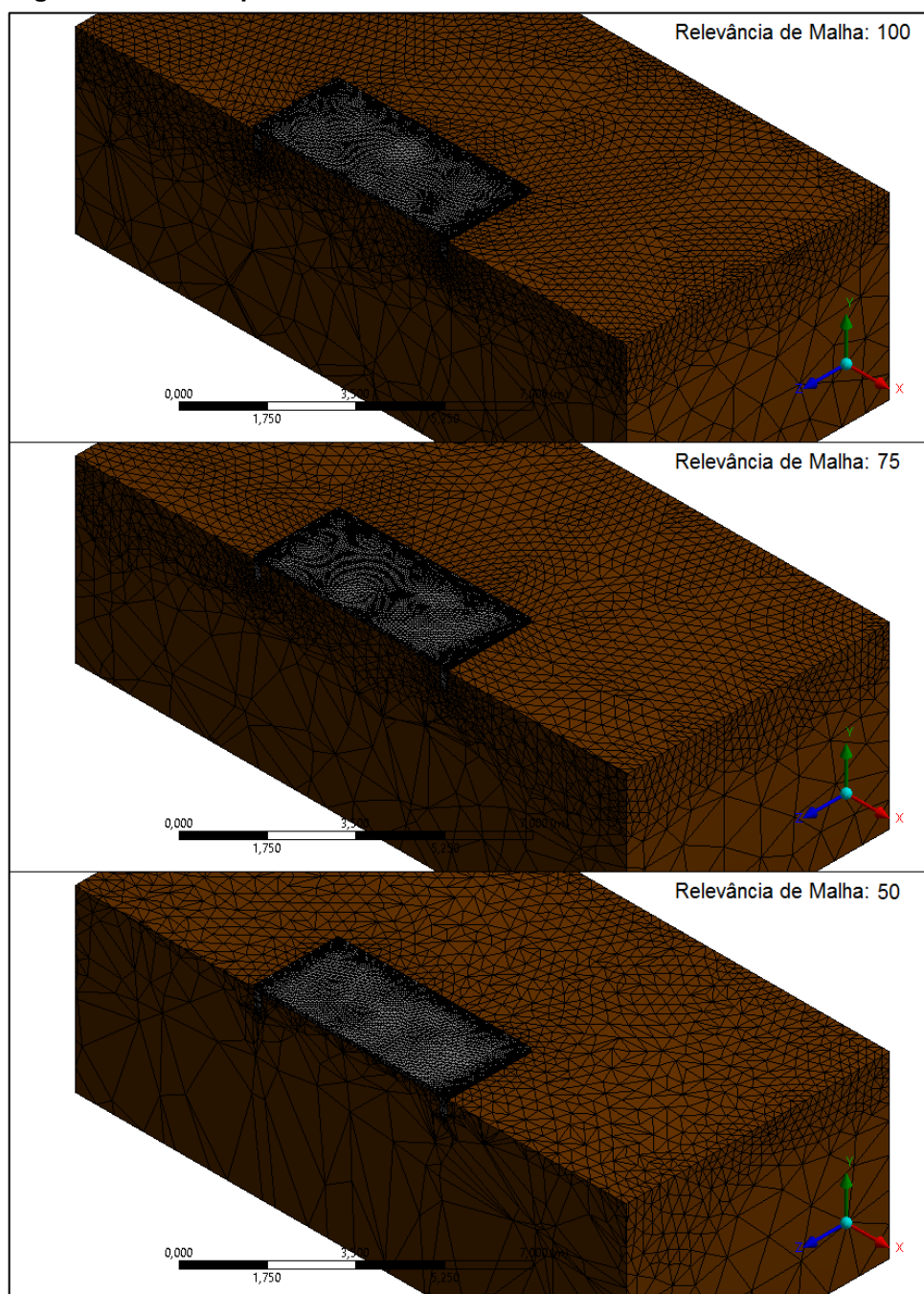
As malhas geradas para o modelo bidimensional, por sua vez, também são compostas por elementos finitos e estão representadas na Figura 11. Cada malha está indicada conforme sua relevância.

Figura 11 - Malhas para modelo bidimensional



Fonte: Autoria própria

No caso do modelo tridimensional, as malhas são compostas por volumes finitos, como ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Malhas para modelo tridimensional

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

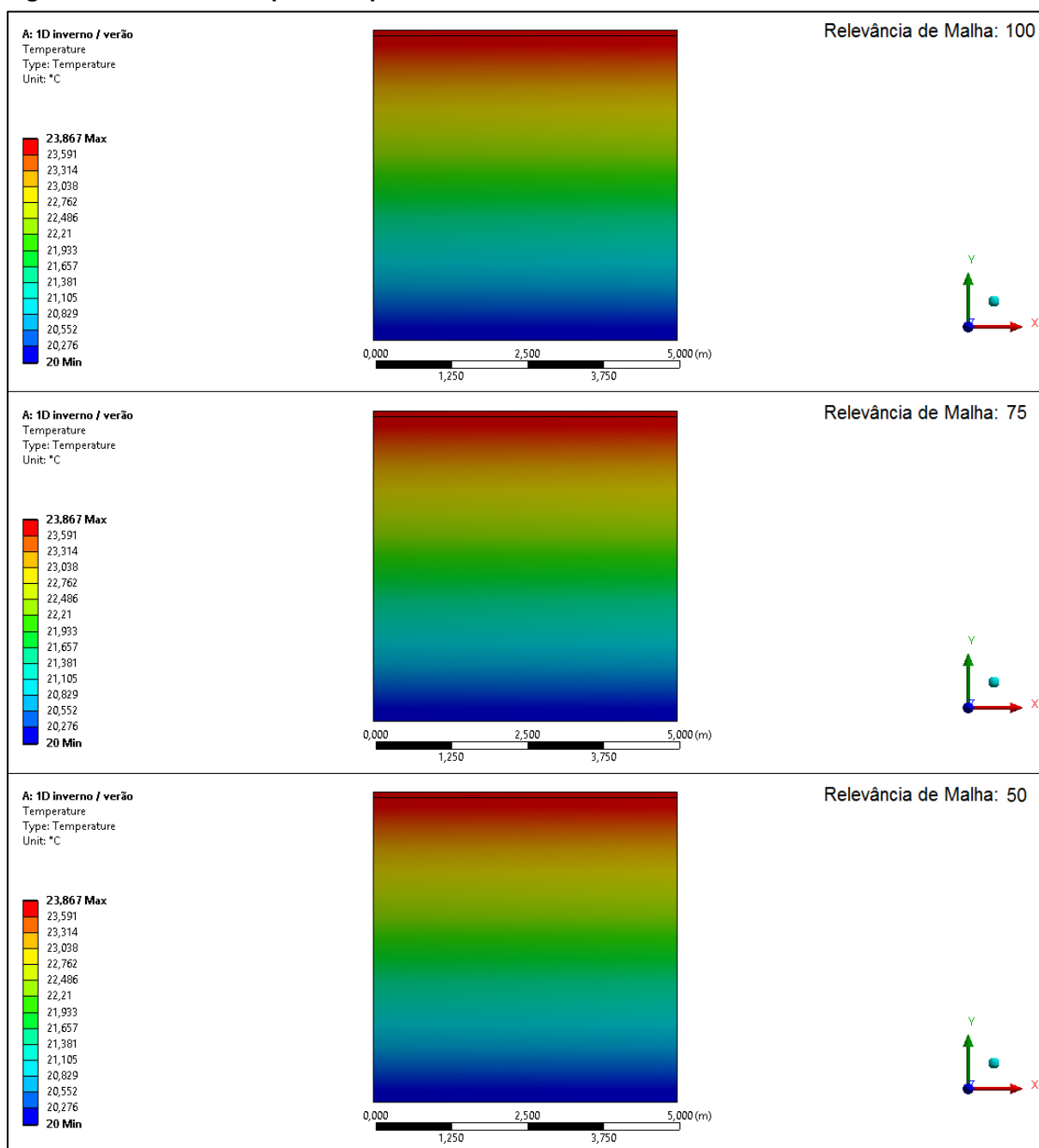
Os perfis de temperatura e o fluxo de calor característicos da estrutura nas condições aplicadas foram calculados pelo software e estão expostos a seguir. Embora as simulações tenham sido realizadas em modelos diferentes, as medidas base e características da estrutura mantiveram-se constantes.

4.1 ANÁLISE UNIDIMENSIONAL

A transferência de calor unidimensional avalia a interação do piso e do solo no ambiente interno ao longo do eixo Y. Devido a essa análise restringir apenas a influência do ambiente interno da edificação, ambas as condições de verão e inverno apresentam o mesmo perfil de distribuição de temperatura.

Os perfis de distribuição de temperatura do modelo unidimensional estão expostos na Figura 13 conforme relevância de malha.

Figura 13 - Perfis de temperatura para modelo unidimensional conforme relevância de malha



Fonte: Autoria própria.

Como é possível observar na escala de temperatura na Figura 13, não houve modificações perceptíveis na distribuição de temperatura conforme a variação da malha no modelo unidimensional.

Para o controle térmico no interior de uma edificação, é necessário analisar os ganhos e perdas de calor do ambiente interno. Sendo assim, uma vez que o modelo unidimensional é limitado apenas para as condições do ambiente interno, o total de

fluxo de calor desse modelo é igual para ambas as condições verão e inverno. Essa relação está expressa na Tabela 3.

Tabela 3 - Fluxo de calor em análise unidimensional

Modelo	Relevância da Malha	Fluxo de calor no ambiente interno [W/m ²]	
		Verão	Inverno
Unidimensional	100	-0,400	-0,400
	75	-0,400	-0,400
	50	-0,400	-0,400

Fonte: Auditoria Própria

O fluxo de calor pode apresentar valores positivos ou negativos. O ganho de calor no ambiente interno é representado como sendo um fluxo de positivo. Em contrapartida, o oposto ocorre com o fluxo de calor quando há perda de calor desse ambiente, recebendo assim sinal negativo.

4.1.1 Verificação do modelo unidimensional

Para verificar a influência dos elementos finitos variou-se a malha tratada pelo sistema. A relevância da malha foi variada em 50, 75 e 100, conforme escala do software. Como é possível visualizar na Tabela 3 e Figura 13, a variação de relevância da malha na análise unidimensional não apresentou influência sobre o fluxo de calor e distribuição de temperatura no sistema.

Outra abordagem para verificação dos resultados do fluxo de calor, para o caso unidimensional, é utilizar a dedução analítica. Sendo assim, é realizado os cálculos referentes à transferência de calor unidimensional por meio de circuitos térmicos equivalentes. A equação utilizada para esse método está exposta na Equação 5:

$$q_y'' = \frac{\Delta T}{\sum R_t} \quad [5]$$

Onde q_y'' é o fluxo de calor unidimensional, por metro quadrado, na direção Y, ΔT é a diferença de temperatura global e $\sum R_t$ é o somatório das resistências térmicas do sistema analisado.

Aplicando-se o somatório das resistências térmicas e a diferença global de temperatura do modelo unidimensional na Equação 5, obtém-se a Equação 6:

$$q_y'' = \frac{T_\infty - T_s}{\frac{1}{h} + \frac{L_{\text{piso}}}{k_{\text{piso}}} + \frac{L_{\text{solo}}}{k_{\text{solo}}}} \quad [5]$$

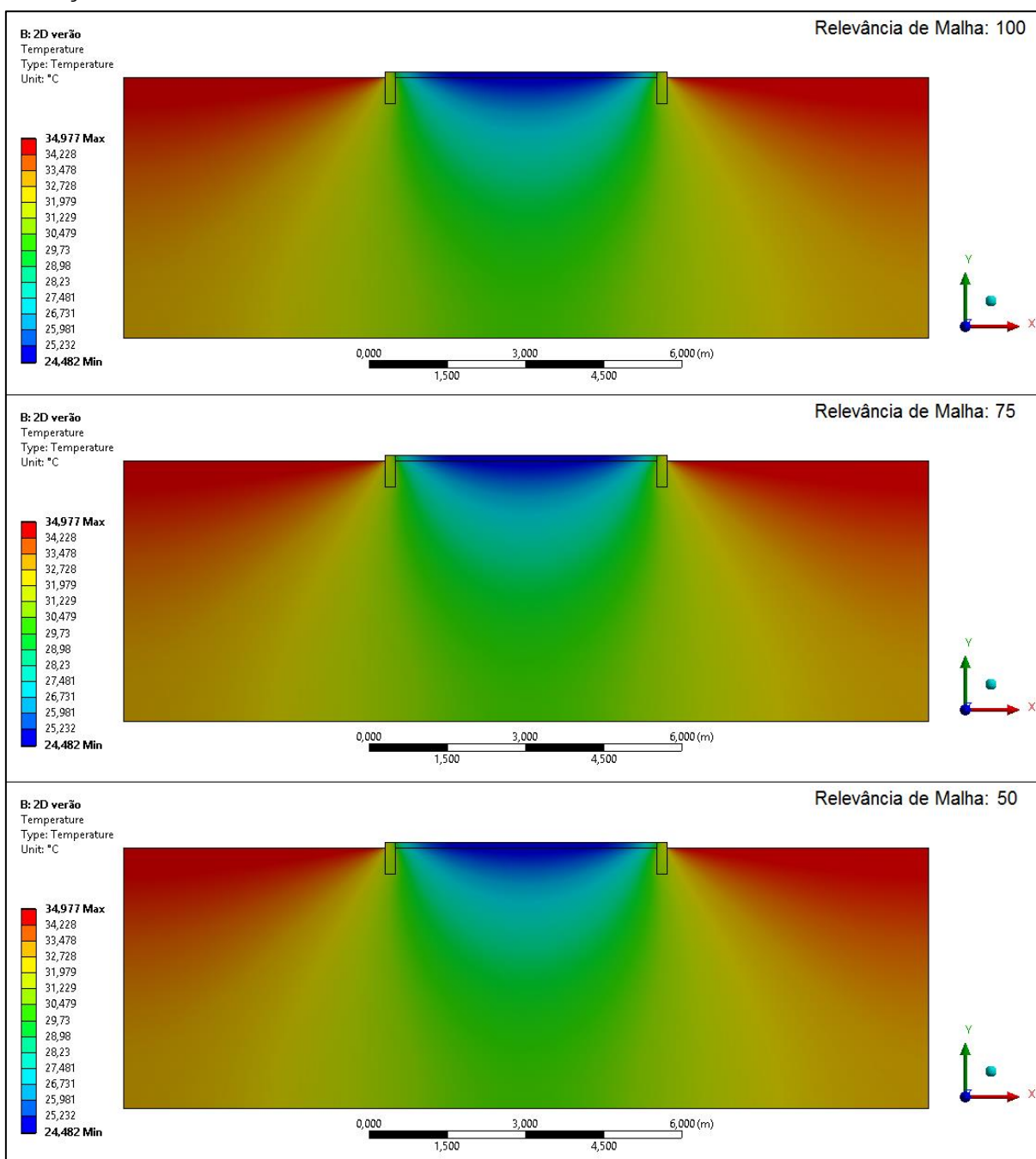
Dessa maneira, aplicando-se os valores expressos nas Tabelas 1 e 2, junto com as temperaturas arbitradas, o fluxo de calor unidimensional calculado a partir desse método é de 0,4 W/m². Esse valor é igual ao fluxo de calor obtido pela simulação em software.

4.2 ANÁLISE BIDIMENSIONAL

Na análise bidimensional, foi avaliada a transferência de calor no sistema composto por solo, piso e baldrame. Nessa simulação foram gerados perfis de distribuição de temperatura e do fluxo de calor ao longo do modelo para ambas as condições de verão e inverno, anteriormente apresentadas, no plano XY.

Os perfis de distribuição de temperatura do modelo bidimensional, na condição de verão, estão expostos na Figura 14 separados conforme a relevância de malha.

Figura 14 - Perfis de temperatura em análise bidimensional conforme relevância de malha, condição de verão



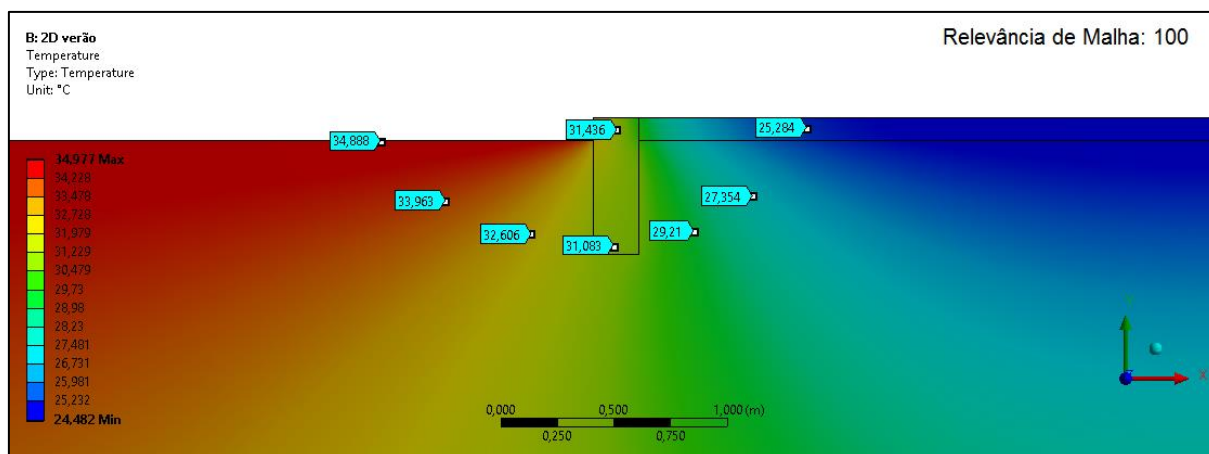
Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 14 que não houveram modificações perceptíveis na distribuição de temperatura conforme a variação da malha no modelo bidimensional na condição de verão.

Tendo um foco maior no baldrame e suas proximidades é possível observar com mais clareza a variação de temperatura nessa região causado devido ao efeito

das pontes térmicas. A Figura 15 ilustra a região do baldrame na condição de verão com relevância de malha como sendo 100.

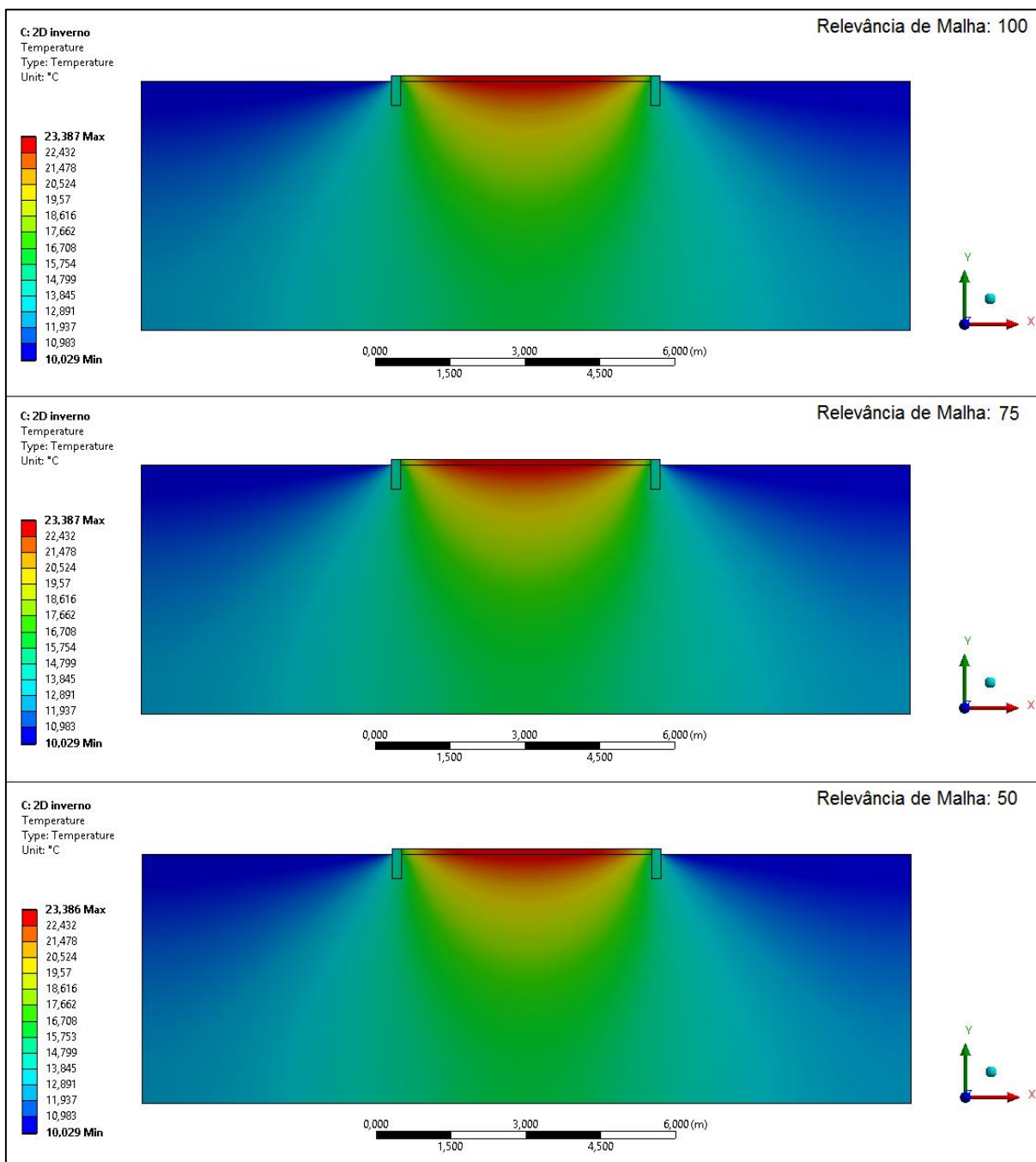
Figura 15 - Perfil de temperatura na região do baldrame, condição de verão e relevância de malha 100



Fonte: Autoria própria

Por sua vez, os perfis de distribuição de temperatura do modelo bidimensional na condição de inverno estão expostos na Figura 16, conforme a relevância de malha.

Figura 16 - Perfis de temperatura em análise bidimensional conforme relevância de malha, condição de inverno

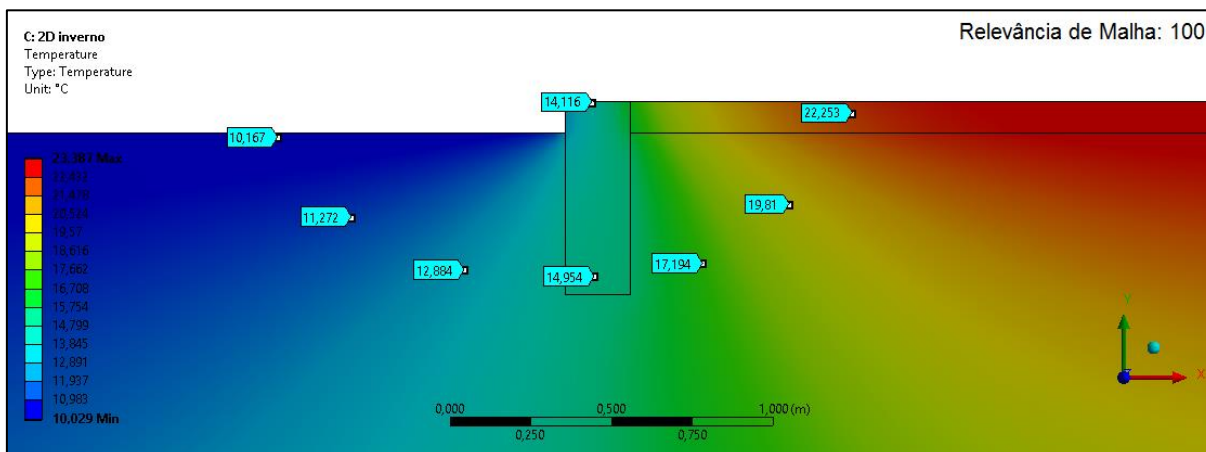


Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 16 modificações mínimas na distribuição de temperaturas para a condição de inverno. Nota-se essa modificação ao analisar a escala de temperaturas referente a malha de relevância 50. Entretanto, tal variação é praticamente imperceptível, podendo ser notada apenas ao observar a casa milesimal nos valores de temperaturas.

Assim como na condição anterior, tendo um foco maior no baldrame e suas proximidades é possível observar com mais clareza o efeito das pontes térmicas através da variação de temperatura nessa região. Ilustra-se na Figura 17 a região do baldrame na condição de verão com relevância de malha como sendo 100.

Figura 17 - Perfil de temperatura na região do baldrame, condição de inverno e relevância de malha 100



Fonte: Autoria própria

Dessa maneira, na análise bidimensional, os efeitos das pontes térmicas passam a ser visíveis. As Figuras 14 a 17 ilustram com clareza as variações de temperaturas ao longo do sistema, formando um perfil de distribuição não regular. Tal distribuição ocorre devido a interação entre si de matérias com propriedades distintas e pelo sistema ter uma geometria não regular.

O fluxo de calor total do sistema bidimensional para ambas condições, conforme relevância de malha, está expresso na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de fluxo de calor para modelo bidimensional

Modelo	Relevância da Malha	Fluxo de calor no ambiente interno [W/m ²]	
		Verão	Inverno
Bidimensional	100	39,042	-49,690
	75	38,505	-49,007
	50	37,478	-47,699

Fonte: Autoria Própria

4.2.1 Verificação do modelo bidimensional

O fluxo de calor apresentou queda em sua intensidade conforme a diminuição da relevância da malha. Como é possível visualizar na Tabela 4, o valor do fluxo de calor, para ambas condições de verão e inverno, diminuiu 1,4% do valor ao reduzir a relevância da malha de 100 para 75. A relação de redução da relevância de 100 para 50, por sua vez, ocasionou diminuição na transferência de calor em 4% de seu valor.

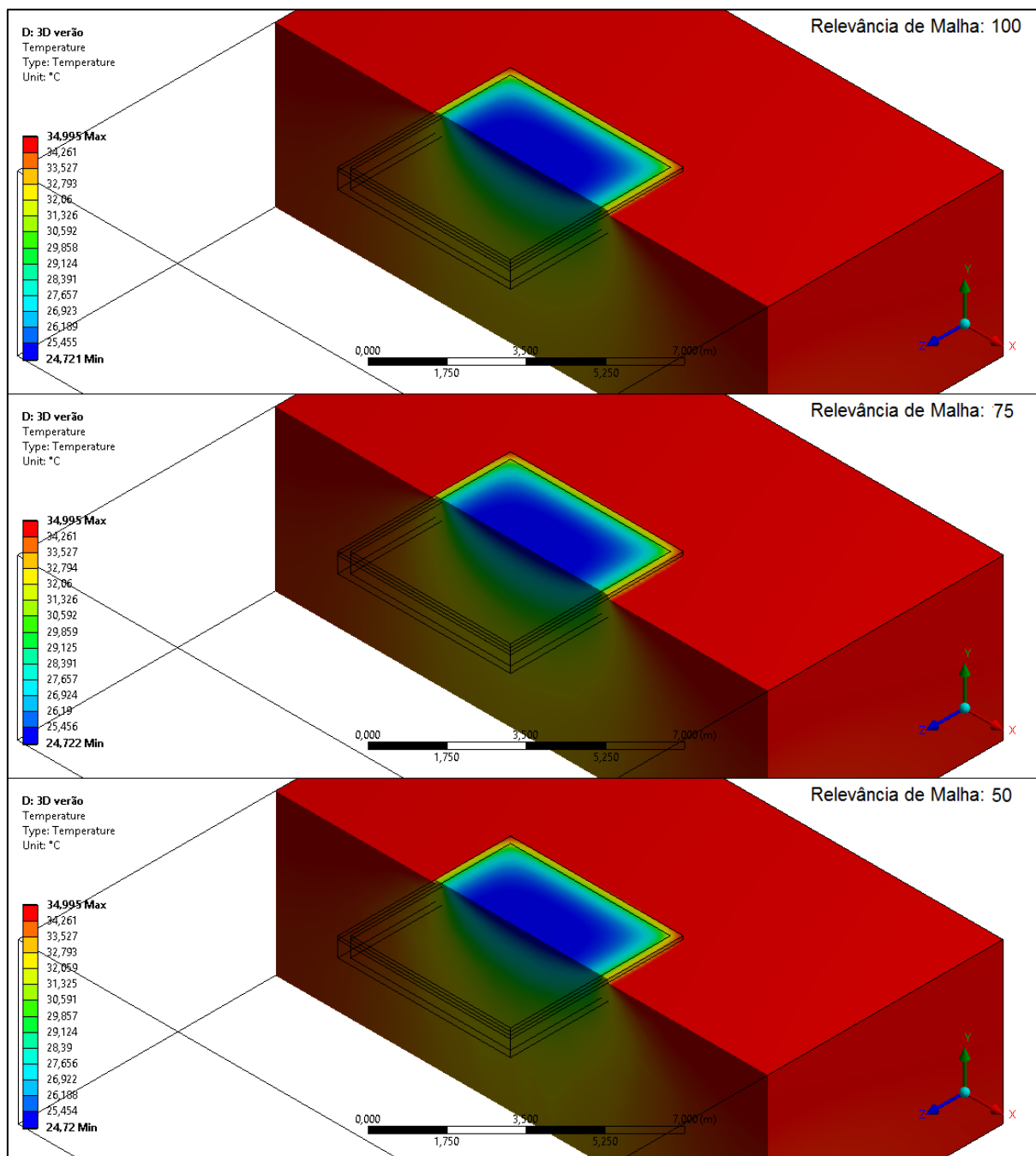
Tendo em foco a distribuição de temperaturas, as diferenças passam a ser praticamente imperceptíveis conforme a variação da malha. Dessa maneira, observa-se que os arranjos de malha utilizados apresentaram pequena influência nos resultados do sistema bidimensional.

4.3 ANÁLISE TRIDIMENSIONAL

Assim como na análise bidimensional, as simulações tridimensionais avaliaram a transferência de calor em um sistema composto por solo, piso e baldrame.

Os perfis de distribuição de temperatura para a condição de verão estão expostos na Figura 18 e separados conforme relevância de malha.

Figura 18 - Perfis de temperatura em análise tridimensional conforme relevância de malha, condição de verão

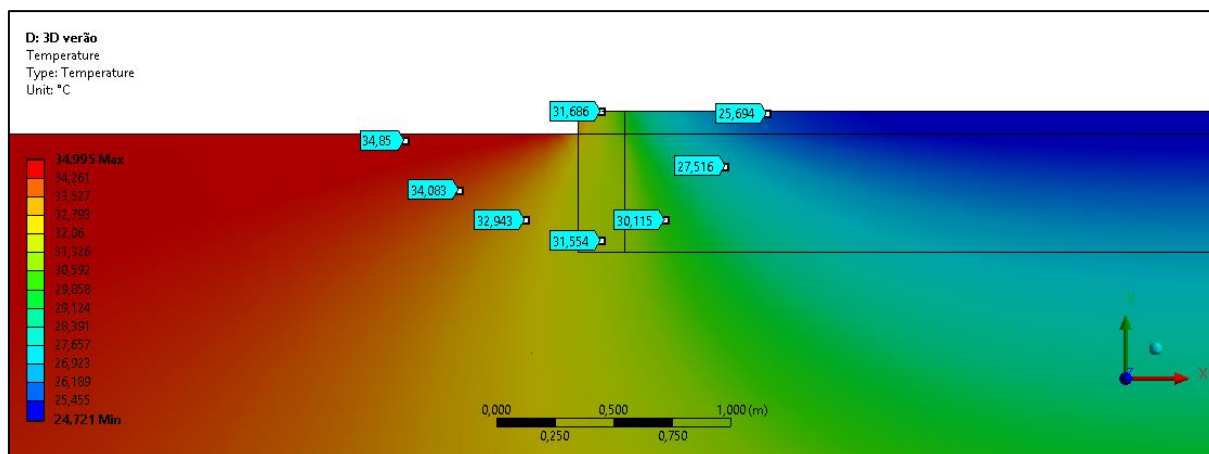


Fonte: Autoria própria

Observa-se na Figura 18 que houveram modificações mínimas na distribuição de temperaturas conforme a variação da malha para a condição de verão. Entretanto, tal variação nota-se apenas ao observar a casa milésima nas escalas de temperaturas.

Tendo um foco maior no baldrame e suas proximidades é possível ver com mais clareza a variação de temperatura. A Figura 19 ilustra a região do baldrame na condição de verão com relevância de malha como sendo 100.

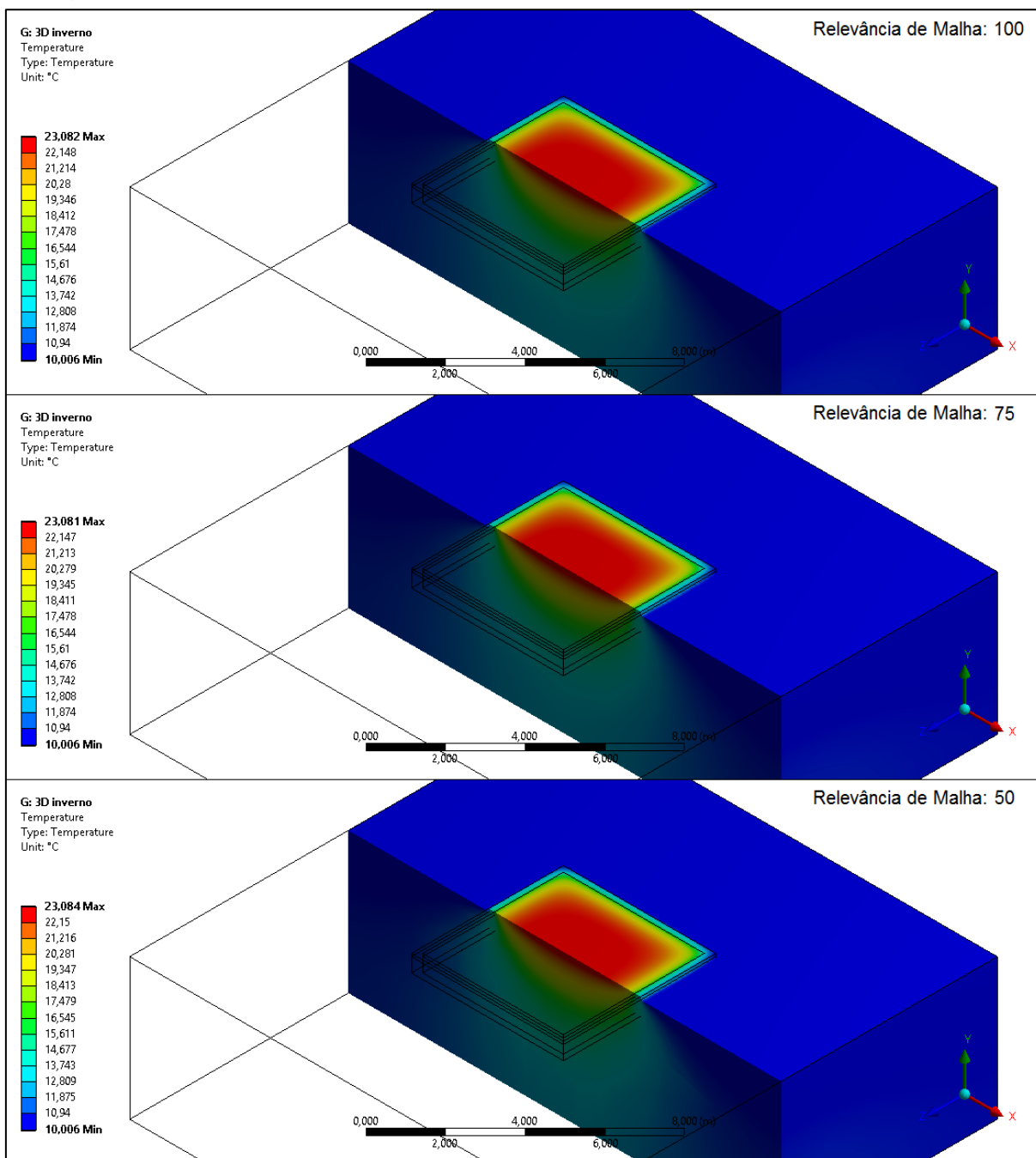
Figura 19 - Perfil de temperatura na região do baldrame, análise tridimensional na condição de verão e relevância de malha 100



Fonte: Autoria própria

Os perfis de distribuição de temperatura para a condição de inverno estão expostos na Figura 20 conforme relevância de malha.

Figura 20 - Perfis de temperatura em análise tridimensional conforme relevância de malha, condição de inverno

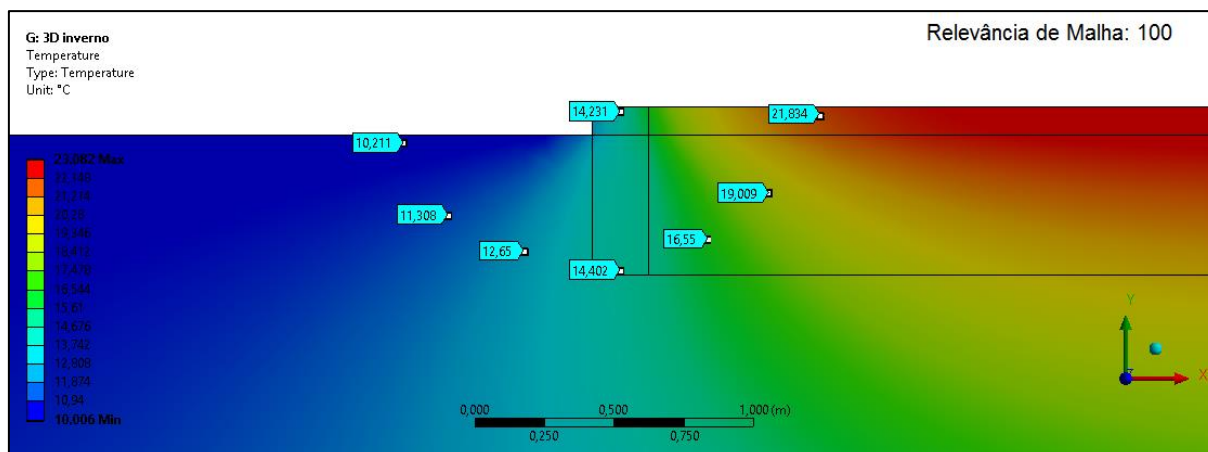


Fonte: Autoria própria

Observa-se na escala de temperatura na Figura 20, assim como na condição de verão, as modificações na distribuição de temperaturas conforme a variação da malha na condição de inverno. Entretanto, nota-se tal variação apenas ao analisar a casa milésima nos valores de temperatura, sendo assim uma variação mínima.

Tendo um foco maior no baldrame e suas proximidades é possível ver com mais clareza a variação de temperatura. A Figura 21 ilustra a região do baldrame na condição de verão com relevância de malha como sendo 100.

Figura 21 - Perfil de temperatura na região do baldrame, análise tridimensional na condição de inverno e relevância de malha 100



Fonte: Autoria própria

Como no caso bidimensional, os efeitos das pontes térmicas estão visíveis. As Figuras 18 a 21 ilustram a variação irregular de temperatura causada pela variação de geometria e de material na região de interação entre baldrame, piso e solo.

Os resultados do fluxo de calor total do ambiente interno na análise tridimensional para esse modelo em ambas as condições estão expressos na Tabela 5.

Tabela 5 - Fluxo de calor em análise tridimensional

Modelo	Relevância da Malha	Fluxo de calor no ambiente interno [W/m ²]	
		Verão	Inverno
Tridimensional (piso com 5x5m)	100	41,777	-53,171
	75	42,542	-54,144
	50	42,193	-53,701

Fonte: Autoria Própria

Modificando-se o comprimento do piso para 10 metros para fins de comparação, o valor do fluxo de calor sofre modificações. Dessa maneira, passa a ter os valores ilustrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Fluxo de calor em análise tridimensional para piso com 10 metros de comprimento

Modelo	Relevância da Malha	Fluxo de calor no ambiente interno [W/m ²]	
		Verão	Inverno
Tridimensional (piso com 10x5m)	100	45,172	-57,492

Fonte: Aatoria Própria

4.3.1 Verificação do modelo tridimensional

Como expresso na Tabela 5, o fluxo de calor apresentou pequena variação conforme a mudança da relevância da malha. Além disso, é possível visualizar variação irregular no fluxo de calor conforme mudança de malha. Reduzindo-se a relevância da malha de 100 para 75, o valor do fluxo de calor em ambas condições de verão e inverno aumentou 1,8% do seu valor. Já para o caso da redução de relevância da malha de 100 para 50, é possível observar o aumento desse fluxo de calor de 1%.

Tendo em foco a distribuição de temperaturas, as diferenças passam a ser praticamente imperceptíveis conforme a variação da malha. Dessa maneira, observa-se que os arranjos de malha utilizados apresentaram pequena influência nos resultados do sistema tridimensional.

4.4 COMPARAÇÃO MULTIDIMENSIONAL

Ilustram-se na Tabela 7 os resultados do fluxo de calor das simulações multidimensionais, tendo em vista a relevância 100 nas malhas.

Tabela 7 - Fluxo de calor nas simulações multidimensionais

Modelo	Fluxo de calor [W/m ²]	
	Verão	Inverno
Unidimensional	-0,400	-0,400
Bidimensional	39,042	-49,690
Tridimensional (piso com 5x5m)	41,777	-53,171
Tridimensional (piso com 5x10m)	45,172	-57,492

Fonte: Autoria Própria

Um ponto a se analisar em ambas as condições de verão e inverno, é a intensidade e direção do fluxo de calor. No modelo unidimensional o fluxo de calor é baixo e apresenta mesma intensidade e direção para ambas condições de verão e inverno. Isso ocorre devido a esse sistema desprezar a influência do ambiente externo nas simulações, apresentando apenas a interação entre ambiente interno, piso e solo na direção Y.

Os modelos bidimensional e tridimensional, por sua vez, apresentam fluxo de calor mais significativo e diferença entre as condições de verão e inverno. Nesses modelos, é acrescentado o baldrame na estrutura da edificação, assim como a influência do ambiente externo. Dessa maneira o fluxo de calor ganha intensidade e passa a apresentar diferença na sua direção dependendo das condições que o modelo está sujeito.

No verão, devido ao ambiente externo apresentar maior temperatura se comparado com o ambiente interno, o fluxo de calor toma o sentido do ambiente externo ao interno. Em contrapartida, no inverno o ambiente externo passa a ter temperaturas menores, mudando a direção do fluxo de calor, ou seja, do ambiente interno ao externo.

Comparando os modelos bidimensional e tridimensionais apresentados nesse trabalho, a diferença entre a intensidade do fluxo de calor varia conforme o modelo tridimensional. O modelo bidimensional apresenta fluxo de calor aproximadamente 6,5% menor em comparação com o tridimensional com piso de dimensões 5 x 5 metros, em ambas as condições de verão e inverno. Já para o modelo com 5 x 10 metros, essa diferença passa a ser de 13,6%. Essa variação entre modelo bidimensional e tridimensional ocorre devido ao modelo passar a contabilizar a

existência de quinas. Já para o caso da variação entre os modelos tridimensionais, ocorre devido à variação na geometria.

Desta maneira, devido a simplicidade de modelagem e tempo computacional, as simulações no modelo bidimensional para estruturas mais simples passam a ser mais interessantes para essa análise. Entretanto, caso diferentes condições forem utilizadas ao longo do modelo tridimensional, tal como a variação do comprimento do modelo, o mesmo passa a ter diferença mais representativa nos resultados, tornando-se necessária a análise tridimensional.

Outro ponto a se analisar nas simulações realizadas é o fenômeno das pontes térmicas. Tal fenômeno pode ser observado nos modelos bidimensional e tridimensional. Os perfis de temperatura apresentados anteriormente nas Figuras 14 a 21 ilustram a variação irregular da temperatura ao longo dos modelos referentes. Essa variação pode ser observada com maior intensidade ao analisar as regiões onde há influência mútua entre materiais distintos e de geometrias não regulares.

5 CONCLUSÃO

As considerações feitas ao analisar a estrutura inferior de uma edificação trouxeram diferenças no resultado final de transferência de calor e perfis de temperatura. A análise em modelo unidimensional apresentou o menor valor para fluxo de calor se comparado com os modelos bidimensional e tridimensional. Nesse caso de simulação, é levado em consideração a transferência de calor entre piso e solo apenas, desconsiderando as condições do ambiente externo. Dessa maneira, o fluxo de calor não apresenta variação em sua direção, além de exibir o mesmo valor não importando a variação das condições do ambiente externo.

A análise bidimensional e tridimensional de transferência de calor em edificações, por sua vez, pôde ilustrar com clareza a importância de contabilizar o efeito das pontes térmicas. Essas abordagens passam a considerar a influência do ambiente externo sobre o ambiente interno. Há locais onde mudanças de material e estruturas não regulares estão presentes, tais como o canto e quina dos modelos avaliados. Nessas regiões estão presentes o efeito das pontes térmicas, cuja quais causam variações significativas na direção e intensidade do fluxo de calor. Dessa maneira, é observado curvas nos perfis de temperatura e valores de fluxo de calor mais expressivos.

Comparando as simulações unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais observou-se valor maior de fluxo de calor para a análise tridimensional. O fluxo de calor tridimensional apresentou valores em torno de 6,5% maiores se comparado com o bidimensional para modelos mais simples, e 13,6% para modelos mais complexos. No caso das simulações unidimensionais, o fluxo de calor passa a ser em torno de 99% menor se comparado ao tridimensional. Dessa maneira, levando em consideração a importância de se obter um resultado mais próximo da realidade possível, essa comparação mostra a importância de se contabilizar os efeitos bidimensionais e tridimensionais nas análises de transferência de calor que envolvem a parte inferior de uma edificação.

A verificação feita para o modelo unidimensional mostrou equivalência entre os valores encontrados pela solução analítica e a simulação feita pelo software. O método dos circuitos térmicos equivalentes obteve valor de fluxo de calor igual ao valor obtido com software. Isso traz segurança sobre a validade dos cálculos feitos pelo software ANSYS Mechanical APDL sobre o sistema unidimensional.

A análise de sensibilidade de malha não apresentou diferenças significativas nos modelos estudados. No modelo unidimensional estudado, a variação de malha não apresentou diferença nos resultados finais de fluxo de calor. Para os modelos bidimensional e tridimensional, por sua vez, mostrou-se uma pequena diferença entre os resultados, porém não muito significativa.

Para futuras pesquisas nessa área, propõe-se obter correlações entre os modelos unidimensional, bidimensional e tridimensional para implementação nos programas de simulação termo energético em regime permanente e transiente, aumentando assim a precisão nos cálculos das cargas térmicas.

REFERÊNCIAS

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. “Desempenho Térmico de Edificações Parte 1 : Definições , Símbolos E Unidades.”
- Bergman, Theodore L., Adrienne S. Lavine, Frank P. Incropera, and David P. Dewitt. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 7th Edition*. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- Canonsburg, Technology Drive. 2013. “ANSYS Mechanical APDL Thermal Analysis Guide” 3304 (November): 724–46.
- Corvacho, Maria Helena Póvoas. 1996. “Pontes Térmicas.” Universidade do Porto.
- Deru, M.P., and National Renewable Energy Laboratory (Us). 2003. “A Model for Ground-Coupled Heat and Moisture Transfer from Buildings.” *Technical Report*, no. June. <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33954.pdf>.
- Fukuyo, Kazuhiro. 2003. “Heat Flow Visualization for Thermal Bridge Problems ` Mes Visualisation Du Flux Thermique Afin D ’ E ´ S Aux Ponts Thermiques Lie” 26: 614–17. doi:10.1016/S0140-7007(03)00006-9.
- Garay, Roberto, Amaia Uriarte, and Inés Apraiz. 2014. “Performance Assessment of Thermal Bridge Elements into a Full Scale Experimental Study of a Building Fac.” *Energy and Buildings* 85: 579–91.
- Inc, ANSYS. 2013. “ANSYS Mechanical APDL Theory Reference” 15317 (November): 724–46.
- Logan, Daryl L, Evelyn Veitch, Chris Carson, Kamilah Reid Burrell, Vicki Gould, Erin Wagner, Daryl L Logan, et al. 2007. *A First Course in the Finite Element Method Fourth Edition. Transport*. Vol. 147. doi:10.1016/0022-460X(91)90505-E.
- Martin, K, A Campos-celador, C Escudero, I Gómez, and J M Sala. 2012. “Analysis of a Thermal Bridge in a Guarded Hot Box Testing Facility.” *Energy & Buildings* 50. Elsevier B.V.: 139–49. doi:10.1016/j.enbuild.2012.03.028.

Martin, K., A. Erkoreka, I. Flores, M. Odriozola, and J. M. Sala. 2011. "Problems in the Calculation of Thermal Bridges in Dynamic Conditions." *Energy and Buildings* 43 (2-3): 529–35. doi:10.1016/j.enbuild.2010.10.018.

Ollivier, F, and J J Roux. 2001. "Effect of 2D Modelling of Thermal Bridges on the Energy Performance of Buildings Numerical Application on the Matisse Apartment" 33: 583–87.

Pérez-Lombard, Luis, José Ortiz, and Christine Pout. 2008. "A Review on Buildings Energy Consumption Information." *Energy and Buildings* 40 (3): 394–98. doi:10.1016/j.enbuild.2007.03.007.

Ribas, Murilo Teixeira. 2014. "Relatório Final de Iniciação Científica."

Santos, Gerson Henrique dos, and Nathan Mendes. 2012. "Modeling Heat and Moisture Transfer." In *14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, 7.

Tadeu, A., I. Simões, N. Simões, and J. Prata. 2011. "Simulation of Dynamic Linear Thermal Bridges Using a Boundary Element Method Model in the Frequency Domain." *Energy and Buildings* 43 (12). Elsevier B.V.: 3685–95. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.001.

"Tb.pdf." n.d.

Theodosiou, T G, and A M Papadopoulos. 2008. "The Impact of Thermal Bridges on the Energy Demand of Buildings with Double Brick Wall Constructions." *Energy and Buildings* 40: 2083–89. doi:10.1016/j.enbuild.2008.06.006.