

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

VANESSA APARECIDA CAIEIRO DA COSTA

Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no
pré-processador *Slab*

São Carlos
2017

VANESSA APARECIDA CAIEIRO DA COSTA

Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no
pré-processador *Slab*

Dissertação apresentada ao Instituto de
Arquitetura e Urbanismo de São Carlos
da Universidade de São Paulo, como
parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Arquitetura e
Urbanismo.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:
Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Apoio:
Coordenação de Aperfeiçoamento de
Pessoal de Nível Superior – CAPES

“Versão corrigida”

São Carlos

2017

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C837t COSTA, VANESSA APARECIDA CAIEIRO
Trocas de calor entre edificações térreas e o solo
e sua modelagem no pré-processador Slab / VANESSA
APARECIDA CAIEIRO COSTA; orientadora Karin Maria
Soares Chvatal . -- São Carlos, 2017.
237 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2017.

1. Conforto térmico. 2. Simulação computacional.
3. EnergyPlus. 4. Temperatura do solo. 5. Pré
processador Slab. I. Chvatal , Karin Maria Soares,
orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Vanessa Aparecida Caieiro da Costa**

Título da dissertação: **"Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador Slab"**

Data da defesa: **29/06/2017**

Orientador: **Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal**

Comissão Julgadora:

Resultado:



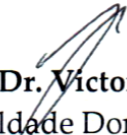
Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

APROVADA
(IAU/USP)

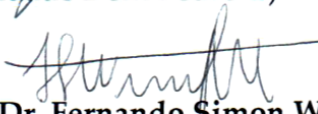


Profa. Dra. Kelen Almeida Dornelles
(IAU/USP)

Aprovada


Prof. Dr. Victor Figueiredo Roriz
(Faculdade Dom Pedro II)

Aprovado


Prof. Dr. Fernando Simon Westphal
(UFSC)

Aprovada

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Profa. Dra. Cibele Saliba Rizek.**

DEDICATÓRIA

Aos meu pais, Antonio e Sandra, meus maiores incentivadores, por todo amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, sincera e profundamente:

À Deus, que me guiou e conduziu em toda essa caminhada, sem ele nada seria possível.

Aos meus pais, Antonio e Sandra, meu infinito agradecimento, por todo amor e exemplo de força, sempre me incentivando na realização dos meus sonhos e me encorajando a enfrentar os momentos difíceis da vida.

Ao meu noivo Luiz Alberto Alvarenga, por todo o amor, companheirismo e força que me proporcionou em todos os momentos, e por estar sempre ao meu lado.

A todos os meus amigos que torceram por mim e me apoiaram nos momentos difíceis e que, de alguma forma, contribuíram para o êxito desta pesquisa.

Ao professor Henor Artur de Souza, meu antigo orientador, por quem tenho imensa admiração, que desde a graduação sempre esteve presente em minha vida, me apoiando e incentivando na realização dos meus projetos.

À professora Karin Chvatal, por toda dedicação, incentivo e pela excelência na orientação e, principalmente, por ter acreditado no meu potencial e que eu conseguiria atingir os meus objetivos.

Ao professor Victor Roriz, por todo o suporte e contribuição, estando sempre pronto a me auxiliar durante todo o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao grupo de pesquisa ArqTema e todos os meus amigos do mestrado, pelos momentos divididos juntos, trocas de conhecimento e por dividir comigo as angústias e alegrias durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos professores Victor Roriz, Kelen Dornelles e Fernando Westphal, membros da banca, pelo incentivo e pela contribuição ao longo da pesquisa, na Qualificação e na Defesa final.

A esta instituição e todos os seus funcionários, por estarem sempre de braços abertos a receber e fornecer conhecimento e infraestrutura para a realização deste trabalho. Em especial a: Pedro Mattia, Paulo Pratavieira, Oscar Santos Neto, José Renato Dibo, Mara Lino, Flávia Macambyra e Sérgio Trevelin. A todos os seus professores, pela atenção sempre solícita e pelo apoio fundamentais para o desenvolvimento deste mestrado, em especial, Rosana Caram, Kelen Dornelles, Bruno Damineli, Gherhardt Ribatski, Mario de Castro e Cristina Tsuha.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e fomento a este trabalho de pesquisa.

Por fim, a todos que de uma forma colaboraram, me oferecendo seu apoio e amizade.

RESUMO

COSTA, V. A. C. DA. **Trocas de calor entre edificações térreas e o solo e sua modelagem no pré-processador *Slab***. 2017. 119 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

As trocas de calor entre o piso e o solo de edificações térreas é um dos aspectos mais influentes em seu desempenho térmico e energético. No entanto, devido à complexidade dos métodos de cálculo e à escassez de estudos nessa área, há ainda um grande número de incertezas quanto à sua modelagem em programas de simulação computacional. O objetivo principal desta pesquisa é identificar a forma mais correta para a modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo de edificações térreas no programa de simulação de desempenho *EnergyPlus*, com o uso do pré-processador *Slab*. A metodologia consiste na verificação do impacto de distintas alternativas de modelagem e na comparação entre as temperaturas da interface piso e solo medidas em célula-teste e simuladas com o *Slab*. Com a verificação do impacto das alternativas de modelagem foi possível identificar a forma mais correta de modelagem do *Slab* e os parâmetros de entrada com maior impacto no desempenho térmico de uma habitação de interesse social. Já a medição em célula-teste permitiu analisar a relação entre a evolução das temperaturas da célula-teste e do solo. Verificou-se que a temperatura externa do ar (média mensal) apresenta valores bastante próximos à temperatura do solo, sugerindo que utilizar a temperatura externa pode ser uma alternativa quando não há dados do solo. Com esses dados, foi possível desenvolver simulações paramétricas com diferentes combinações de parâmetros de entrada e comparar a temperatura da interface piso e solo simulada pelo *Slab* com a medida. Os resultados indicaram que o *Slab* funciona corretamente e que gera valores de temperatura da interface piso e solo muito próximos da realidade quando este utiliza parâmetros de entrada adequados. Foi verificado também o alto potencial de impacto dos parâmetros de entrada: evapotranspiração, albedo e as propriedades do

solo nos resultados do *Slab*. Além disso verificou-se que, o uso de outras alternativas de modelagem, no lugar do *Slab*, gera uma diferença muito significativa, com variação de -26,2 a -55,2% nos graus-hora de desconforto totais de uma edificação. Por fim, como síntese dessa pesquisa, foi elaborado um *Manual do Slab* com o objetivo de auxiliar e incentivar o uso do pré-processador.

Palavras-chave: Conforto térmico, Simulação computacional, *EnergyPlus*, Temperatura do solo, Fundação em laje, Pré-processador *Slab*.

ABSTRACT

COSTA, V. A. C. DA. **Heat exchanges between the floor and the ground of a single-story slab-on-grade building in Slab preprocessor.** 2017. 119 s. Thesis (Master). Institute of Architecture and Urbanism of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

The heat exchanges between the floor and the ground of a single-story slab-on-grade building is one of the most influential aspects in its thermal and energy performance. However, due to the calculation methods complexity and the scarcity of studies in this area, there are still a great number of uncertainties regarding its modeling in computer simulation programs. The main objective of this research is to identify the most correct way to model heat exchanges between the floor and the ground of a single-story slab-on-grade building in the EnergyPlus performance simulation program using the Slab preprocessor. The methodology consists of verifying the impact of different modeling alternatives and comparing the temperature of the ground and floor interface measured in test cells and simulated with Slab. With the impact verification of the modeling alternatives, it was possible to identify the most correct way of Slab modeling and the input parameters with the greatest impact on the thermal performance of a social housing. The test-cell measurement has allowed analyzing the relationship between the evolution of test-cell and soil temperatures. It was verified that the external air temperature (monthly average) presents very close values to the soil temperature, suggesting that using the external temperature can be an alternative when there is no soil data. With these data, it was possible to develop parametric simulations with different input parameters combinations and to compare the temperature of the ground and floor interface simulated by Slab with the measurement. The results indicated that Slab works correctly and generates values of temperature of the ground and floor interface very close to reality when it uses appropriate input parameters. It was also verified the high impact potential of the input

parameters: evapotranspiration, albedo and soil properties in the Slab results. In addition, it was verified that the use of other modeling alternatives, in place of Slab, generates a very significant difference, varying from -26.2 to -55.2% in the total discomfort degrees of a building. Finally, as a synthesis of this research, a Slab Manual was developed with the purpose to assist and encourage the preprocessor use.

Keywords: Thermal comfort, Computer simulation, EnergyPlus, Ground Temperature, Slab-on-grade. Slab preprocessor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxo de calor através de um elemento prismático do solo.....	27
Figura 2.2 - Mecanismos de transmissão de calor no solo.....	29
Figura 2.3 - Ação do teor de umidade no solo	31
Figura 2.4 - Esquema representativo do regime térmico do solo.....	35
Figura 2.5 - Perfis de temperatura em um solo coberto com materiais de alta e baixa condutividade térmica.....	37
Figura 2.6 - Influência do edifício no regime térmico do solo	38
Figura 2.7 - Esquema representativo das trocas de calor consideradas no método de cálculo do <i>Slab</i>	45
Figura 2.8 - Definição do sistema de coordenadas do domínio virtual	47
Figura 2.9 - Balanço térmico da superfície do solo.....	48
Figura 2.10 - Acesso ao arquivo de dados de entrada do <i>Slab</i>	63
Figura 2.11 - Acionamento do <i>Slab</i> externamente.....	63
Figura 2.12 - Acionamento do <i>Slab</i> internamente.....	64
Figura 2.13 - Procedimento da simulação preliminar	65
Figura 2.14 - Simulação com o procedimento de convergência.....	65
Figura 2.15 - Divisão da superfície do piso sobre solo.....	67
Figura 2.16 - Definição dos domínios vertical e horizontal do modelo virtual .	68
Figura 3.1 - Projeto original da edificação e do modelo simulada.....	78
Figura 3.2 - Diagrama bioclimático de Givoni (1992) para a cidade de São Carlos/SP-Brasil	80
Figura 3.3 - Limites superior e inferior da zona de conforto, temperatura de conforto e temperatura externa horárias para São Carlos/SP-Brasil	90
Figura 3.4 - Células-teste do LCC e do LCA	91
Figura 3.5 - Localização da Célula-teste	92
Figura 3.6 - Célula-teste após os reparos.....	92
Figura 3.7 - Planta baixa da Célula-teste	93
Figura 3.8 - Cortes AA e BB da Célula-teste	94
Figura 3.9 - Medições da temperatura superficial no piso e no solo	95

Figura 3.10 - Sensor de temperatura DS18B20 One-Wire thermometer – Maxim	96
Figura 3.11 - HOBO (marca Onset)	97
Figura 3.12 - Localização da Estação meteorológica do IAU	98
Figura 3.13 - Instalação do sensor DS18B20.....	99
Figura 3.14 - Intervenção no piso para instalação do equipamento	99
Figura 3.15 - Instalação do sensor no solo.....	100
Figura 3.16 - Sistema de medição	100
Figura 3.17 - Instalação do HOBO.....	101
Figura 3.18 - Instalação da sonda externa do HOBO	101
Figura 3.19 - Instalação do HOBO no ático da célula-teste	102
Figura 3.20 - Modelo virtual representativo da célula-teste	103
Figura 4.1 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes com o <i>Slab</i> e outras alternativas	113
Figura 4.2 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes do procedimento de convergência.....	115
Figura 4.3 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes dos dados de entrada do <i>Slab</i>	119
Figura 4.4 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes de influência das propriedades termofísicas do solo.....	122
Figura 4.5 - Evolução horária das temperaturas na célula-teste e no solo no período de 18 de junho a 8 de dezembro.....	127
Figura 4.6 - Evolução horária das temperaturas do ar interno e externo na célula-teste e no ático	127
Figura 4.7 - Evolução horária das temperaturas na célula-teste no intervalo de 8 a 14 de setembro	131
Figura 4.8 - Diferença horária entre a temperatura interna (T_{int}) e a temperatura da interface piso e solo ($T_{pio/solo}$)	133
Figura 4.9 - Diferença horária entre a temperatura do núcleo ($T_{núcleo}$) e a média das temperaturas dos perímetros ($T_{perímetro(média)}$).....	133
Figura 4.10 – Frequência de erro da temperatura simulada em relação à temperatura medida	139

Figura 4.11 - Percentual de ocorrência de erro de cada valor adotado para os parâmetros relacionados às propriedades do piso e do albedo.....	141
Figura 4.12 - Percentual de ocorrência de erro de cada valor adotado para os parâmetros relacionados às propriedades do solo e o uso ou não da evapotranspiração	142
Figura 4.13 - Correlação entre o erro simulado e o erro estimado segundo a Equação 4.1	146
Figura 4.14 - Correlação entre a temperatura do solo simulada e estimada segundo a Equação 4.2.....	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores de referência para a densidade do solo	26
Tabela 2.2 – Valores de referência para a condutividade do solo	27
Tabela 2.3 – Valores de referência para o calor específico do solo	28
Tabela 2.4 - Variação do albedo das superfícies	51
Tabela 2.5 - Variação da emissividade das superfícies	52
Tabela 2.6 - Variação da rugosidade das superfícies	53
Tabela 2.7 - Campos de entrada do <i>Slab</i> “ continua ”	61
Tabela 3.1 - Características construtivas e propriedades termofísicas dos elementos da edificação “ continua ”	78
Tabela 3.2 - Ganhos internos totais diários	79
Tabela 3.3 - Dados de entrada do módulo Airflow Network	81
Tabela 3.4 - Grupos e subgrupos das simulações e suas variações “ continua ”	82
Tabela 3.5 – Dados de entrada do objeto GDomain (descritos na Tabela 3.4) “ continua ”	84
Tabela 3.6 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: Materials</i> ” e detalhes adicionais sobre o procedimento de simulação para o caso de referência e demais simulações (descrita na Tabela 3.4) “ continua ”	85
Tabela 3.7 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps</i> ” “ continua ”	86
Tabela 3.8 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds</i> ”	87
Tabela 3.9 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps</i> ”	88
Tabela 3.10 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: Insulation</i> ”	88
Tabela 3.11 - Dados de entrada da Classe “ <i>Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab</i> ” “ continua ”	88

Tabela 3.12 - Descrição da composição e propriedades térmicas da envoltória	104
Tabela 4.1 - Tabela comparativa da temperatura do solo adotada nos casos A, B, C, D, E e F do subgrupo 3 do teste do procedimento de convergência e temperatura inicial	116
Tabela 4.2 - Horas de desconforto durante o ano	117
Tabela 4.3 - Horas de desconforto durante o ano	121
Tabela 4.4 - Horas de desconforto durante o ano	123
Tabela 4.5 - Amplitude diária média mensal das temperaturas (°C)	129
Tabela 4.6 - Diferença entre as temperaturas médias mensais do ar externo, interno e da interface piso e solo	129
Tabela 4.7 - Relação dos parâmetros avaliados e a sua faixa de variação .	137
Tabela 4.8 – Dados de entrada fixos para todos os modelos.....	137
Tabela 4.9 – Temperatura do ar interna média usado nas simulações	138
Tabela 4.10 – Parâmetros adotados nas simulações e os valores para as condições reais do estudo	140
Tabela 4.11 – Combinações de menor erro com as variáveis mais próximas às condições reais.....	144
Tabela 4.12 – Erro na temperatura média mensal do solo em relação a valores medidos (°C)	145
Tabela 4.13 - Impacto da variação das variáveis analisadas no erro estimado pela Equação 4.1 em relação aos valores medidos "contínua"	147
Tabela 4.14 – Impacto da variação dos parâmetros analisados na temperatura da interface piso e solo estimada pela Equação 4.2	150

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1	26
Equação 2.2	27
Equação 2.3	28
Equação 2.4	47
Equação 2.5	48
Equação 3.1	90
Equação 3.2	90
Equação 3.3	108
Equação 4.1	145
Equação 4.2	148

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

°CH: Graus-hora

CSV: *Comma separated variable*

EP: *EnergyPlus*

EPG: *EnergyPlus Group files*

EPW: *EnergyPlus Weather File* (arquivo climático formatado para o *EnergyPlus*)

FDM: método de diferença finito

IDF: *input data files* (arquivo de dados de entrada do *EnergyPlus*)

GT:BSurface: *Site:Ground Temperature: Building Surface*

GDomain: *Site: Ground Domain: Slab*

GDomainFD: *Site: Ground Domain: Slab with FiniteDifference*

GDomainKA: *Site: Ground Domain: Slab with KusudaAchenbach*

OUTPUT: arquivo de saída resultante das simulações com o *EnergyPlus* e/ou o *Slab*

Ren/h: Renovações de ar por hora

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

BDMEP: Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa

IAU: Instituto de Arquitetura e Urbanismo

INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

NBR: Norma Brasileira

RTQ-R: Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais

LISTA DE SÍMBOLOS

A: Área da seção transversal	(m ²)
Al: Albedo	
C: Capacidade Térmica	(kJ/m ² .K)
Cp: Calor específico	(J/kg.K)
Evap: Evapotranspiração	
G: Taxa de condução de calor no solo	(W/m ²)
k: Condutividade térmica	(W/m.K)
l: Distância percorrida	(m)
M: Massa	(kg)
Ms: Massa do solo seco	(kg)
M₁: Massa do solo úmido mais a massa da cápsula	(g)
M₂: Massa do solo seco mais a massa da cápsula	(g)
M₃: Massa da cápsula (com tampa)	(g)
Mi: Massa da amostra parafinada imersa em água	(g)
Mp: Massa da amostra parafinada	(g)
Q: Quantidade de calor	(J)
q: Fluxo de calor	(W)
q_{cs}: Convecção sensível	(W/m ²)
q_{etp}: Potencial de evapotranspiração	(W/m ²)
R: Resistência térmica	(m ² .K/W)
R²: Coeficiente de determinação	
R_{tot}: Saldo de radiação absorvida	(W/m ²)
T: Temperatura	(°C)
t: Tempo	(s)
ΔT: Gradiente de temperatura	(K)
TBS: Temperatura de bulbo seco	(°C)
Text: Temperatura externa do ar	(°C)
To: Temperatura do ponto de orvalho	(°C)
Tsetpoint: Temperatura de controle	(°C)
Tsolo(medida): Temperatura média mensal do solo medida	(°C)
Tsolo (simulada): Temperatura média mensal do solo simulada	(°C)
T_{18°C}: Temperatura do solo inicial igual a 18°C	(°C)
T_{25°C}: Temperatura do solo inicial igual a 25°C	(°C)
U: Transmitância	(W/m ² .K)
U_r: Umidade relativa do ar	(%)
V_s: Volume do solo	(m ³)
w: Teor de umidade	(%)
x, y, z: Coordenadas cartesianas	
Y_{paraf}: Densidade aparente da parafina	(g/cm ³)
β₀: Intercepto do plano de regressão	
λ: Comprimento de onda	(nm)
ρ: Densidade	(kg/m ³)
ρ_o: Densidade da água	(g/cm ³)
ρ_h: Densidade aparente natural da amostra	(g/cm ³)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	Objetivos.....	23
1.1.1	Objetivo Geral	23
1.1.2	Objetivos Específicos	23
1.2	Estrutura da dissertação	23
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	25
2.1	O solo	25
2.1.1	Composição do solo	25
2.1.2	Propriedades térmicas	26
2.1.2.1	Densidade.....	26
2.1.2.2	Condutividade Térmica.....	26
2.1.2.3	Calor Específico	28
2.1.3	Transmissão de calor no solo.....	29
2.1.3.1	Condução	30
2.1.3.2	Convecção	31
2.1.3.3	Radiação	33
2.1.3.4	Evaporação ou Condensação.....	33
2.1.4	Regime térmico do solo	34
2.1.4.1	O efeito do tratamento da superfície do solo no seu regime térmico 35	
2.1.4.2	A interação térmica entre o solo e a laje de piso	38
2.2	Simulação Computacional	39
2.2.1	Simulação computacional das trocas de calor entre o solo e a laje de pisos de edifícios.....	39
2.2.2	<i>EnergyPlus</i>	42
2.2.3	Pré-processador <i>Slab</i>	44

2.2.3.1	Método de cálculo do <i>Slab</i>	46
2.2.3.2	Descrição dos dados de entrada do <i>Slab</i>	49
2.2.3.3	Funcionamento do <i>Slab</i>	62
2.2.4	Incertezas na modelagem das trocas de calor entre a edificação e o solo	68
2.2.5	Normas e regulamentos	72
2.3	Considerações finais	74
3	METODOLOGIA	77
3.1	Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa <i>EnergyPlus</i>	77
3.1.1	Geometria e características construtivas do modelo	77
3.1.2	Ganhos internos	79
3.1.3	Clima	80
3.1.4	Modelagem da ventilação natural.....	80
3.1.5	Dados de entrada e variação das simulações	81
3.1.6	Forma de análise dos resultados	89
3.2	Procedimento experimental	91
3.2.1	Medições em célula-teste.....	91
3.2.2	Instalação dos sensores	98
3.3	Medições e simulação.....	102
3.3.1	Definição do modelo virtual	103
3.3.2	Simulações Paramétricas: dados de entrada	104
3.3.3	Simulações Paramétricas	105
3.3.4	Pós-processamento dos resultados das simulações	106
3.3.5	Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro	107
3.3.6	Análise de regressão	109
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	111

4.1	Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa <i>EnergyPlus</i>	111
4.1.1	Acionamento do <i>Slab</i> interna ou externamente ao EP	112
4.1.2	Uso ou não do <i>Slab</i> , com ou sem o procedimento de convergência	112
4.1.3	Influência dos dados de entrada do <i>Slab</i>	117
4.1.4	Influência das propriedades termofísicas do solo	121
4.1.5	Considerações finais.....	123
4.2	Medições em célula-teste.....	125
4.2.1	Considerações finais.....	134
4.3	Medições e simulação	136
4.3.1	Simulações Paramétricas: dados de entrada.....	136
4.3.2	Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro	138
4.3.3	Simulações paramétricas: análise de regressão	148
4.3.4	Considerações finais.....	152
5	CONCLUSÕES	155
5.1	Trabalhos Futuros.....	157
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	159
	APÊNDICE A – CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE TEMPERATURA	165
	APÊNDICE B – ABSORTÂNCIA SOLAR DA TINTA.....	171
	APÊNDICE C – MEDIÇÃO DO ALBEDO	175
	APÊNDICE D – CARACTERIZAÇÃO DO SOLO	179
	APÊNDICE E – MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO SOLO	189
	APÊNDICE F – MODELAGEM DO ARQUIVO CLIMÁTICO	195
	APÊNDICE G – MANUAL DO SLAB	201

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda de energia e a escassez de recursos energéticos associadas às questões ambientais, têm gerado muitas discussões e iniciativas com o propósito de se criar estratégias construtivas que visem à eficiência energética das edificações e proporcionem conforto aos usuários. Uma das principais funções da arquitetura é a de proporcionar aos usuários condições térmicas compatíveis ao conforto humano, possibilitando que os usuários possam realizar suas atividades no interior do ambiente construído, sejam quais forem as condições climáticas externas. Neste cenário, a avaliação do desempenho térmico de edificações adquire fundamental importância quanto às demandas futuras de energia e suas condições de conforto, para que possam atender às necessidades dos usuários ao longo do ciclo de vida das construções.

Uma das formas de avaliar o desempenho térmico de edifícios é através do método de simulação computacional. Essa é uma importante ferramenta de análise e avaliação, cujo uso tem crescido ao longo do tempo, por auxiliar na definição das melhores alternativas de projeto. A simulação permite avaliar a possibilidade de integração de diversas estratégias e fornece a resposta global da edificação às trocas de calor e de massa entre os ambientes interno e externo. Entretanto, as ferramentas de simulação são extremamente complexas, e possuem muitas variáveis de entrada e opções de modelagem. Geralmente, os programas apresentam valores de referência (*defaults*) baseados em características que se repetem para cada campo de entrada. Esses valores agilizam a entrada de dados, porém podem não condizer com a realidade (PEDRINI, 1997; TAMBURRINI; PALMER; MACDONALD, 2003; WESTPHAL; LAMBERTS, 2005). Dessa forma, a definição dessas variáveis muitas vezes fica sujeita à escolha do usuário, resultando em várias simplificações e gerando várias incertezas.

Pode-se citar como exemplo, a temperatura do solo e os métodos de cálculo das trocas de calor entre o piso e o solo. Estes aspectos possuem um impacto extremamente significativo nos resultados da simulação e no nível de

desempenho de edifícios (CHVATAL; MARQUES, 2016). Normalmente quando se pensa em projetar edificações sustentáveis com desempenho energético eficiente e conforto térmico adequado, preocupa-se mais com as condições climáticas e de temperatura acima do solo, desconsiderando a interação entre a edificação e o solo, questão essencial principalmente em edificações térreas. A interação entre o contato piso e solo é um aspecto importante que o projetista deve analisar quando se tem o objetivo de desenvolver edificações energeticamente eficientes (ZAKI et al., 2005).

As trocas de calor entre o piso e o solo são especialmente importantes em edificações de pequeno porte e residências, devido à inexistência de isolamento térmico na composição do piso dessa tipologia de construção e à sua grande influência no balanço térmico do edifício. No contexto brasileiro, essa questão assume grande relevância visto que o isolamento térmico não é normalmente utilizado na composição do piso das edificações. Observa-se que dependendo da escolha dos valores para a variável temperatura do solo, os níveis de desempenho obtidos apresentam uma grande diferença na sua classificação variando de desempenho superior à inferior ao mínimo, fato que vem causando incoerência nos estudos e análises de desempenho térmico (ANDOLSUN et al., 2011; LARSEN, 2011; SILVA et al., 2014; SORGATO et al., 2014; SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011).

O programa de simulação *EnergyPlus* (EERE, 2016a) possui vários métodos de cálculo das trocas de calor para simular essa interação. O *EnergyPlus* é um programa validado pela ASHRAE 140 (ASHRAE, 2014) e utilizado mundialmente para avaliar o desempenho termoenergético dos edifícios. Ao usar esse programa, o seu manual (EERE, 2016b) e o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Eficiência Energética para Edifícios Residenciais (RTQ-R, INMETRO, 2012) indicam a necessidade do uso de um programa adicional, o pré-processador *Slab* (EERE, 2016c), em simulações que haja contato entre o piso da edificação e o solo, para gerar resultados com maior precisão. Apesar dessa recomendação, ANDOLSUN et al. (2012) e LARSEN (2011) indicam que mesmo o *Slab* apresenta diversas opções para a inserção dos seus dados de entrada, e que há escassez de informações sobre quais estratégias adotar. Sendo

assim, ainda há muitas dúvidas em relação à forma de modelagem e aos valores dos dados de entrada a serem utilizados.

Dentro deste contexto se insere esta pesquisa, cujo principal enfoque é analisar as trocas de calor entre o piso e o solo de edificações térreas não condicionadas e sem isolamento térmico no piso, e sua modelagem no programa *EnergyPlus*, com ênfase na modelagem dos parâmetros do pré-processador *Slab*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

- O objetivo principal deste trabalho é identificar a forma mais adequada para a modelagem dos parâmetros relacionados às trocas de calor entre o piso e o solo em uma edificação térrea no programa de simulação de desempenho *EnergyPlus*, com o uso do pré-processador *Slab*.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar, por meio de medições *in loco* em célula-teste, a variação das temperaturas interna, externa e do solo, e como elas se relacionam, especialmente as temperaturas do solo e do piso;
- Investigar a sensibilidade dos resultados do *Slab* frente às alterações dos parâmetros de entrada e identificar para quais deles se deve ter mais atenção durante a modelagem do *Slab*;
- Desenvolver um manual do *Slab*, com indicação das suas principais características e forma de funcionamento.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente pesquisa é estruturada em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução sobre o assunto, contextualizando o problema estudado e descrevendo os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo expõe

a revisão da literatura sobre o solo e as trocas de calor entre ele e edificações térreas em simulações computacionais, com ênfase no pré-processador *Slab*. O terceiro capítulo trata da metodologia da pesquisa, descrevendo os testes de simulação para a verificação do impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo; também é descrito o procedimento experimental adotado para analisar a evolução das temperaturas na célula-teste, no solo e como elas se relacionam; e as análises comparativa e de correlação. No quarto capítulo são apresentados os resultados e as discussões de cada etapa da metodologia. O quinto e último capítulo expõe as conclusões, incluindo as sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O presente capítulo apresenta uma revisão da literatura abrangendo os principais tópicos que compreendem o tema da pesquisa. São exploradas informações a respeito do solo, sua composição, propriedades e regime térmico. Também é investigada a simulação computacional das trocas de calor entre o solo e a laje de piso de edificações, e por fim, são levantadas informações e questionamentos sobre o programa *Slab*.

2.1 O solo

Neste item são descritas as características do solo quanto a sua composição, propriedades térmicas, transmissão de calor e seu regime térmico. Paralelamente é explorada a relação de influência entre as suas características e seu regime térmico, além da sua interação com os ambientes externo e interno das edificações.

2.1.1 Composição do solo

O solo tem uma composição muito complexa e variável, resultado da interação e mistura não homogênea dos seus componentes, sendo composto por três frações físicas: os sólidos (a matriz do solo), os líquidos (a solução do solo) e os gases (o ar do solo). A matriz do solo é formada por sólidos de origem mineral e orgânica. A fração da solução do solo consiste de água com sais minerais e substâncias orgânicas dissolvidas. Já a composição da fração gasosa é aproximadamente igual à da atmosfera, porém, ela contém mais gás carbônico (CO_2) e menos oxigênio (O_2), além de apresentar uma umidade relativa sempre próxima a 100%. A proporção e a composição das três frações físicas do solo são propriedades que variam no tempo e no espaço, principalmente perto da superfície do solo, e são de grande importância para determinação do seu comportamento térmico (CRUZ, 2013; EIPHANIO et al., 1992; MACIEL NETO, 2011).

2.1.2 Propriedades térmicas

2.1.2.1 Densidade

A densidade do solo (ρ) é definida como a relação entre a massa de sólidos secos do solo e seu volume total. A estrutura, a umidade, a compactação, o manejo do solo, a profundidade e outras características inerentes do solo definem a sua densidade. Sua unidade é expressa em kg/m^3 , e representada na Equação 2.1. A Tabela 2.1 apresenta valores de referência para a densidade do solo.

Equação 2.1

$$\rho = \frac{M_s}{V_s}$$

Onde:

ρ – densidade (kg/m^3)

M_s – massa do solo seco (kg)

V_s – volume do solo (m^3)

Tabela 2.1 – Valores de referência para a densidade do solo

Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo orgânico (turfa) ¹
1600 – 2000 kg/m^3	1600 – 2000 kg/m^3	300 – 1100 kg/m^3

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

2.1.2.2 Condutividade Térmica

A condutividade térmica (k) expressa a capacidade do material em conduzir calor, e é por definição, o quociente entre a densidade de fluxo térmico e o gradiente de temperatura. Sua unidade é expressa em W/(m.K) , e representada pela Equação 2.2. A Tabela 2.2 apresenta valores de referência para a condutividade do solo.

¹ Solos com parte de sua composição de matéria orgânica, oriunda principalmente da decomposição de restos vegetais. É um solo poroso, muito explorado para uso agrícola, encontrado em áreas de clima frio.

Equação 2.2

$$k = \frac{q}{A \cdot (\Delta T/l)}$$

Onde:

q – fluxo de calor (W)

A – área da seção transversal (m²)

ΔT – gradiente de temperatura (K)

l – distância percorrida pelo calor (m)

k - condutividade térmica (W/m.K)

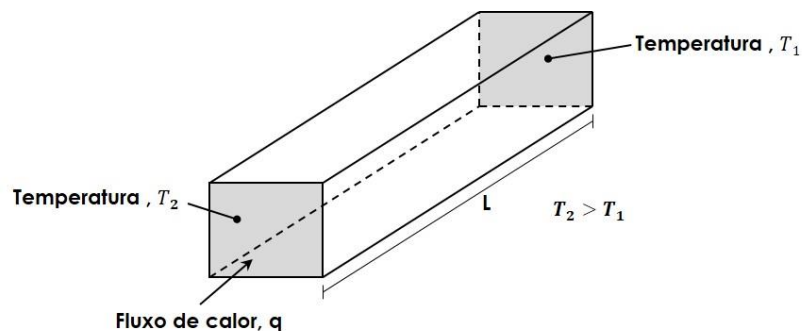
Tabela 2.2 – Valores de referência para a condutividade do solo

Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo turfa
0,30 – 2,20 W/m.K	0,25 – 1,58 W/m.K	0,06 – 0,50 W/m.K

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Segundo Prevedello e Armindo (2015), a condutividade térmica do solo é definida pela quantidade de energia transmitida na unidade de comprimento por unidade de tempo, quando a diferença de temperatura para esta distância é dada por unidade de área. A condutividade térmica do solo, considerando um elemento prismático composto por ele, é definida através da média das condutividades entre as duas seções transversais do elemento, pois ela varia em função da alteração de temperatura e de composição do solo entre essas seções, Figura 2.1 (FAROUKI, 1981).

Figura 2.1 - Fluxo de calor através de um elemento prismático do solo



Fonte: Adaptado de Farouki (1981).

2.1.2.3 Calor Específico

O calor específico do solo (C_p), também chamado de capacidade térmica mássica, consiste na quantidade de energia necessária para aumentar em 1°C a temperatura de 1g de solo. Sua unidade é expressa em J/(kg.K), e representada pela Equação 2.3. A Tabela 2.3 apresenta valores de referência para o calor específico do solo.

Equação 2.3

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Onde:

C_p – calor específico (J/kg.K)

Q – quantidade de calor (J)

m – massa (kg)

ΔT – variação da temperatura (K)

Tabela 2.3 – Valores de referência para o calor específico do solo

Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo turfa
800 – 1480 J/kg.K	890 – 1550 J/kg.K	1920 – 3650 J/kg.K

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Como o solo é um sistema multicomponente, o seu calor específico consiste na somatória do calor específico das frações que o constituem (sólida, líquida e gasosa). A oscilação da fração líquida do solo influencia de forma significativa o calor específico, aumentando-o consideravelmente com o incremento da umidade. O efeito da umidade no calor específico, depende do tipo de solo. Abu-Hamdeh (2003), ao investigar o efeito da umidade no calor específico de solos argilosos e arenosos, observou que o aumento da umidade provocou o aumento do calor específico em ambos os tipos de solos. Porém, o solo argiloso atingiu maiores valores de calor específico para as mesmas condições de umidade. Outro aspecto relevante é o

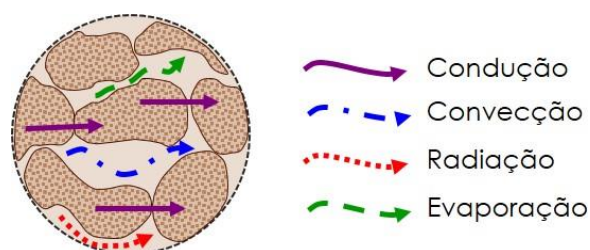
comportamento quase linear do calor específico de ambos os solos em relação à proporção de umidade, até 15% de teor de umidade. Acima desse valor, o calor específico aumenta mais rapidamente no solo argiloso do que no solo arenoso.

O calor específico do solo reflete a sua capacidade de atuar como reservatório de calor. Dessa forma, a variação de temperatura do solo em um determinado tempo depende do seu calor específico e da forma como o calor é transmitido (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

2.1.3 Transmissão de calor no solo

A transmissão de calor se dá basicamente por meio de quatro mecanismos distintos, podendo acontecer com ação simultânea ou isolada: condução, convecção, radiação e evaporação ou condensação (Figura 2.2). Segundo estudos teóricos e experimentais, a contribuição de cada mecanismo na transferência de calor no solo depende significativamente da sua granulometria², do teor de umidade e da variação de temperatura (FAROUKI, 1981; JOHANSEN, 1975). A temperatura do solo, por sua vez, varia de acordo com as trocas de calor realizadas, principalmente em sua superfície, as quais são influenciadas pelas propriedades do solo, tratamento da superfície e condições climáticas locais.

Figura 2.2 - Mecanismos de transmissão de calor no solo



Fonte: Autor

² Granulometria dos solos é a distribuição das dimensões dos grãos que o compõe.

É notório que o mecanismo responsável pela maior parte das trocas de calor no solo é a condução, devido ao contato entre as partículas. Os efeitos da convecção e radiação (no solo) são geralmente irrelevantes, exceto em algumas situações em que têm maior participação na transmissão de calor, por exemplo, em solos arenosos. A ação da evaporação também é pequena, com exceção de algumas situações em solos não saturados³ e na superfície do solo (FAROUKI, 1981).

2.1.3.1 Condução

Este fenômeno é o processo de transmissão de calor mais importante quando se trata de solos, principalmente em solos secos. Isso se deve ao fato das trocas de calor em solos secos acontecerem quase que exclusivamente por condução (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). A condução ocorre quando há transferência de calor de uma zona de temperatura superior para outra com temperatura inferior, em um mesmo corpo ou entre corpos diversos em íntimo contato, buscando o equilíbrio térmico. A condução térmica ocorre no interior do meio, através de colisões entre átomos e moléculas de uma substância e posteriormente a transferência de energia cinética. Esse mecanismo de transmissão se verifica em todos os constituintes do solo, nas partes sólida, líquida e gasosa, sendo que através desta última, a condução pode ser considerada desprezível (ALVES, 2014; FAROUKI, 1981; PESSÔA, 2006). Segundo Farouki (1981), solos com alto teor de umidade e alta densidade proporcionam maior contato entre as partículas sólidas aumentando a quantidade de calor transferida através da condução. A presença da água contribui para o incremento das trocas de calor do meio, criando um aumento efetivo da seção de contato entre as partículas do solo. Além disso, a água conduz melhor o calor do que o ar, favorecendo as trocas de calor entre as

³ A proporção da fase líquida nos poros dos solos pode ser parcial ou completa. Quando a proporção é parcial designam-se solos não saturados ou insaturados. No segundo caso, em que a fase líquida ocupa completamente os poros dos solos, designam-se saturados.

partículas sólidas do solo. A água, quando presente no solo, é adsorvida⁴ pelas partículas sólidas, envolvendo-as formando um filme. Ao se aumentar a proporção de água no meio, esse volume adicional dá origem a pontes de ligação entre as partículas, ampliando a seção de contato e conseqüentemente favorecendo as trocas entre elas, elevando a condutividade térmica rapidamente (Figura 2.3). Entretanto, quando o teor de umidade assume uma proporção muito grande, como em solos saturados, a água aumenta a distância entre as partículas sólidas, diminuindo as trocas de calor entre elas (FAROUKI, 1981; PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). Esse efeito de incremento da condutividade térmica do solo com o aumento do teor de umidade depende do tipo de solo e sua granulometria, pois solos com maior variação granulométrica conduzem melhor o calor. Em geral, os solos aumentam sua condutividade térmica significativamente com o incremento de baixos teores de umidade, isso se deve possivelmente às pontes de água formadas entre as partículas, aumentando sua área de contato (FAROUKI, 1981).

Figura 2.3 - Ação do teor de umidade no solo



Fonte: Autor

2.1.3.2 Convecção

A convecção ocorre quando os corpos estão em contato molecular e pelo menos um deles é um fluido. O processo possui duas fases: na primeira o calor

⁴ Adsorção é a adesão de moléculas de um fluido (o adsorvido), sendo este retido sobre sua superfície sólida.

se transmite por condução, na segunda, a alteração sofrida pela temperatura do fluido modifica sua densidade provocando o movimento convectivo. A convecção é o fluxo de calor devido a um movimento macroscópico, transportando as substâncias aquecidas, de um determinado elemento, de uma região de maior temperatura para uma região de menor temperatura. Nos solos o efeito desse mecanismo no seu comportamento térmico é normalmente desprezível, principalmente em solos secos. No entanto, em solos úmidos, o seu efeito é mais perceptível quando a convecção ocorre com mudança de fase do fluido, resultando em um expressivo aumento das trocas de calor (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015). Segundo Johansen (1975) o efeito da convecção pode ser verificado em solos arenosos ou areias saturadas, com alguma relevância, onde a baixa densidade permite um fluxo maior e mais rápido de líquidos e gases no solo.

A transmissão de calor por convecção pode ocorrer de duas formas distintas: natural e forçada. A convecção natural acontece sem ação de agentes externos. O movimento se dá pela diferença de densidade provocada pelo gradiente de temperatura, ocasionando a migração do fluido entre os vazios do solo. Os fluxos de mistura entre o fluido e as partículas, gerados pela convecção natural, também contribuem para as trocas de calor por condução (FAROUKI, 1981; JOHANSEN, 1975). Na convecção forçada, o movimento é provocado predominantemente pela ação de agentes externos, assim como diferenças de pressão (ALVES, 2014; PESSÔA, 2006). No solo, a convecção forçada pode ser associada, por exemplo, a fluxos de água subterrânea. Os fluxos de água provocam a movimentação dos fluidos entre os vazios do solo por diferenças de pressão, logo, o deslocamento do fluido no solo aumenta a transmissão de calor por efeito de dispersão (FAROUKI, 1981; JOHANSEN, 1975). Em solos com baixa densidade, esse fluxo de líquidos e gases é maior e mais rápido, favorecendo a convecção. Esse efeito pode aumentar a condutividade térmica de solos compostos por areia grossa (0,6 mm a 2,0 mm) em até 20% (JOHANSEN, 1975).

2.1.3.3 Radiação

A transmissão de calor por radiação ocorre através de ondas eletromagnéticas onde o calor é transmitido entre dois corpos em diferentes temperaturas, mesmo sem qualquer contato físico entre os mesmos (PESSÔA, 2006).

O sol é a principal fonte de energia térmica que chega à superfície terrestre. Essa energia, convertida em energia radiante, ao atravessar a atmosfera, é atenuada desde o topo até alcançar a superfície da Terra, sendo retida pelo solo em diferentes gradientes de temperatura conforme a profundidade e as propriedades da superfície receptora. A radiação solar global que incide no solo é o somatório de duas componentes, a radiação direta, transmitida pela atmosfera e que atinge diretamente a superfície do solo, e a radiação difusa, refletida pela atmosfera pelo processo de difusão atmosférica na direção do solo. A energia radiante, ao atingir uma superfície, é distribuída por meio de três processos distintos: reflexão, absorção e transmissão. A distribuição dessa energia radiante no solo depende principalmente da sua natureza (granulometria e composição), cor, umidade, inclinação e da rugosidade da superfície (BOWERS; HANKS, 1965; EIPHANIO et al., 1992). Bowers e Hanks (1965) observaram, com o auxílio do espectrofotômetro, que o teor de umidade tem forte influência na proporção de energia radiante solar refletida pela superfície do solo, sendo que a quantidade de energia refletida é reduzida com o aumento do teor de umidade do solo.

Já no interior do solo, a contribuição da radiação nas trocas de calor é geralmente insignificante. Seu efeito na transmissão de calor em areias é inferior a 1% do total transmitido, e em solos úmidos com alta densidade sua contribuição é praticamente nula (FAROUKI, 1981; JOHANSEN, 1975).

2.1.3.4 Evaporação ou Condensação

A evaporação é o fenômeno no qual um fluido faz a conversão do estado líquido para o estado gasoso. Esse fenômeno ocorre quando uma dada

substância adquire a energia necessária para vencer a tensão superficial e se converte em vapor, sem que o líquido passe pelo ponto de ebulição. A condensação consiste no processo inverso, ou seja, é a conversão de um fluido do estado gasoso para o estado líquido.

Nos solos, os mecanismos de evaporação e condensação podem influenciar de forma significativa nas trocas de calor e na distribuição de temperatura, sobretudo na superfície do solo. Sua contribuição na transmissão de calor é principalmente influenciada pelo teor de umidade e natureza do solo. Em solos não saturados, o aumento da temperatura em algumas regiões provoca a evaporação da água absorvendo o seu calor latente, e aumentando a pressão de vapor local. O vapor d'água, através da difusão, se transporta entre poros interligados para regiões de menor pressão, condensando-se nestas regiões. Durante esse processo, uma quantidade significativa de calor pode ser transferida por meio do calor latente liberado através da condensação (ALVES, 2014; FAROUKI, 1981; PESSÔA, 2006).

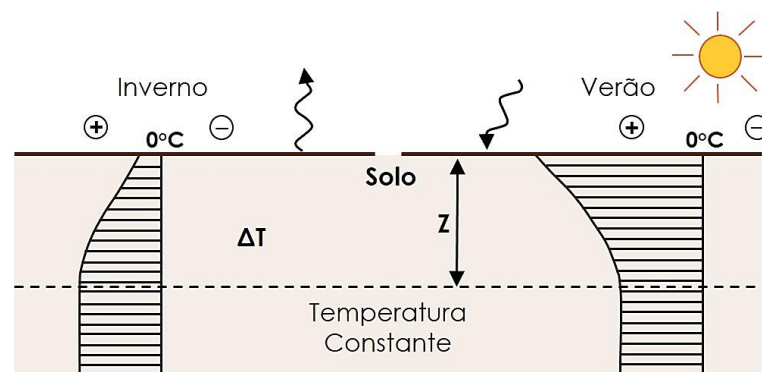
2.1.4 Regime térmico do solo

Para compreender o comportamento térmico do solo, faz-se necessária uma caracterização do seu tipo, sua composição e a definição das suas propriedades térmicas. O tipo e as características termofísicas do solo ditam o seu comportamento térmico e possibilitam a análise das trocas de calor realizadas entre o solo com a atmosfera e as edificações. A temperatura do solo varia de acordo com as trocas de calor realizadas, principalmente em sua superfície, as quais são influenciadas pelas propriedades do solo, cobertura da superfície e condições climáticas locais (MACIEL NETO, 2011).

O regime térmico do solo é determinado pelo aquecimento da sua superfície gerado pela radiação solar e transporte, por condução, de calor sensível para seu interior. A radiação solar, ao atingir a superfície terrestre, é absorvida pelo solo, gerando um fluxo de calor para o interior. Devido à sua grande massa, o solo demora a aquecer e a arrefecer, fenômeno denominado de inércia

térmica⁵. Porém, como as camadas superficiais são as primeiras a sofrer a variação de temperatura, essas são mais vulneráveis às alterações climáticas do ambiente, possuindo uma amplitude térmica maior do que as camadas mais profundas. À medida que se aumenta a profundidade do solo o efeito da inércia é cada vez maior, isto faz com que haja atraso térmico, ou seja, o fluxo de calor demora mais tempo para atingir as camadas mais profundas, ocasionando variações de temperatura cada vez menores até que o solo atinja o equilíbrio térmico (Figura 2.4). Em condições extremas de temperatura, como no verão e no inverno, apesar do solo sofrer diferentes variações de temperatura, ele mantém tendência de diminuir a variação de temperatura quanto maior a profundidade até uma temperatura constante. Esse comportamento pode ser observado independente da estação do ano. É importante destacar que esse gradiente de temperatura até o solo obter uma temperatura constante varia com a localização e o tipo de solo.

Figura 2.4 - Esquema representativo do regime térmico do solo



Fonte: Autor

2.1.4.1 O efeito do tratamento da superfície do solo no seu regime térmico

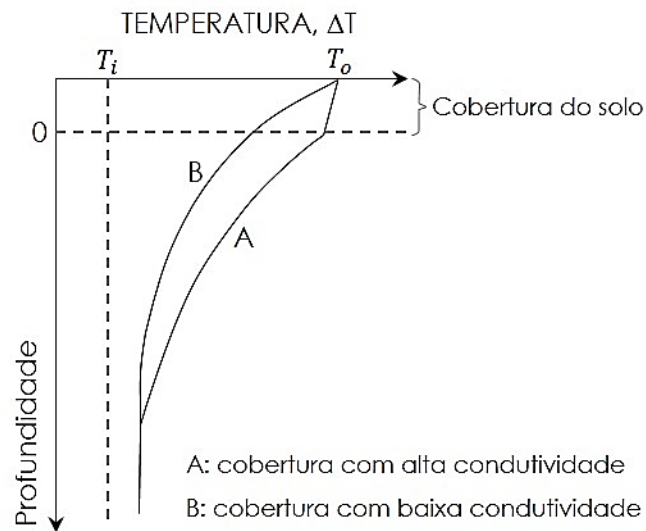
Além da influência das condições climáticas e das propriedades do solo, o tipo de tratamento presente na sua superfície também exerce forte influência no seu regime térmico. É na camada superficial onde ocorre a maior parte

⁵ Inércia térmica é a propriedade de um dado material em amortecer suas trocas de calor, ou seja, as variações de temperatura sofridas por este material.

das trocas de calor do solo, influenciando nos gradientes de temperatura em relação à profundidade até se atingir uma temperatura constante. As trocas de calor entre o solo e o ambiente dependem essencialmente do tipo de tratamento presente na superfície e suas características (propriedades térmicas, cor, umidade, rugosidade e espessura).

Em ambientes urbanos há uma grande variedade de tipos de tratamento para a superfície do solo, conferindo ao solo oscilações no seu comportamento térmico dependendo do local estudado. O comportamento térmico de diferentes tipos de tratamento pode variar muito, pois a variação da sua composição e conseqüentemente nas suas propriedades térmicas altera a proporção entre o calor armazenado e o transmitido para o interior do solo. A variação da condutividade térmica, por exemplo, influencia na temperatura superficial do tratamento e na quantidade de calor que é transferida para o interior do solo. Segundo Prevedello e Armino (2015), o tratamento da superfície, quando dotado de baixa condutividade, atua como isolante térmico. Nesse caso, a superfície sofre maiores variações de temperatura, porém com amplitudes de temperatura mais amenas no perfil do solo. Quando o tratamento possui alta condutividade térmica ocorre o inverso, pouca variação de temperatura na superfície e maior amplitude de temperatura no perfil do solo (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Perfis de temperatura em um solo coberto com materiais de alta e baixa condutividade térmica



Fonte: Adaptado de Prevedello e Armindo (2015).

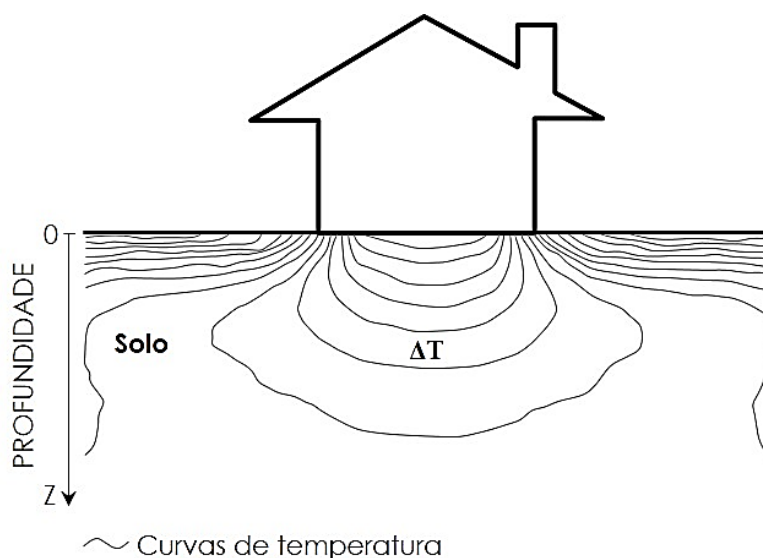
Materiais como asfalto e concreto, comumente utilizados em ambientes urbanos para o tratamento de calçadas e vias de trânsito, apresentam, em média, alta condutividade térmica e absorvem grande quantidade de calor. Já as coberturas naturais, solo nu e grama, absorvem o calor em menor quantidade e apresentam valores de temperatura superficial inferiores às coberturas artificiais (ALVES; VECCHIA, 2012). Dessa forma, pode-se prever que geralmente solos de ambientes urbanos tem amplitudes de temperaturas mais altas em relação às áreas rurais.

Além das propriedades inerentes ao tratamento, elementos como ar e água presentes na superfície do solo também têm papel importante no seu regime térmico. Tratamentos de material vegetal, por exemplo, devido à presença de ar entre suas folhas, podem atuar como isolantes térmicos e reduzir a amplitude térmica do solo nas camadas mais superficiais. Já a presença de água, além de modificar o coeficiente de reflexão da radiação solar do tratamento, contribui para as trocas de calor com o ambiente por evaporação.

2.1.4.2 A interação térmica entre o solo e a laje de piso

A presença de edificações sobre o solo também influencia de forma significativa o regime térmico do solo (Figura 2.6). Quando o solo está em condições normais, sem a influência de edificações ou outros agentes, solo denominado imperturbado, a sua distribuição de temperatura é apenas uma função da profundidade e do tempo (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). A implantação de edificações interfere no regime térmico inicial do solo, desde sua construção e até que o solo alcance um estado “quase estacionário⁶”. Essa interferência atinge profundidades consideráveis e torna suas trocas de calor ainda mais complexas (LARSEN, 2011). Edificações em contato com o solo trocam calor com ele através do piso e essas trocas têm forte influência do regime térmico do solo (BAHNFLETH, 1989). Além do impacto gerado no regime térmico do solo, esse fluxo de calor é um dos aspectos de maior influência no desempenho térmico e energético dessas edificações, em especial edificações térreas que não possuam isolamento térmico no piso.

Figura 2.6 - Influência do edifício no regime térmico do solo



Fonte: Autor

⁶ Um sistema alcança o estado estacionário quando este se encontra em equilíbrio termodinâmico, após passar por um período transiente.

Ao contrário do que ocorre em solos imperturbados, a temperatura do solo sob edificações térreas não se distribui de forma uniforme. A distribuição da temperatura em relação ao perfil do solo acontece de acordo a contribuição do piso nas trocas de calor, porém essa contribuição não é regular em toda a área do piso. Segundo Bahnfleth (1989), os fluxos de calor entre o piso e o solo não se distribuem de forma uniforme por toda superfície do piso, tendo uma maior participação do perímetro⁷. Esse fenômeno pode ser observado principalmente no inverno, em que ocorre uma maior diferença de temperatura entre os ambientes interno e externo. Já no período de verão a contribuição do perímetro e do núcleo do piso não são muito diferentes, resultando em uma distribuição mais uniforme da temperatura abaixo da edificação (BAHNFLETH, 1989).

2.2 Simulação Computacional

Neste item faz-se uma abordagem sobre simulação computacional das trocas térmicas entre o solo e a laje de piso de edificações. São apresentados os programas *EnergyPlus* e *Slab*, com ênfase na descrição do *Slab* e seus dados de entrada. Por último são apresentados trabalhos que discutem as incertezas do tema e do uso do *Slab*.

2.2.1 Simulação computacional das trocas de calor entre o solo e a laje de piso de edificações

A simulação computacional do desempenho térmico de edificações é uma análise complexa, que envolve um grande número de variáveis definidas por um regime dinâmico de trocas de calor e massa, entre os ambientes interno e externo. Os programas são extremamente complexos, e possuem muitas variáveis de entrada e opções de modelagem, as quais muitas vezes ficam sujeitas à escolha do usuário, sendo necessária prudência e conhecimento multidisciplinar em sua definição. A escolha e a variabilidade no valor das

⁷ Faixa de aproximadamente 1,5m de largura que contorna e delimita a área do piso.

variáveis de entrada da simulação, sob influência de diversos fatores, resultam em um modelo passível de inúmeras combinações para a mesma edificação. De forma que o modelo representativo da edificação real apresenta diferentes níveis de fidelidade e conseqüentemente inúmeros possíveis resultados. Pode-se citar como exemplo de incertezas, os parâmetros relacionados às trocas de calor entre a laje de piso e o solo quando ambos estão em contato.

A análise do comportamento térmico do solo por meio de simulação computacional é um tema de aplicação complexa. Os métodos de cálculo geralmente consideram as superfícies do modelo de forma unidimensional e isotérmica, em que teoricamente a temperatura na superfície se apresenta homogênea sob toda sua extensão. Essa forma de modelagem e cálculo das trocas de calor entre o solo e o edifício podem resultar em diferenças significativas na temperatura do ambiente interno e do solo se comparadas a condições reais. Isso ocorre devido a existência de muitos fatores multidimensionais que influenciam na transferência de calor com o solo (ADJALI; DAVIES; LITTLER, 1998). Segundo estudos, isso se deve, principalmente, à assimetria no perfil de temperatura do solo causado pela radiação solar direta na sua superfície e pela variação da composição do solo que está diretamente ligada ao seu regime térmico (ADJALI; DAVIES; LITTLER, 1998; SANTOS, 2003). Davies, Tindale e Littler (1995) atestaram a importância da modelagem multidimensional, em um estudo que compara as modelagens 1D, 2D e 3D, de um modelo do tipo laje de piso sobre o solo, sem isolamento no piso, no programa APACHE. Eles observaram divergências nas cargas de aquecimento anual do modelo de 22% entre as modelagens 2D e 3D e de 41% entre 1D e 3D. Santos (2003), comparou os três modos de modelagens (1D, 2D e 3D), por meio de simulação computacional utilizando um código próprio, em linguagem C. O objeto de estudo adotado foi um modelo de 25m² com o piso em contato com o solo, sem isolamento. As simulações foram realizadas com e sem radiação solar, o que indicou que as diferenças dos modos de modelagens são atribuídas, especialmente, à assimetria do impacto da radiação térmica no solo. Esses estudos mostram a necessidade das

modelagens das trocas de calor entre o edifício e o solo apresentarem métodos de cálculos que adotem a modelagem multidimensional fornece melhores resultados.

Além do aspecto multidimensional da modelagem, também existem diferentes métodos de cálculo para estimar a transferência de calor no solo. Atualmente, novas técnicas de simulação e pesquisas comparando diferentes métodos de cálculo vem sendo realizadas. Um exemplo dessa afirmação é o estudo de Santos e Mendes (2005), em que eles comparam os métodos de transferência pura de calor e o de transferência de calor acoplada com umidade de um modelo monozona de 25m², em contato com o solo através do piso. Em relação a temperatura do ar interna, os dois métodos não apresentaram diferenças significativas entre seus resultados. Porém, os autores afirmam que em edificações maiores ou com maior contato com o solo, a diferença entre os métodos pode ser mais expressiva. Quanto a taxa de umidade do ar interna foi observada uma diferença significativa, o método transferência de calor acoplada com umidade apresentou valores 15% superiores ao de transferência pura de calor. Esse resultado indica a relevância do método de transferência de calor acoplada com umidade, por exemplo, em estudos sobre a qualidade do ar interior e a durabilidade dos materiais de construção.

Outro aspecto que dificulta a integração dos cálculos de transferência de calor do solo em contato com a edificação, nas simulações, é a diferença entre as escalas de tempo dos parâmetros constituintes da simulação. Dessa forma, os programas de simulação utilizam métodos de diferentes níveis de complexidade (LARSEN, 2011). Devido à complexidade da interação entre edifício, solo e atmosfera, a modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo tem sido uma área tratada com pouca relevância nas análises de desempenho e durante as atualizações dos programas de simulação computacional termoenergéticos. A atenção para a transferência de calor na fundação não tem sido a mesma adotada aos outros componentes da

construção (ASHRAE, 2009a; BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004; KRARTI; CHUANGCHID; IHM, 2001).

2.2.2 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* (EP) (EERE, 2016b) é um programa de simulação computacional termoenergético, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos e validado pela ASHRAE 140 (ASHRAE, 2014). O EP foi criado a partir dos melhores recursos e características dos programas BLAST e DOE-2, programas de simulação numérica de desempenho energético e dimensionamento de sistemas de climatização. Diferente dos programas BLAST e DOE-2, que realizam simulações sequenciais, o EP realiza simulações mais dinâmicas em que todos os dados de entrada são integrados e os resultados mais realísticos (CRAWLEY et al., 2001). Esse programa tem a vantagem de ser gratuito e de apresentar todo o complexo modelo de cálculo utilizado, sendo alterado e revisado periodicamente. Porém é necessário que o usuário tenha conhecimento avançado para o uso adequado do programa, pois apesar de muito difundido, possui uma interface pouco amigável e não intuitiva, gerando resultados em tabelas sem nenhum processamento.

O EP permite selecionar vários métodos de cálculo e de entrada de dados para análise da interação do comportamento térmico de edificações em contato com solo. Uma das alternativas de modelagem dos parâmetros relacionados às trocas de calor entre a laje de piso e o solo é a entrada dos valores médios mensais da temperatura do solo diretamente dentro do *input data files* (*.idf) do EP, no objeto "*Site:GroundTemperature:BuildingSurface*". Porém, esse parâmetro é de difícil obtenção, e constitui uma grande fonte de incerteza. Papst (1999) e Venâncio (2007) sugerem como referência, para esse parâmetro, o uso das temperaturas médias mensais do ar presentes no arquivo climático. O manual do programa recomenda para obter-se resultados com maior exatidão, o uso dos pré-processadores *Slab* ou *Basement*, vinculados ao EP, para calcular as temperaturas do solo a serem utilizadas nas simulações de desempenho (EERE, 2016a). O pré-processador a ser selecionado para o

cálculo da temperatura do solo depende do tipo de construção apresentada pelo modelo em análise. O *Basement* é utilizado para configurações de construção em que haja porão, paredes em contato com o solo ou até mesmo edificações "enterradas". Já o *Slab* é aplicado para tipologias de construção laje de piso sobre o solo, o qual determina na envoltória da edificação a temperatura da face externa da laje de piso, em contato com o solo (CHEN, 2013).

O Regulamento Técnico Da Qualidade Para O Nível De Eficiência Energética Em Edificações Residenciais – RTQ-R (INMETRO, 2012) recomenda o uso do pré-processador *Slab* para obter-se melhores resultados nos cálculos da temperatura do solo. O *Slab* é um pré-processador instalado automaticamente junto ao EP, que calcula as temperaturas mensais do solo usando uma análise numérica 3D de edifícios com contato da laje de piso sobre o solo.

Além do *Slab*, recentemente, foi incorporado ao EP (a partir da versão 8.2) um novo objeto (*Site: Ground Domain*) com a mesma função do pré-processador. O *Site: Ground Domain: Slab* (GDomain) permite a modelagem de pisos múltiplos em contato com o solo para zonas térmicas distintas, inclusive com diferentes configurações. O GDomain faz parte do EP e se encontra na classe de objetos *Site: Ground Temperature*, dessa forma, quando acionado, é utilizado automaticamente pelo programa. Esse objeto adota o método de cálculo de diferenças finitas implícitas para gerar as temperaturas do solo (EERE, 2016b). Para efetuar os cálculos ele usa uma definição do *Undisturbed Ground Temperature* (temperatura do solo imperturbado), que pode ser baseado em três modelos distintos à escolha do usuário: *FiniteDifference* (XING, 2014), *KusudaAchenbach* (KUSUDA; ARCHENBACH, 1965) e *Xing* (XING, 2014) (MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015).

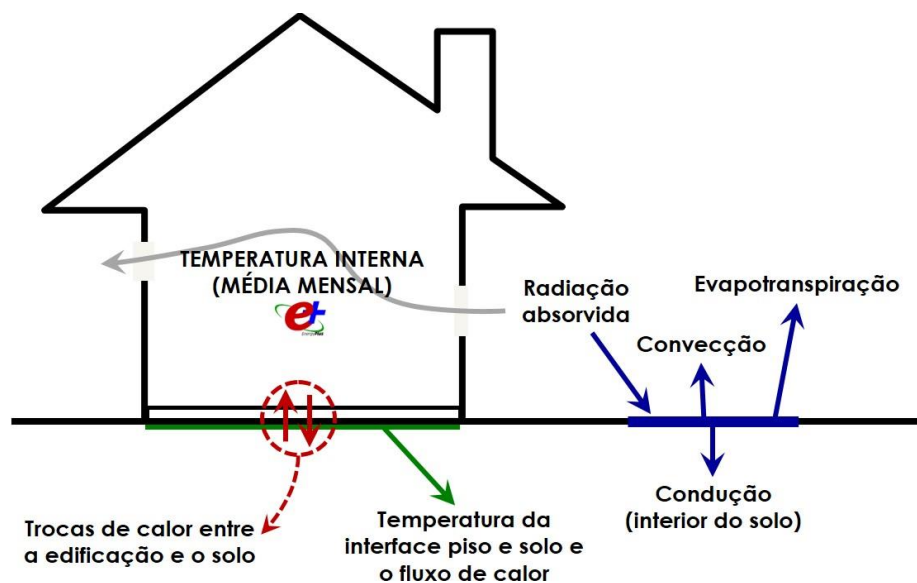
Neste trabalho foi selecionado o pré-processador *Slab* para as análises das trocas de calor de edificações em contato com o solo, tipo piso sobre solo. Na sequência é apresentada a descrição do pré-processador e as suas variadas opções de funcionamento.

2.2.3 Pré-processador *Slab*

O *Slab* baseia-se em um método de cálculo, estabelecido através de um estudo 3D detalhado realizado por Bahnfleth (1989), e depois modificado por Clements (2004). Nesse estudo, o fator de escala para o fluxo de calor médio para pavimentos retangulares e em forma de L é o quociente entre a área e o perímetro do piso. O método numérico utilizado é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional, fornecendo uma solução com grande flexibilidade e bem detalhada (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). O pré-processador foi desenvolvido com a intenção de melhorar as soluções numéricas de transferência de calor com o envelope da edificação de construções com terra acoplada, fornecendo uma solução mais flexível e detalhada do que a maioria de seus contemporâneos (CLEMENTS, 2004). A Figura 2.7 apresenta um esquema representativo das trocas de calor consideradas no método de cálculo adotado pelo pré-processador.

O *Slab* possui diferentes opções de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo, de entrada de dados, interação com o EP e de procedimentos de simulação, requerendo do usuário conhecimento prévio do funcionamento do programa. O usuário deve definir o volume de solo considerado nos cálculos, dados meteorológicos, propriedades do solo e piso, da superfície do solo, geometria do piso, a temperatura do solo à uma dada profundidade, a evapotranspiração na superfície do solo e a altura do edifício para os cálculos de sombreamento (ANDOLSUN et al., 2012; LARSEN, 2011).

Figura 2.7 - Esquema representativo das trocas de calor consideradas no método de cálculo do *Slab*



Fonte: Autor

Algumas das principais características do *Slab* são:

- A simulação emprega uma técnica de solução de diferenças finitas explícita;
- É fornecido um detalhado balanço de calor pela superfície, incluindo a radiação, convecção, condução, cobertura de neve, e evapotranspiração (Figura 2.7);
- Os valores das propriedades térmicas do solo e do material do piso podem ser definidos de forma independente;
- A dimensão do isolamento do perímetro pode ser definida na modelagem;
- É possível adotar isolamento vertical na fundação do piso;
- Os efeitos do sombreamento da construção no solo sobre a taxa de transferência de calor podem ser analisados;
- A simulação emprega escala de tempo em hora nos cálculos;
- O programa somente implementou modelos de pisos com formas retangulares;
- Inicialização automatizada do perfil de temperatura do solo imperturbado.

O *Slab* gera os seguintes dados nos arquivos de saída:

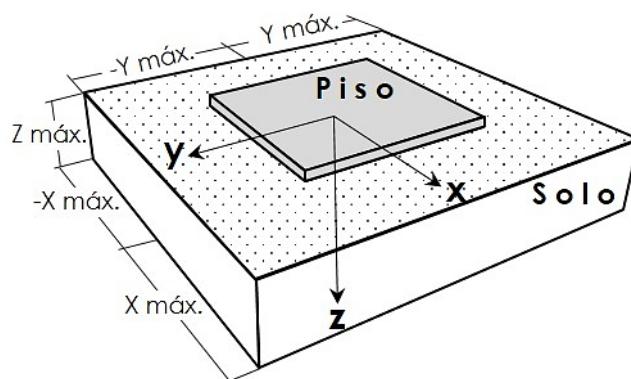
- Temperatura média mensal do núcleo, do perímetro e da interface piso/solo⁸ de toda área do piso;
- Fluxo de calor médio mensal nas superfícies do núcleo, do perímetro e da interface piso/solo de toda área do piso.

2.2.3.1 Método de cálculo do *Slab*

O método numérico para desenvolver os cálculos no programa é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional. Para a aplicação desse método é necessário definir uma representação do domínio físico avaliado por um domínio virtual composto por um número finito de células de parâmetros aglomerados. O domínio virtual é modelado no programa por meio de coordenadas cartesianas, com ponto de origem no centro geométrico da laje de piso do modelo simulado (Figura 2.8). Para que o método de cálculo possa ser aplicado, as células que compõem esse domínio devem ser pequenas o suficiente para que se possa assumir que suas propriedades são uniformes e que a variação de temperatura entre as células vizinhas é aproximadamente linear. Esse princípio da dimensão das células deve ser cumprido para que seja possível a aplicação da equação fundamental (equação de condução de calor ou equação de difusão de calor) - equação que regula o fluxo de calor do solo acoplado aos edifícios, Equação 2.4. A equação de condução de calor é aplicada sobre cada célula que compõe o domínio permitindo a solução através de um sistema mais simples de equações (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). O programa fornece ao usuário a opção de modelar o dimensionamento dessas células ou adotar a modelagem automática gerada durante a simulação.

⁸ A temperatura da interface piso/solo corresponde à temperatura da face externa da laje de piso. Esse valor é adotado como temperatura do solo no programa *EnergyPlus*.

Figura 2.8 - Definição do sistema de coordenadas do domínio virtual



Equação 2.4

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Onde:

 ρ – densidade (kg/m³) C_p - calor específico a pressão constante (J/kg.K)

T - temperatura (°C)

t - tempo (s)

x, y, z - coordenadas cartesianas

k - condutividade térmica (W/m.K)

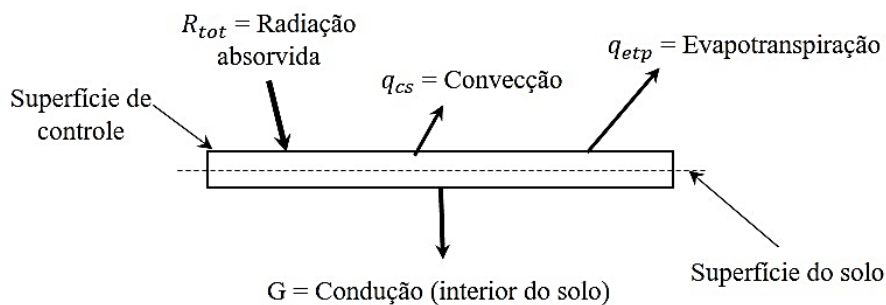
Outro princípio importante no cálculo de transferência de calor no *Slab* é o uso da condutividade térmica efetiva para as células do domínio. A condutividade térmica efetiva faz-se necessária devido ao fato do método de cálculo do *Slab* não permite a entrada de diferentes valores para a condutividade térmica do solo. Portanto, é necessário adotar um valor representativo da condutividade térmica para o domínio considerado. Além disso, o uso de diferentes valores de condutividade térmica ocasionaria diferentes fluxos de calor nas faces de uma célula em relação as faces das células vizinhas gerando cálculos incorretos. A condutividade térmica efetiva possibilita realizar o balanço de energia das células e suas células vizinhas, garantindo a conservação de energia no cálculo (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH, W.; AMBER, J, 1990; CLEMENTS, 2004). Mais detalhes sobre o uso e

aplicação da condutividade térmica efetiva nos cálculos de transferência de calor são descritos no trabalho de Bahnfleth (1989).

Os cálculos aplicados na simulação de transferência de calor da laje de piso sobre solo envolvem condições de contorno que englobam todo o complexo sistema de trocas de calor do modelo: a superfície do solo, o solo profundo, limites de campo distante e limites internos (interior da zona térmica).

A condição limite mais complexa nos cálculos de trocas de calor do modelo piso sobre solo é a superfície do solo. A complexidade nos cálculos de troca de calor na superfície do solo em contato com o ambiente externo se deve à uma variedade de mecanismos de transmissão de calor envolvidos no seu balanço térmico. Na Figura 2.9 são apresentados todos os mecanismos presentes no balanço térmico da superfície do solo de forma esquemática (CLEMENTS, 2004).

Figura 2.9 - Balanço térmico da superfície do solo



Fonte: Adaptado de Bahnfleth (1989).

O balanço térmico da superfície do solo apresentado na Figura 2.9, é matematicamente definido pela Equação 2.5, onde a condução de calor é igual à radiação absorvida menos a convecção e a evapotranspiração.

Equação 2.5

$$G = R_{tot} - q_{cs} - q_{etp}$$

Fonte: Bahnfleth (1989).

Onde:

G - taxa de condução de calor no solo (W/m²)

R_{tot} - saldo de radiação absorvida (W/m²)

q_{cs} - convecção sensível (W/m^2)

q_{etp} – potencial de evapotranspiração (W/m^2)

A condição limite do solo profundo consiste nas condições de fluxo de calor na profundidade máxima do solo considerada nos cálculos. Dependendo do nível e presença de lençóis freáticos no solo, essa condição limite pode ser considerada como zero fluxo de calor ou em condições de temperatura constante (CLEMENTS, 2004). A condição limite zero fluxo considera que não há variação de temperatura no solo em relação a profundidade, ou seja, assume uma temperatura única para o solo. Alguns pesquisadores afirmam que na presença do lençol freático próximo à superfície do solo, a condição deve considerar uma temperatura constante, porém esta afirmação tem sido desacreditada pois a localização do lençol freático varia com o tempo e o espaço (BAHNFLETH, 1989).

Os limites de campo distante representam as condições de troca de calor e temperatura do solo longe da edificação. Como dito anteriormente (item 2.1.4.2 “A interação térmica entre o solo e a laje de piso”), o perfil do solo imperturbado se difere do solo sob a edificação, por variar apenas em função do tempo e da profundidade.

Por último, a condição limite interior que representa o limite interior da zona térmica (superfície do piso) é conduzida pelas trocas de calor geradas pelos mecanismos de transmissão de calor por convecção e radiação térmica combinados (CLEMENTS, 2004).

2.2.3.2 Descrição dos dados de entrada do *Slab*

Os parâmetros de entrada do *Slab* podem ser inseridos no interior do arquivo de entrada do EP ou em um arquivo de entrada do *Slab*. Independente do procedimento de simulação, são inseridos em seis classes. Quando os parâmetros de entrada são inseridos no interior do arquivo de entrada do EP, essas classes podem ser identificadas pelo prefixo “*Ground Heat Transfer: Slab*”. Cada classe possui uma série de campos de entrada, os quais solicitam

dados referentes às características da edificação e do solo, e às condições de funcionamento do próprio programa. O *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a) e o *EnergyPlus University Course Teaching Material* (GARD ANALYTICS, 2003) apresentam instruções básicas de uso do programa e a descrição de suas variáveis de entrada e de saída.

Os campos de entrada de dados do *Slab* são descritos a seguir, com os seus valores de referência fornecidos pelo programa e seu manual, além disso, no final desta seção é apresentada uma tabela resumo, Tabela 2.7, com os valores de referência (EERE, 2016a, 2016b). São indicadas também algumas recomendações e observações com base na literatura.

l) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: Materials*

a) *NMAT: Number of materials:*

Número de materiais diferentes usados no modelo, ou seja, se refere aos materiais do piso da edificação e ao solo. O número de materiais não é limitado neste campo. O manual do EP, ao descrever esse campo de entrada, menciona que usualmente é adotado o valor 2, correspondente ao piso e ao solo. (EERE, 2016a). Efetivamente, não é possível inserir mais do que dois materiais, pois nos campos a seguir (referentes as propriedades desses materiais) há espaço somente para dois materiais distintos.

b) *ALBEDO: Surface Albedo: No Snow* e *ALBEDO: Surface Albedo: Snow*

Especifica o valor do albedo da superfície do solo dentro do domínio horizontal, para dias sem ou com cobertura de neve. Segundo Li et al (2013) o albedo (refletividade solar) é uma característica térmica importante dos materiais, que indica o potencial de uma superfície de reflexão solar. É a razão entre quantidade de radiação solar refletida e a quantidade de radiação solar incidente na superfície. O albedo varia em uma escala de 0 a 1, sendo que 0 significa que a superfície não pode refletir (absorve 100% da radiação solar) e 1 significa 100% de reflexão da radiação solar (Tabela 2.4). O *Slab* fornece dois valores de referência, de 0,05 para asfalto e 0,95

para a neve fresca baseados em dados de Bahnfleth (1989) para a América do Norte.

Tabela 2.4 - Variação do albedo das superfícies

SUPERFÍCIE		Albedo
Desertos		0,20 – 0,45
Neve		0,30 – 0,40
Solos	Escuro e úmido	0,05
	Claro e seco	0,40
Grama	Alta (1m)	0,16
	Baixa (0,02m)	0,26

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

c) EP_{SLW}: *Surface Emissivity: No Snow* e EP_{SLW}: *Surface Emissivity: Snow*

Este campo especifica a emissividade (térmica) da superfície do solo, sem ou com neve. Emissividade térmica é uma propriedade da superfície de um dado material que caracteriza a sua capacidade de emitir e absorver radiação térmica. Em outras palavras, é a razão entre a energia radiante emitida pela superfície e a emissão máxima teórica de um corpo negro ideal nas mesmas condições de temperatura, geometria e espectro. A emissividade influencia na temperatura e na transferência de calor através das superfícies, variando em uma escala de 0 a 1 (HONNER et al., 2016; OKE, 1987; PINI et al., 2016). Segundo Oke (1987), para superfícies naturais, a emissividade geralmente se encontra próxima a 1 (Tabela 2.5), porém, desprezar a sua variação pode resultar em um impacto de até 1°C na temperatura da maioria das superfícies. O manual do programa fornece o valor de referência 0,95 para os dois casos: com neve e sem neve (EERE, 2016a).

Tabela 2.5 - Variação da emissividade das superfícies

SUPERFÍCIE		EMISSIVIDADE
Asfalto (vias urbanas)		0,95
Desertos		0,84 – 0,91
Neve		0,82 – 0,99
Solos	Escuro e úmido	0,98
	Claro e seco	0,90
Gramma	Alta (1m)	0,90
	Baixa (0,02m)	0,95

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

d) Z0: Surface Roughness: No Snow e Z0: Surface Roughness: Snow (cm)

A rugosidade da superfície se refere à camada limite superior do domínio vertical, que é a superfície do domínio horizontal presente no entorno da edificação, ou seja, a cobertura do solo. Para estes campos de entrada é considerada a superfície sem ou com a presença de neve. Segundo Sellers (1965) a rugosidade pode ser tão suave a ponto de medir apenas um milímetro ou possuir dimensões maiores que dois metros de altura, como em áreas florestais. Esse dado é utilizado para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do solo e o ar. Porém, apesar dessa altura da rugosidade (z_0) ser muito próxima à altura real da cobertura do solo, esta rugosidade especifica a altura em que a velocidade (medida experimentalmente) de um perfil do vento vai a zero, ou seja é a rugosidade aerodinâmica da superfície (BAHNFLETH, 1989; OKE, 1987). Os valores fornecidos pelo manual do programa são 0,75 cm e 0,05 cm para cobertura sem neve e com neve, respectivamente, porém o valor de referência no programa é de 0,25 cm para situações com neve. (EERE, 2016a). A Tabela 2.6 apresenta valores de referência para a rugosidade de diferentes superfícies.

Tabela 2.6 - Variação da rugosidade das superfícies

SUPERFÍCIE		RUGOSIDADE (cm)
Solo		0,1 - 1
Areia (deserto)		0,03
Grama	2 - 10cm	0,3 - 1
	25 - 100cm	4 - 10

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

e) HIN: *Indoor Hconv. Downward Flow* e HIN: *Indoor Hconv. Upward* (W/m².K)

Especifica o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação combinadas entre a superfície superior do piso no interior do edifício e o ar da zona térmica. O calor pode fluir verticalmente nos dois sentidos, e o programa, durante a simulação, alterna entre os coeficientes usados se o sentido do fluxo de calor muda de direção. O manual e a descrição do campo de entrada no programa fornecem os valores de referência encontrados na *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Segundo a (ASHRAE, 2009b), os valores fornecidos na *ASHRAE Handbook of Fundamentals* para o coeficiente de transferência de calor variam com o sentido do fluxo, o movimento do ar e a emissividade da superfície. Para ambientes internos sem movimentação do ar e superfícies não refletivas com $\varepsilon = 0.90$, o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação com fluxo vertical varia de 6,13 W/(m².K), com fluxo descendente, a 9,26 W/(m².K), com fluxo ascendente (ASHRAE, 2009b).

II) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps*

a) RHO: *Slab Material density*(kg/m³)

O piso da edificação constitui o fechamento onde ocorre a transferência de calor entre o solo e o interior do ambiente construído. Dessa forma, as suas propriedades térmicas são de fundamental importância para os cálculos de troca de calor entre o solo, o piso e ambiente interno. Este campo especifica a densidade do material que compõe o piso. O

programa *Slab* sugere o valor de referência de 2300 kg/m³.

b) RHO: Soil Density(kg/m³)

Especifica a densidade do solo. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1200 kg/m³.

c) CP: Slab CP (J/kg.K)

Especifica o calor específico do piso. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 650 J/kg.K.

d) CP: Soil CP (J/kg.K)

Especifica o calor específico do solo. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1200 J/kg.K.

e) TCON: Slab k (W/m.K)

Especifica a condutividade térmica da laje. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 0,9 W/m.K.

f) TCON: Soil k (W/m.K)

Especifica a condutividade térmica do solo. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1 W/m.K.

III) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds*

a) EVTR: Is surface evapotranspiration modeled

Especifica se a evapotranspiração será ou não considerada na simulação. A evapotranspiração compreende todos os processos de perda de calor latente na superfície do solo, incluindo a evaporação, convecção e transpiração pela vegetação (BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). O programa permite duas opções para esse campo de entrada, "true" para ativar a evapotranspiração e "false" para desativá-la (EERE, 2016a). Quando ativo, assume-se que essa opção tende a acentuar os efeitos da troca de calor latente nos cálculos. Isso acontece porque é utilizada a evapotranspiração potencial (situação em que a superfície do solo está saturada). A taxa de evapotranspiração potencial é teórica e se baseia nas condições

meteorológicas (radiação incidente, velocidade do vento, temperatura do ar e taxa de umidade) (BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). O uso da evapotranspiração no cálculo de transferência de calor apresenta maior influência nos resultados em climas quentes e secos, especialmente na temperatura superficial do solo. Um exemplo dessa afirmação é o estudo de BAHNFLETH (1989), em que ele faz a comparação do método de cálculo com a evapotranspiração ativada e desativada, em diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que os casos em que ela estava desativada, as temperaturas médias da superfície do solo eram superiores às temperaturas médias do ar, entre 1 a 4°C, e a amplitude das temperaturas da superfície do solo foram mais elevadas que a amplitude da temperatura do ar. O contrário ocorreu nos casos ativos, onde as temperaturas médias da superfície do solo foram inferiores às médias do ar, chegando a até 10°C de diferença. As maiores diferenças entre o uso da evapotranspiração potencial foram apresentadas no clima quente e seco.

b) FIXBC: *is the lower boundary at a fixed temperature*

Permite definir se o modelo irá utilizar uma temperatura fixa ou condição de zero fluxo de calor para o limite inferior do domínio vertical. O campo possui duas opções de entrada, "true" para temperatura fixa e "false" para fluxo zero. Quando definida a condição de temperatura fixa, o programa calcula o perfil de temperatura não perturbado e esse valor é utilizado na profundidade limite do domínio do modelo (EERE, 2016a). A alteração da condição limite inferior do domínio isoladamente tem pouca influência nos resultados (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). Alguns pesquisadores afirmam que a definição deste parâmetro deve ser baseada na presença e distância de lençóis freáticos no domínio do modelo, já que a taxa de umidade tem significativa influência na condutividade térmica do solo (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). Porém, segundo Clements (2004), essa teoria vem sendo desacreditada, pois a profundidade do lençol freático flutua com o tempo e a localização, dessa forma ele não atua como um limite de temperatura constante, mas como

uma superfície de solo que tem variação em sua condutividade térmica. A comparação entre o uso de ambas as condições limite inferiores do domínio mostra que a diferença entre as taxas de transferência de calor para a temperatura fixa e o zero fluxo depende da relação área/perímetro e da profundidade adotada para o domínio vertical. O efeito das condições limite inferiores varia com a taxa de transferência de calor, o efeito aumenta com o crescimento dessa taxa. A relação área/perímetro, por sua vez, influencia nas taxas de transferência de calor pelo piso (quanto menor a relação, maior a taxa de transferência de calor e o contrário ocorre quanto menor for essa relação). Conseqüentemente, a sensibilidade da edificação a condição limite inferior também varia com essa relação, no mesmo sentido que a transferência de calor (BAHNFLETH, 1989). Quanto menor a profundidade do domínio vertical mais significativo é o efeito de uma dada alteração das condições limite inferiores.

c) TDEEPin (°C)

Esse campo de entrada está relacionado ao campo anterior "*FIXBC: is the lower boundary at a fixed temperature*". Aqui é definida a temperatura fixa para a condição limite inferior do domínio vertical do modelo elaborado, se for selecionada a opção "*true*" para o campo anterior. Se a opção selecionada for "*false*" o campo deverá ser deixado em branco, o que significa que o *Slab* irá calcular o perfil de temperatura não perturbada a ser usado na condição limite inferior do domínio vertical.

d) USRHflag: *is the ground surface h specified by the use*

Permite a opção de definir um coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo ou não. Para situações em que se escolhe não definir um coeficiente, é inserido nesse campo a opção "*false*", e o programa então irá calcular o coeficiente de transferência de calor baseando-se nas condições meteorológicas disponíveis. Se for inserida no campo a opção "*true*", significa que o usuário deverá definir um coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo.

e) USRH: *User specified ground surface heat transfer coefficient*

Define-se o coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo, se o campo anterior estiver com a opção “true”, caso contrário o campo deve ser deixado em branco.

IV) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps*

a) IYRS: *Number of years to iterate*

Este campo define o número de anos que será utilizado para se obter os resultados, através de processos iterativos. Quanto maior o número de anos, maior a precisão do resultado da simulação. Segundo o *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a), o valor de 10 anos como referência, fornecido pelo programa, é satisfatório para que se obtenha resultados confiáveis. É importante destacar que nos primeiros anos de operação da edificação o comportamento térmico do solo passa por mudanças, sendo necessário vários anos para que o perfil perturbado mude para o perfil imperturbado sob um edifício (EERE, 2016a).

b) *Shape: Slab shape*

Especifica o formato do piso, porém só a forma retangular está implementada podendo-se inserir somente o valor zero nesse campo. A limitação do formato retangular se deve à simplificação da geometria para auxiliar na modelagem da transferência de calor. Formas retangulares e quadradas são mais fáceis de modelar, e os resultados desse modelo simplificado podem ser aplicados para geometrias mais complexas, porém há de se assumir possíveis limitações na aplicação e exatidão no resultado (CLEMENTS, 2004). Apesar da limitação da forma, segundo Bahnfleth (1989) em sua pesquisa quando comparados pisos em formato retangular e na forma de “L”, a relação área/perímetro parece ter maior influência sobre as trocas de calor do piso do que a variação da forma isoladamente.

c) HBLDG: *Building height (m)*

Especifica a altura da edificação para que o programa calcule o sombreamento sobre o solo causado pelo próprio edifício. As condições climáticas têm grande influência na magnitude do efeito deste parâmetro. Estudos comparativos mostraram que o uso do sombreamento sobre o solo, pode resultar em uma variação de mais de 20% nas taxas de transferência de calor da laje de piso, em climas com alto potencial de evapotranspiração. Por outro lado, a variação da orientação da edificação resultou em valores idênticos (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990).

d) TIN (*January – December Indoor Average Temperature Setpoint (°C)*)

Os doze campos presentes correspondem às temperaturas médias mensais internas do ar da edificação para cada mês do ano. Esses valores influenciam diretamente nas trocas de calor entre o ambiente interno e o solo. Para obtê-los é necessário realizar uma simulação preliminar que fornecerá uma primeira estimativa da temperatura interna do ar da edificação (média mensal). Em edificações multizonas esse valor médio é obtido por meio de uma média ponderada das temperaturas médias de cada zona térmica.

e) TINamp: *Daily Indoor sine wave variation amplitude*

Este campo possibilita impor uma variação sinusoidal diária na temperatura interna da edificação. O valor definido corresponde à amplitude da onda senoidal. Esse valor é obtido por meio de uma simulação preliminar, a qual fornece a variação de temperatura diária da edificação. Através dos valores máximo e mínimo de temperatura de cada dia do ano encontram-se as amplitudes diárias. A amplitude da variação da onda senoidal interna diária corresponde à média das amplitudes diárias de todos os dias do ano. O programa sugere como valor de referência 0 (sem variação diária na temperatura interna).

f) ConvTol: *Convergence Tolerance (°C)*

A tolerância de convergência é definida para controlar o processo iterativo. A iteração ocorre até que a diferença de temperatura das últimas iterações, seja menor do que o valor de tolerância definido, obtendo-se assim os resultados finais. O programa sugere como valor de referência 0,1°C.

V) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: Insulation*

a) RINS: *R value of under slab insulation*

Especifica o valor da resistência térmica do isolamento horizontal presente logo abaixo da laje. Caso o isolamento vertical estiver selecionado, esse campo deverá ser deixado em branco ou inserido o valor zero. Apesar de haver a possibilidade de adicionar duas tipologias de isolamento, as duas opções não podem estar ativas juntas (horizontal e vertical).

b) DINS: *Width of strip of under slab insulation*

Define-se a dimensão em metros da largura da faixa de isolamento do perímetro abaixo do piso. Novamente se o isolamento vertical estiver selecionado, esse campo deverá ser deixado em branco ou com o valor zero.

c) RVINS: *R value of vertical insulation*

Este campo especifica a resistência térmica do isolamento vertical presente nas bordas do piso atingindo a profundidade definida no campo “ZVINS: *Depth of vertical insulation*”. Este campo deverá ser deixado em branco ou inserir-se o valor 0, caso o isolamento horizontal, abaixo do piso, estiver selecionado.

d) ZVINS: *Depth of vertical insulation*

Define a profundidade do isolamento vertical, a partir do piso até o término do isolamento. Se o isolamento horizontal estiver sendo usado, ou seja, o

isolamento vertical não estiver ativo o campo deverá ser deixado em branco ou com o valor zero.

e) IVINS: *Flag is there vertical insulation*

Especifica se o isolamento vertical está ativo ou não. O campo oferece duas opções, 1 para ativo e zero para desativado.

VI) Classe: *Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab*

a) APRatio: *The area to perimeter ratio for this slab (m)*

Este campo fornece a relação área/ perímetro do piso da edificação avaliada. Através da proporção área/perímetro o *Slab* cria um piso equivalente e o separa em área de núcleo e área do perímetro, de acordo com as dimensões do piso, podendo assim realizar os cálculos de transferência de calor para cada área separadamente (LARSEN, 2011). A proporção área/perímetro se relaciona diretamente com o fluxo de calor médio em pisos com formatos retangulares e em forma de "L". Quanto maior sua proporção, maior a contribuição do núcleo no fluxo de calor no piso. É esperado que a área do perímetro tenha maior fluxo de calor do que o apresentado na área do núcleo (BAHNFLETH, 1989). O programa *Slab* não permite a inserção de valores inferiores a 1,5m e maiores que 22m.

b) SLABDEPTH: *Thickness of slab on grade (m)*

Define a espessura do piso, a qual deverá ser de até 0,25m. É necessário que a superfície inferior da camada do piso esteja no mesmo nível da superfície externa do solo. Segundo o *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a), pisos demasiadamente espessos interferem na precisão dos resultados dos cálculos.

c) CLEARANCE: *Distance from edge of slab to domain edge (m)*

Este campo especifica a dimensão do domínio horizontal do modelo elaborado. O domínio é à distância da borda da área do modelo até o

centro geométrico do piso. Essa distância é usada para definir a extensão horizontal do domínio.

d) ZCLEARANCE: *Distance from bottom of slab to domain bottom (m)*

Especifica a dimensão do domínio vertical do modelo, ou seja, é a distância vertical entre o piso até o limite inferior da área modelada como domínio. É a dimensão usada para definir a dimensão vertical do domínio.

A Tabela 2.7 apresenta um resumo dos dados de entrada do *Slab* e seus valores de referência (*defaults*) fornecidos pelo pré-processador e seu manual (EERE, 2016b, 2016c)

Tabela 2.7 - Campos de entrada do *Slab* “**continua**”

Classes	Campos de entrada	Valores de referência (defaults)
I) Ground Heat Transfer: Slab: Materials:	NMAT: Number of materials	-
	ALBEDO: Surface Albedo: No Snow	0,16
	ALBEDO: Surface Albedo: Snow	0,4
	EPSLW: Surface Emissivity: No Snow	0,94
	EPSLW: Surface Emissivity: Snow	0,86
	Z0: Surface Roughness: No Snow (cm)	0,75
	Z0: Surface Roughness: Snow (cm)	0,25
	HIN: Indoor Hconv. Downward Flow (W/m ² .K)	6,13
HIN: Indoor Hconv. Upward (W/m ² .K)	9,26	
II) Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps	RHO: Slab Material density (kg/m ³)	2300
	RHO: Soil Density (kg/m ³)	1200
	CP: Slab CP (J/kg.K)	650
	CP: Soil CP (J/kg.K)	1200
	TCON: Slab k (W/m.K)	0,9
	TCON: Soil k (W/m.K)	1
III) Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds	EVTR: Is surface evapotranspiration modeled	TRUE ou FALSE
	FIXBC: is the lower boundary at a fixed temperature	TRUE ou FALSE
	TDEEPin (°C)	-
	USRHflag: is the ground surface h specified by the use	TRUE ou FALSE
	USRH: User specified ground surface heat transfer coefficient (W/m ² .K)	-

Fonte: EERE (2016).

Tabela 2.7 - Campos de entrada do *Slab* “conclusão”

Classes	Campos de entrada	Valores de referência (defaults)
IV) Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps	IYRS: Number of years to iterate	10
	Shape: Slab shape	0
	HBLDG: Building height (m)	-
	TIN (January – December) Indoor Average Temperature Setpoint (°C)	22
	TINamp: Daily Indoor sine wave variation amplitude	0
	ConvTol: Convergence Tolerance	0,1
V) Ground Heat Transfer: Slab: Insulation	RINS: R value of under slab insulation (m ² .K/W)	0
	DINS: Width of strip of under slab insulation (m)	0
	RVINS: R value of vertical insulation (m ² .K/W)	0
	ZVINS: Depth of vertical insulation (m)	0
	IVINS: Flag is there vertical insulation	0 ou 1

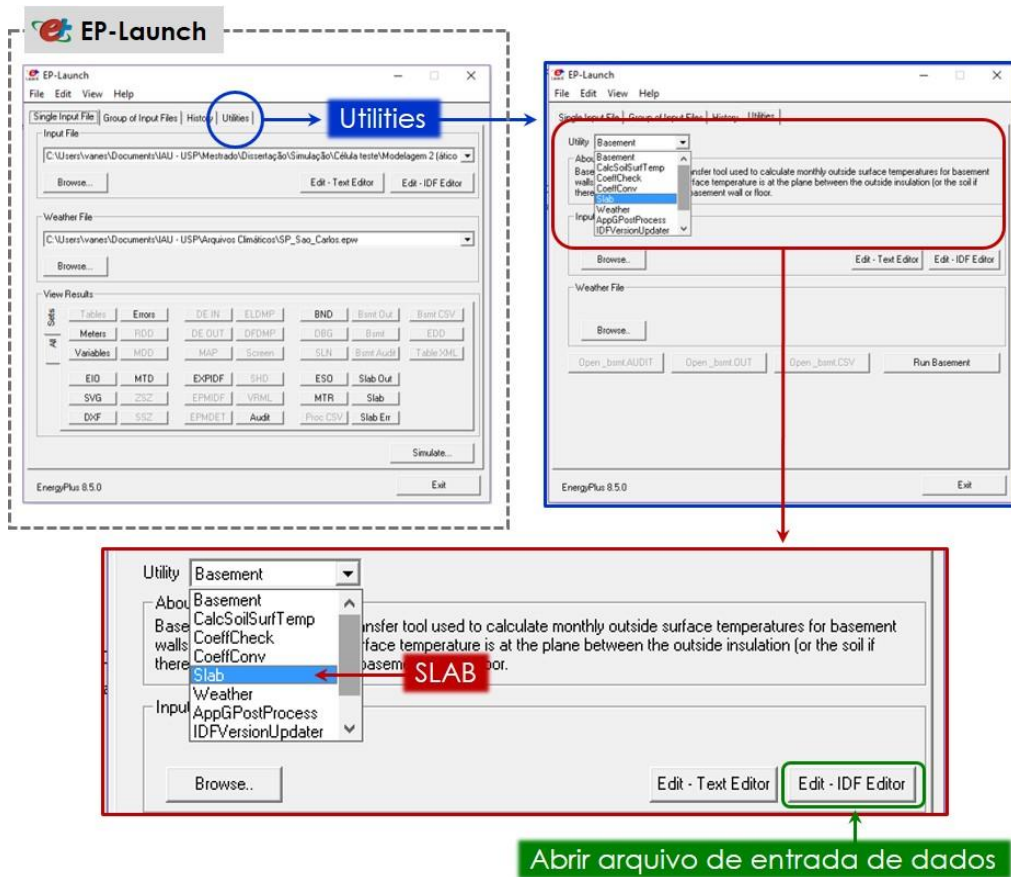
Fonte: EERE (2016).

2.2.3.3 Funcionamento do *Slab*

O *Slab* é um pré-processador bastante complexo, que permite diferentes formas de acionamento e de modelagem. Seu acionamento e interação com o EP podem ocorrer de duas maneiras distintas: externamente, em um arquivo de entrada de dados do *Slab* independente, ou internamente, no arquivo de entrada de dados do EP.

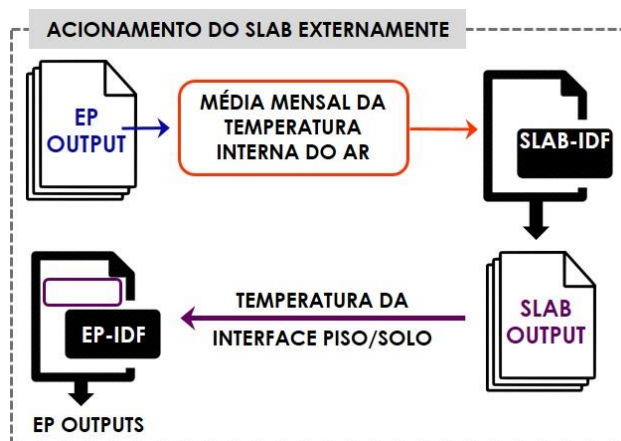
Para acessar o arquivo de dados de entrada independente do *Slab*, basta direcionar-se para a aba “Utilities” presente na janela de comando do EP (EP-Launch), selecionar a opção *Slab* no campo “Utility” e em seguida dirigir-se para o editor de entrada de dados (*Edit – IDF Editor*), Figura 2.10. Quando essa opção é selecionada, o *Slab* é rodado individualmente, sendo necessário realizar a interação com o EP manualmente. Isso significa que o usuário deve retirar os dados de temperatura da interface piso e solo do arquivo de saída do *Slab* e inseri-los no arquivo de entrada do EP no objeto “Site:GroundTemperature:BuildingSurface”, Figura 2.11. Para que o EP utilize os dados de entrada inseridos neste objeto, a condição limite exterior da superfície do piso (“Outside Boundary Condition”) deve ser definida como “Ground”.

Figura 2.10 - Acesso ao arquivo de dados de entrada do Slab



Fonte: Autor

Figura 2.11 - Acionamento do Slab externamente

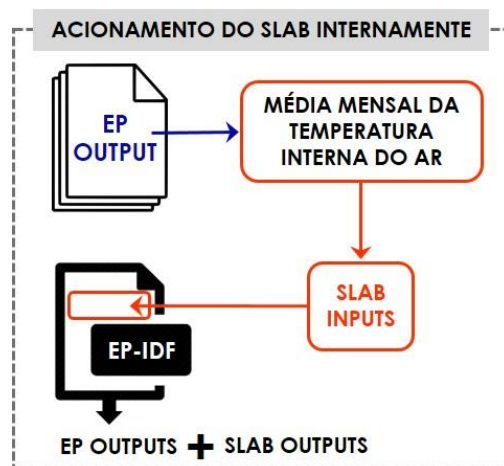


Fonte: Autor

A segunda opção é acionar o *Slab* internamente no arquivo de entrada de dados do EP (*.idf), na classe "Ground Heat Transfer". Essa opção facilita o

processo de simulação, pois todos os dados de entrada do *Slab* são inseridos dentro do próprio arquivo de entrada do EP e o processo de interação entre os programas é feito automaticamente, Figura 2.12 (LARSEN, 2011). Para que o EP utilize os resultados gerados pelo *Slab* durante a simulação, o campo de entrada que define a condição limite exterior da superfície do piso deve estar definida: *GroundSlabPreprocessorAverage*, *GroundSlabPreprocessorCore* ou *GroundSlabPreprocessorPerimeter*. As opções de entrada da condição limite exterior da superfície do piso dizem respeito à qual das séries de temperatura fornecidas pelo *Slab* será adotada na simulação do EP.

Figura 2.12 - Acionamento do Slab internamente

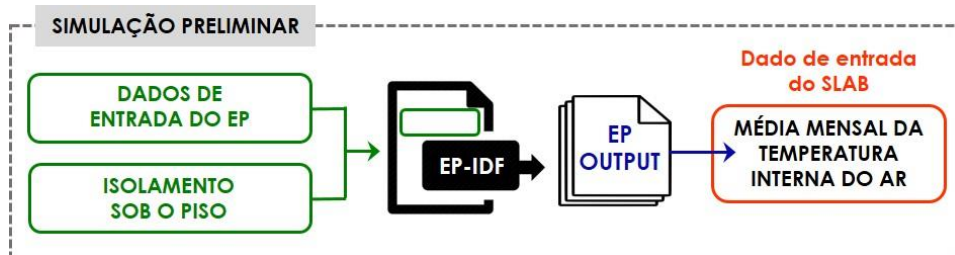


Fonte: Autor

Independentemente de qual das opções acima for adotada para o acionamento do *Slab*, é necessário realizar uma simulação prévia pelo EP, denominada de simulação preliminar. A simulação preliminar irá fornecer uma primeira estimativa da temperatura interna do ar da edificação (média mensal), Figura 2.13. Essa série de valores mensais de temperatura é um dado de entrada do *Slab*. Durante a modelagem da primeira simulação, o usuário não possui esse dado, especialmente em edifícios não condicionados artificialmente. O *Auxiliary Programs Manual* (EERE), 2016b), recomenda que nessa simulação adicione-se uma camada com elevado isolamento no piso,

para que os resultados não sofram influência de uma temperatura inicial do solo.

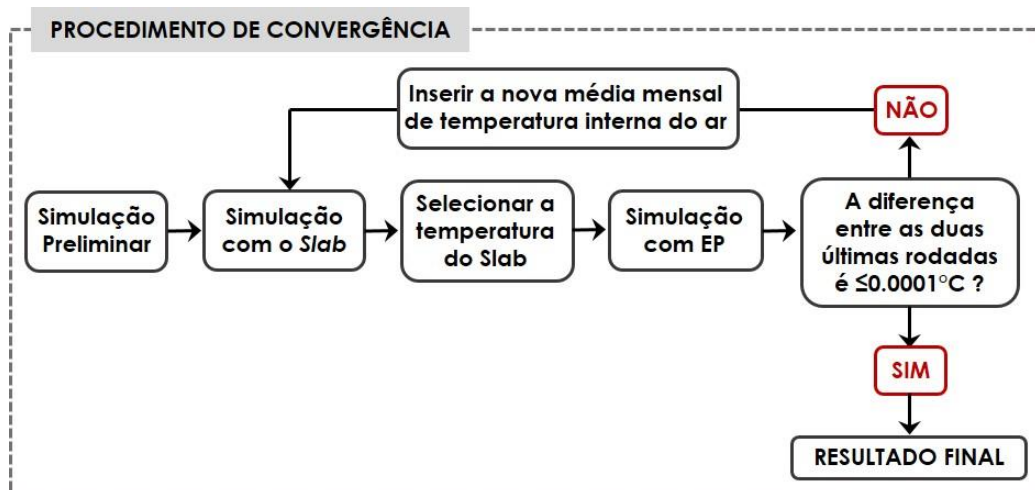
Figura 2.13 - Procedimento da simulação preliminar



Fonte: Autor

Em seguida à simulação preliminar e à primeira execução dos programas *Slab* e EP, pode-se ainda obter como resultado do EP uma temperatura interior do ar da edificação muito distinta daquela inserida como dado de entrada do *Slab*. Segundo Andolsun et al (2012), para o ajuste desse dado, é necessário adotar um procedimento de convergência em que são necessárias simulações consecutivas com a iteração entre os resultados gerados pelo *Slab* e pelo EP (Figura 2.14). Eles consideram que a convergência é obtida quando a diferença nos valores médios mensais entre as duas últimas simulações da temperatura interna do ar da edificação for inferior à $0,0001^{\circ}\text{C}$.

Figura 2.14 - Simulação com o procedimento de convergência



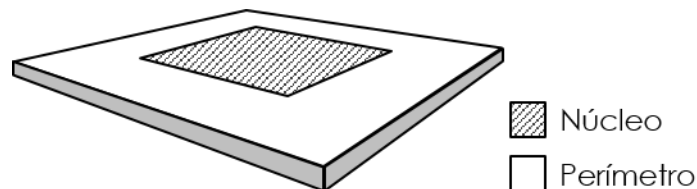
Fonte: Autor

Em relação às formas de modelagem, o *Slab* permite diferentes modelagens do piso da edificação e do domínio virtual. Com o objetivo de representar as trocas de calor mais próximas do real, a estrutura do piso pode ser modelada dividindo-a em duas superfícies, "núcleo" e de "perímetro" (Figura 2.15). O maior fluxo de calor no piso pode ser esperado de uma tira larga de 1,5 metros em torno do perímetro. Porém apesar da maior contribuição nas trocas de calor pelo perímetro, a participação do núcleo também pode influenciar significativamente no fluxo de calor. A transferência de calor na área do núcleo varia em proporção direta com a condutividade térmica do solo, aumentando a contribuição do fluxo de calor com o aumento da condutividade térmica do solo (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990; CLEMENTS, 2004).

Para as diferentes formas de modelagem do piso, o *Slab* fornece três séries de dados de temperaturas mensais: a temperatura média (média ponderada da área da superfície), da área do núcleo e do perímetro. Segundo Clements (2004) a principal dificuldade com a utilização deste tipo de interface entre modelos uni e tridimensional é a questão de qual temperatura usar. As temperaturas podem variar bastante, dependendo da presença e/ou do nível de isolamento da superfície de fundação, dessa forma ao adotar a temperatura média da superfície pode-se mensurar a transferência de calor da laje erroneamente. Além disso, em situações reais as trocas de calor entre o piso e o solo não se distribui de forma uniforme por toda superfície em contato com o solo. Em um estudo no qual são comparados resultados de simulação do *Slab*, variando a escolha da temperatura, com os resultados obtidos pelo método de diferenças finitas (FDM) tido como caso base, o uso das temperaturas do núcleo e do perímetro mitigaram os erros associados à utilização de uma temperatura única, apresentando melhores resultados de transferência de calor comparados ao caso base (CLEMENTS, 2004). É importante destacar que para definir temperaturas distintas no piso se faz necessário descrever as superfícies do núcleo e do perímetro separadamente durante a modelagem da geometria do modelo como apresenta a Figura 2.15. A temperatura a ser adotada na simulação é definida no campo de

entrada que caracteriza a condição limite exterior da superfície ou superfícies do piso ("Outside Boundary Condition"), com as opções: *GroundSlabPreprocessorAverage* (adota a temperatura média), *GroundSlabPreprocessorCore* (adota a temperatura do núcleo) ou *GroundSlabPreprocessorPerimeter* (adota a temperatura do perímetro). Destaca-se que o *Slab* permite a modelagem de apenas um piso, ou seja, ele considera o piso de toda a edificação como um elemento único, mesmo quando esta é multizona.

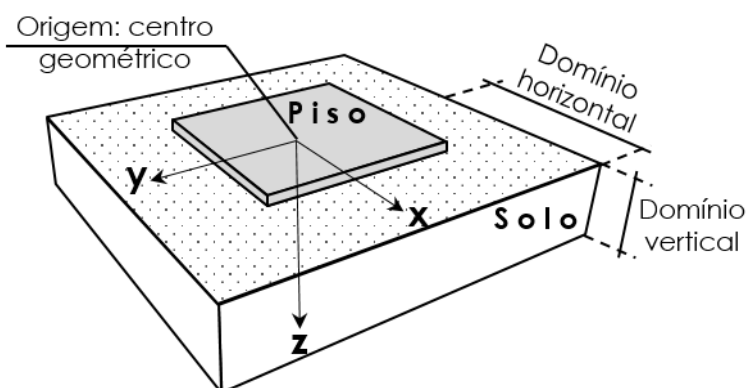
Figura 2.15 - Divisão da superfície do piso sobre solo



Fonte: Autor

Além da forma de modelagem do piso, também é possível definir qual a dimensão do domínio virtual considerado nos cálculos do *Slab*. Os domínios se referem à extensão horizontal e vertical do solo (da superfície inferior do piso em sentido à profundidade do solo) que é considerada para os cálculos de troca de calor, Figura 2.16. A delimitação da extensão dos domínios é essencial para a definição do volume de solo considerado nos cálculos das suas trocas de calor e para a determinação das propriedades do solo (composição e cobertura) e da sua temperatura para esses domínios, pois estas variam com o tempo, localização, tipo de cobertura e composição.

Figura 2.16 - Definição dos domínios vertical e horizontal do modelo virtual



Fonte: Autor

2.2.4 Incertezas na modelagem das trocas de calor entre a edificação e o solo

A escassez de pesquisas que abordem a influência do regime térmico do solo no comportamento térmico de edificações, vem gerando simplificações nos cálculos das trocas de calor entre o piso e o solo. Essas simplificações tem sido fonte de incertezas nos estudos e análises de desempenho térmico se comparados às situações reais. A negligência na modelagem dos parâmetros relacionados às trocas de calor entre o piso e o solo pode resultar em cálculos incorretos do fluxo de calor, temperatura interna e conseqüentemente do nível de desempenho térmico de edificações. Segundo pesquisas sobre o desempenho térmico de edificações (OLIVEIRA et al., 2012; PEREIRA; GHISI, 2009; SORGATO, 2009; SORGATO et al., 2014), a correta definição da temperatura do solo em simulações computacionais é determinante no resultado final das trocas de calor de edificações térreas. Essa influência pôde ser verificada na pesquisa de Silva, Almeida e Ghisi (2017), em que investigaram a propagação de incertezas dos parâmetros de entrada em simulações computacionais. O estudo foi desenvolvido avaliando a sensibilidade de diferentes variáveis de entrada nos graus-hora de desconforto por frio e por calor da edificação. Os resultados indicaram que a temperatura do solo foi uma variável influente em ambos critérios de desconforto. Observou-se que no desconforto por calor a temperatura do solo

foi o segundo parâmetro mais influente e no desconforto por frio foi o parâmetro de maior impacto. Os autores entendem que a variação no valor da temperatura do solo interfere no sentido do fluxo de calor, ou seja, no ganho ou perda de calor da edificação para o solo.

Batista, Lamberts, Güths (2011) também observaram o impacto da temperatura do solo no comportamento térmico de edificações. Essa análise foi realizada através da calibração de um modelo simulado, com base nos dados de uma edificação monitorada. Durante o procedimento de calibração do modelo, foram adotadas três fontes de dados para a temperatura do solo: o arquivo climático, o *Slab* e os dados medidos *in loco*. Os resultados da variação da temperatura do solo indicaram que esse parâmetro exerceu grande influência no balanço térmico da edificação. A adoção da temperatura medida *in loco* apresentou o melhor resultado entre as três situações, com o menor desvio médio (D.M.=0,6), seguida pela temperatura gerada pelo *Slab* e do arquivo climático, com 1,7 e 2,7 de desvio médio, respectivamente. Além desse aspecto também foi observada a variação dos algoritmos de condução *Simple*, *TARP* e *Adaptative* no balanço térmico do piso. Os resultados apresentaram valores superestimados para todos os algoritmos usados, sendo as perdas de calor em até três vezes e os ganhos (fluxos negativos) foram subestimados em até 90%, dependendo do algoritmo selecionado.

Em artigo sobre a influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais ocupadas e naturalmente ventiladas, Pereira e Ghisi (2009) obtiveram resultados que também corroboram com a influência da temperatura do solo. Neste estudo foram sendo alterados diversos parâmetros de entrada para a calibração do modelo. Os valores de temperatura do solo avaliados foram: os valores presentes no arquivo climático e os dados de temperatura medidos *in loco*. A adoção da temperatura do solo medida resultou em uma maior aproximação aos dados de temperatura da edificação monitorada. Os resultados apresentaram diferenças médias entre as temperaturas simuladas e medidas com os dados de temperatura do

monitoramento para a sala de jantar foram de 0,4 °C e 1,1 °C respectivamente.

Oliveira et al. (2012) investigaram a importância da temperatura do solo na simulação termoenergética de uma edificação habitacional, na zona bioclimática 2. Para isso a mesma edificação foi simulada com duas opções de temperatura do solo: oriunda do arquivo climático e do *Slab*. Também foram variadas as propriedades térmicas das paredes e cobertura, a fim de verificar a influência da temperatura do solo em edificações isoladas. Os resultados das duas opções de temperatura do solo apresentaram diferença de até 6°C na temperatura interior do ar, gerando grande variação nos índices de conforto térmico. Em relação a sua influência em edificações isoladas, notou-se que o impacto da temperatura do solo é maior quanto maior o isolamento da envoltória. Em função desse resultado o autor conclui que para a correta definição da temperatura do solo na zona bioclimática avaliada deve ser adotado o programa *Slab*, como indicado no RTQ-R.

No trabalho de Sorgato et al. (2014), foi analisado o desempenho térmico de uma edificação residencial com diferentes condições de contato entre o piso e o solo para os climas de Florianópolis, Curitiba e São Luís. Para este estudo foi adotado o procedimento de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2013), a qual não define esse parâmetro. Foram consideradas as condições de contato: piso adiabático, temperaturas do solo do arquivo climático e as temperaturas do solo do arquivo climático com acréscimo e diminuição de 2°C. O piso adiabático não atendeu ao critério mínimo de desempenho térmico em nenhum dos casos avaliados. Para o clima de São Luís, a condição de contato do piso não impactou significativamente no desempenho da edificação. Eles consideram que isso se deve à pequena variação entre as temperaturas do solo e do interior da edificação nesse clima. Já nos climas de Curitiba e Florianópolis, os resultados mostraram alterações no nível de desempenho, entre o não atendimento da norma e os níveis mínimo e intermediário, dependendo da condição adotada. Em função dos resultados os autores afirmam que a norma deveria definir diretrizes para a condição do piso da

edificação para o procedimento de simulação, para que os estudos e análises fossem avaliados sob o mesmo critério.

Além das incertezas sobre a correta definição da temperatura do solo, as discussões a respeito do tema destacam a complexidade na modelagem das trocas de calor entre o edifício e o solo em ferramentas computacionais de simulação. Larsen (2011) realiza, para a transferência de calor entre o piso e o solo, a comparação de dados medidos em protótipo com diferentes métodos de simulação computacional, utilizando o programa SIMEDIF e EP. O método utilizado no programa SIMEDIF considerou a temperatura do solo a 2m de profundidade igual à temperatura externa do ar. Dessa forma o piso é considerado como uma parede que separa o ambiente interno do externo, sendo o piso composto pelo material da laje de piso e uma camada de 1m de solo. Nas simulações com o EP foram aplicados três métodos: utilizando a temperatura do solo medida, a modelagem do SIMEDIF e o pré-processador *Slab* vinculado ao EP. Através da comparação entre os métodos com os dados do monitoramento do protótipo, notou-se que o programa SIMEDIF reproduz melhor a temperatura superficial do piso apresentando um erro médio em relação aos dados medidos de 0,2°C e para a temperatura interior de 0,6°C. No EP, o método que mais se aproximou dos dados medidos da temperatura superficial do piso foi o método adotando a modelagem do SIMEDIF. Quando comparada a temperatura interna, os três métodos apresentaram comportamento bastante semelhante e próximos dos dados medidos no protótipo. O autor afirma que apesar da semelhança dos resultados da temperatura interna do ar nos três modelos do EP, o uso da temperatura do solo medida como dado de entrada é uma escolha arriscada, pois se faz necessário conhecer com exatidão a temperatura do solo abaixo da edificação. O uso do *Slab*, carrega uma dificuldade exigindo conhecimento avançado no programa para a entrada de dados e para interpretar os resultados.

Andolsun et al. (2012) também quantificam as diferenças de transferência de calor entre o piso e o solo nos programas de simulação computacional. Em

seu estudo eles avaliam os modelos do DOE-2 e o modelo *Slab* do EP e seus resultados são comparados com o modelo mais detalhado do TRNSYS para o tipo de construção laje sobre o solo, em quatro climas diferentes. Para realizar as comparações, os resultados das cargas de aquecimento e resfriamento do ambiente, e o fluxo de calor no piso são comparados nos modelos de simulação estudados. Nas comparações foi possível observar resultados distintos entre os modelos na magnitude dos valores e em seus picos; os resultados do EP diferem do DOE-2 de 0 a 31% na carga de refrigeração e na carga de aquecimento, de 3 a 15%. Quando comparado o modelo do EP com o do TRNSYS, observou-se que os resultados do EP com o *Slab* simulado externamente e com procedimento de convergência, se aproximaram bastante dos resultados do modelo do TRNSYS. Já quando se compara o EP com o *Slab* simulado internamente e sem o procedimento de convergência, os resultados da carga de calor da edificação são 18 a 32% inferiores ao modelo do TRNSYS. Na simulação com o *Slab*, observaram-se problemas de convergência da temperatura interna da zona e limitações para certas configurações de isolamento, gerando variação nos resultados das cargas térmicas. Isto indica a necessidade de melhoria no *Slab* para evitar resultados incoerentes em avaliações de desempenho energético residencial.

2.2.5 Normas e regulamentos

No Brasil, há a norma NBR 15575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2013b) e o “Regulamento Técnico Da Qualidade Para O Nível De Eficiência Energética De Edificações Residenciais” - RTQ-R (INMETRO, 2012) que tratam da avaliação do desempenho térmico de edificações habitacionais através de simulação computacional. A norma brasileira “Edificações habitacionais – Desempenho” NBR 15575 (ABNT, 2013), dispõe critérios e requisitos para avaliar o desempenho térmico da edificação, recomendando níveis de desempenho mínimos que devem ser atendidos. No entanto, ela não apresenta definição para vários parâmetros que compõem os dados de avaliação das edificações, e não define para o atual método de

simulação nenhum parâmetro de avaliação da condição do piso em contato com o solo, deixando-o de livre escolha do usuário do programa de simulação.

Simultaneamente ao desenvolvimento da ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013), surgiu o RTQ-R (INMETRO, 2012), voltado a edificações uni e multifamiliares. O RTQ-R tem um procedimento para a determinação da eficiência energética no qual recomenda o uso do programa *Slab*, que está vinculado ao EP, para calcular as temperaturas do solo a serem usadas na avaliação do edifício. Apesar dessa recomendação, na entrada de dados da temperatura do solo, o regulamento não estabelece critérios para os valores dos dados de entrada e não indica a alternativa de modelagem da temperatura do solo mais adequada para cada tipologia de construção, permanecendo a mesma dúvida em relação aos valores e a modelagem a serem utilizadas.

A ASHRAE (2009a) apresenta um método de cálculo simplificado que apresenta uma série de equações para estimar a perda de calor através de pisos e de paredes (no caso de porões), em condições de temperatura interna constante. Essas equações requerem parâmetros de entrada diretos, incluindo as dimensões do piso, a resistência do isolamento, as propriedades térmicas do solo e as temperaturas interna e externa. Porém, não são indicados valores de referência para os dados de entrada para que a equação seja aplicada de forma correta. O segundo método apresentado pela ASHRAE, pode ser adotado para pisos aquecidos ou não, e supõe que a perda de calor do piso é proporcional ao seu perímetro. No entanto, segundo Bahnfleth e Pedersen (1990), esse modelo de cálculo pode resultar em estimativas de fluxo de calor subestimadas em 50% para tipologias de piso sobre o solo.

Quando uma variável não é predefinida pela norma e não indica nenhuma fonte para determinação de seu valor, espera-se que ela não interfira nos resultados da classificação de desempenho. Porém, segundo estudos, as condições de contato do piso com o solo exercem forte influência nos resultados das simulações do desempenho térmico, no conforto nas

edificações térreas e na aprovação do desempenho do sistema construtivo em análise (SILVA et al., 2014). Isso indica que há a necessidade de aperfeiçoar a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) e adicionar-se critérios relacionados as condições de contato do piso com o solo no procedimento de simulação, auxiliando os profissionais da área a avaliar as edificações considerando a realidade das suas trocas de calor com o ambiente (SORGATO et al., 2014).

2.3 Considerações finais

Esta revisão da literatura procurou apresentar informações referentes ao solo, sua interação com edificações térreas e sobre o uso de ferramentas computacionais, especialmente o *Slab*, na modelagem das trocas de calor originadas por essa interação, de forma a embasar o presente trabalho.

A modelagem das trocas de calor entre o solo e as edificações é apontada pelos pesquisadores como um tema complexo, principalmente, devido ao grande número de variáveis envolvidas. Segundo a literatura, o regime térmico do solo é influenciado por vários fatores que variam com o tempo e o espaço, por exemplo, a sua composição e conseqüentemente suas propriedades térmicas. Além disso, ele também sofre com o impacto gerado pela presença de edificações e as variações climáticas, tornando as trocas de calor ainda mais complexas. Devido à complexidade do tema, estudos que abordem a interação entre edifício, solo e atmosfera e dados relacionados ao solo são escassos, especialmente no Brasil.

As pesquisas descritas demonstram que esse cenário se reflete nas avaliações de desempenho termoenergético de edificações. A escassez de estudos e diretrizes normativas que indiquem soluções de modelagem para as trocas de calor entre o piso e o solo vem gerando simplificações e incertezas nas avaliações comparadas às condições reais. A definição da temperatura do solo nas avaliações e a forma como as trocas de calor entre o edifício e o solo são modeladas é determinante no resultado final do fluxo de calor,

temperatura interna e conseqüentemente do nível de desempenho térmico da edificação.

No Brasil, embora o “Regulamento Técnico Da Qualidade Para O Nível De Eficiência Energética De Edificações Residenciais” - RTQ-R (INMETRO, 2012) recomende o uso do pré-processador *Slab* para calcular as temperaturas do solo a serem usadas na avaliação do edifício, ele não estabelece critérios para a sua modelagem. Além disso, o *Slab* oferece diversas formas de modelagem e de entrada de dados permanecendo a mesma dúvida em relação aos valores e a modelagem a serem utilizadas.

3 METODOLOGIA

A metodologia se divide em três etapas: a primeira etapa compreende somente simulações computacionais, onde é feita a verificação do impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*. A segunda, denominada de procedimento experimental, consiste em medições realizadas em uma célula-teste. A terceira etapa, denominada de medições e simulação, compreende a comparação entre os resultados da medição (etapa 3.2 “Procedimento experimental”) e das simulações paramétricas.

3.1 Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*

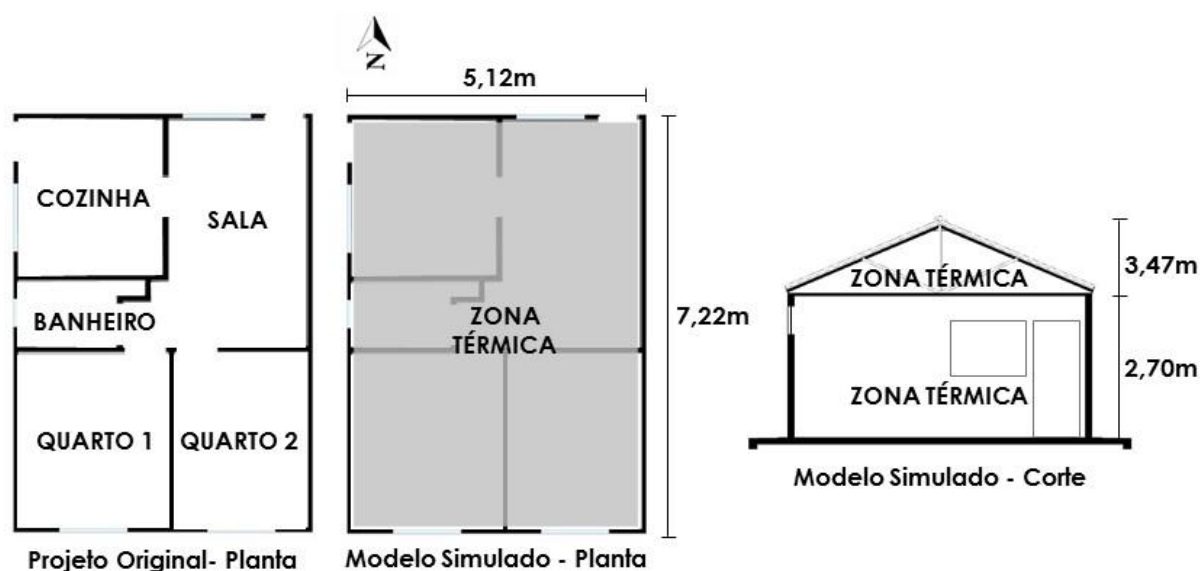
Essa etapa compreende a verificação do impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo de uma edificação térrea, com o piso em contato com o solo, naturalmente ventilada, nos programas *EnergyPlus* (EP - versão 8.5.0) e *Slab* (versão .75). Além disso, também foi verificado o impacto das variáveis de entrada do pré-processador *Slab*.

3.1.1 Geometria e características construtivas do modelo

O modelo de edificação simulado baseou-se em um projeto de habitação de interesse social usualmente empregado por uma importante agência de financiamento de habitação brasileira (Caixa Econômica Federal; MARQUES, 2013). O projeto original é uma habitação térrea, isolada e com o piso em contato com o solo. Ela possui dois quartos, uma cozinha, uma sala e um banheiro, totalizando 37,1 m². No modelo simulado foram consideradas apenas as paredes externas, sendo todos os cômodos congregados em uma única zona térmica (Figura 3.1). A cobertura é composta por um ático não ventilado, que foi simulado como uma segunda zona térmica, que troca calor com o ambiente interior do edifício através da laje de teto. As janelas são

posicionadas da mesma forma que o projeto original, e suas áreas também são mantidas. As dimensões das janelas são 1,2 x 1,0m (sala), 1,2 x 1,0m (quartos), 0,50 x 0,50m (banheiro) e 1,2 x 1,0m (cozinha).

Figura 3.1 - Projeto original da edificação e do modelo simulada



Fonte: Autor

A Tabela 3.1 apresenta as características construtivas e as propriedades termofísicas dos elementos da edificação. Sua escolha baseou-se em informações concedidas pela mesma agência financiadora brasileira supracitada (Caixa Econômica Federal, com os dados de MARQUES (2013)) e refletem o que é usualmente empregado nesse tipo de edificação. O piso não possui nenhum tipo de isolamento térmico, o que é comum em todas as habitações térreas brasileiras, e não somente nas de interesse social.

Tabela 3.1 - Características construtivas e propriedades termofísicas dos elementos da edificação “**continua**”

Elementos opacos da edificação	Valor U^1 (W/m^2K)	Valor R^1 ($m^2.K/W$)	Valor C^1 (kJ/m^2K)	Absortância solar ²
Paredes externas Argamassa (2,5 cm) + bloco de concreto furado de 14 cm + argamassa (2,5 cm)	2,76	-	266	0,30

Tabela 3.1 - Características construtivas e propriedades termofísicas dos elementos da edificação “conclusão”

Elementos opacos da edificação	Valor U ¹ (W/m ² K)	Valor R ¹ (m ² .K/W)	Valor C ¹ (kJ/m ² K)	Absortância solar ²
Cobertura Telha cerâmica (1 cm) + ático não ventilado + laje cerâmica pré-moldada (12 cm)	1,78	-	189	0,75
Piso ³ Brita (3cm) + concreto (8 cm) + argamassa (2,5 cm) + revestimento cerâmico (0,4 cm))	-	0,32	279	-
Áreas envidraçadas				
Vidro	Cor		Incolor	
	Espessura		4 mm	

Nota: ¹ as propriedades dos materiais e os cálculos da transmitância (U), resistência (R) e capacidade (C) térmicas foram efetuados conforme a norma brasileira “Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações” NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

² a absortância da envoltória foi definida considerando as medições de absortância de tintas feitas por Dornelles (2008), sendo selecionada para as paredes a cor branco gelo.

³ para o piso apresenta-se o valor da resistência térmica em lugar da transmitância pela diferença na resistência superficial externa.

3.1.2 Ganhos internos

A carga térmica devido às fontes internas de calor (ocupantes, iluminação artificial, e equipamentos) e os seus padrões de utilização foram definidos de acordo com o recomendado pelo “Regulamento Técnico Da Qualidade Para O Nível De Eficiência Energética De Edificações Residenciais” – RTQ-R (INMETRO, 2012). A Tabela 3.2 apresenta esses valores.

Tabela 3.2 - Ganhos internos totais diários

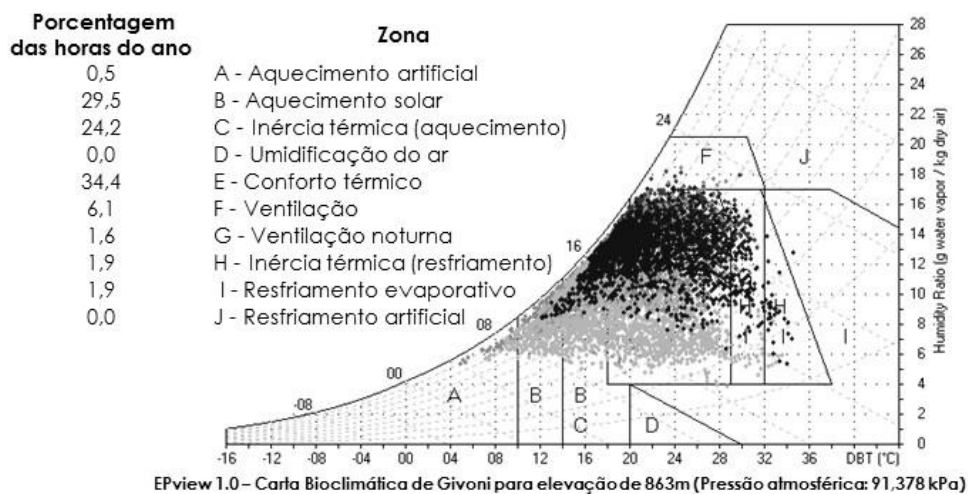
GANHOS INTERNOS TOTAIS (correspondentes ao período de 24 horas)		
Fontes de Calor	Dias de semana	Finais de semana
Ocupação	2490 W/m ²	3360 W/m ²
Iluminação	45 W/m ²	57 W/m ²
Equipamentos	36 W/m ²	

Nota: O “Regulamento Técnico Da Qualidade Para O Nível De Eficiência Energética De Edificações Residenciais” - RTQ-R (INMETRO, 2012) apresenta padrões de ocupação e de funcionamento dos equipamentos e da iluminação diferenciados para cada ambiente (sala, quarto e cozinha). Esses ganhos são distribuídos de forma irregular ao longo do dia. Nesta tabela, é apresentada apenas a sua soma total, durante o período de 24 horas.

3.1.3 Clima

O local escolhido foi a cidade de São Carlos/SP, localizada na latitude 22°01'03''S, altitude 863m, e pertencente à zona bioclimática 4, de acordo com a norma brasileira NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). O arquivo EPW adotado foi o desenvolvido por Roriz (2012). A Figura 3.2 apresenta o diagrama bioclimático de Givoni (1992) gerado pelo programa EPview (RORIZ; RORIZ, 2015), a partir do arquivo climático citado acima. O diagrama mostra que a cidade está localizada na zona de conforto em grande parte do ano (34,4%). Nota-se também a predominância de frio em relação ao calor, com 29,5% do ano localizado na zona de aquecimento solar e 24,2% na de inércia térmica (aquecimento).

Figura 3.2 - Diagrama bioclimático de Givoni (1992) para a cidade de São Carlos/SP-Brasil



Fonte: Roriz e Roriz (2015)

3.1.4 Modelagem da ventilação natural

A edificação foi considerada naturalmente ventilada através de suas janelas, o que é o usual nessa cidade, em edificações residenciais dessas dimensões. A ventilação foi modelada através do módulo *Airflow Network* do EP. Adotaram-se para os coeficientes de pressão do vento de cada fachada, os valores calculados automaticamente pelo EP para geometrias retangulares.

Os principais dados de entrada adotados nessas simulações para o módulo *Airflow Network* são apresentados na Tabela 3.3. Com o controle de abertura das janelas por temperatura, houve ventilação quando a temperatura interior do ar era maior que a temperatura externa do ar ($T_{int} > T_{ext}$) e a temperatura interna do ar maior que a temperatura de controle ($T_{int} > T_{setpoint}$). O cronograma de ventilação foi definido de acordo tanto com o padrão de ocupação dos usuários (ver no item Ganhos Internos desta etapa) quanto com estudos anteriores sobre a operação das janelas, feitos no mesmo clima, que indicam a necessidade de ventilação noturna (MARIN; CASATEJADA; CHVATAL, 2016). A porcentagem de abertura das janelas foi considerada igual à 100% de acordo com as diretrizes propostas pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005b) para a zona bioclimática 4. Apesar desse valor não condizer com a realidade dos tipos de janelas atualmente utilizadas em habitações residenciais, o mesmo foi adotado para que esteja dentro das diretrizes da norma NBR 15220 (ABNT, 2005b). A norma recomenda para esta zona o uso de aberturas médias para a ventilação com $15\% < A < 25\%$ ($A = \% \text{ da área do piso}$).

Tabela 3.3 - Dados de entrada do módulo *Airflow Network*

Parâmetro	Variável
Controle da abertura das janelas	Por temperatura
Temperatura de controle	20°C ¹
Tipo de coeficiente de pressão do vento	<i>Surface Average Calculation</i>
Cronograma de ventilação	18h - 6h/12h - 13h (set. a abr.)
Porcentagem de abertura efetiva das janelas	100%

Nota: ¹ Foi definido conforme o sugerido pelo Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2012).

3.1.5 Dados de entrada e variação das simulações

As simulações são divididas em três grupos, conforme indicado na Tabela 3.4. No primeiro grupo, foram realizados testes para avaliar a operação de *Slab* e outras alternativas de modelagem para as trocas de calor entre o edifício e o solo. No segundo grupo, o objetivo é avaliar a influência de dados de entrada

do *Slab* nos dados de saída. No terceiro grupo, foram realizados testes especificamente variando um tipo de dados de entrada do *Slab*: as propriedades termofísicas do solo.

Cada um destes grupos é dividido em uma série de subgrupos. As Tabelas 3.5 a 3.11 listam todos os dados de entrada do *Slab* (Tabelas 3.6 a 3.11), bem como os dados do objeto *Site: Ground Domain* (GDomain) (Tabela 3.5), identificando a qual subgrupo pertencem. Nos subgrupos 4 a 9, os resultados das variações consideradas foram comparados a um caso denominado como "referência". O caso de referência foi considerado como o mais indicado, de acordo com o que foi observado na literatura, e no *Auxiliary Programs Manual* e *EnergyPlus University Course Teaching Material* (GARD ANALYTICS, 2003; EERE, 2016). A escolha do que seria alterado também foi feita considerando essas referências. Todas as simulações seguiram, salvo indicação contrária, os procedimentos descritos no item "2.2.3.3 Funcionamento do *Slab*". A Tabela 3.6 também apresenta alguns detalhes adicionais sobre o procedimento de simulação.

Tabela 3.4 - Grupos e subgrupos das simulações e suas variações "contínua"

Grupos de Simulação	Subgrupos	Variações	Observações
Operação do <i>Slab</i> e outras alternativas	1. Ativação do <i>Slab</i>	<i>Slab</i> rodado interna e externamente ao EP, com os mesmos dados de entrada	Em ambos os casos, o <i>Slab</i> foi rodado apenas uma vez. Essas duas variações foram comparadas entre si.
	2. Uso do <i>Slab</i>	<p>(A) Com <i>Slab</i>. Com camada de isolamento no piso na simulação preliminar no EP¹</p> <p>(B) Sem <i>Slab</i>. Com GT:BSurface.</p> <p>(C) Sem <i>Slab</i>. Com GDomainFD.</p> <p>(D) Sem <i>Slab</i>. Com GDomainKA.</p>	<p>A partir destas simulações em diante, o <i>Slab</i> é sempre rodado internamente ao EP. No caso Com <i>Slab</i>, foi adotado o procedimento de convergência.</p> <p>A temperatura da interface solo e piso, com a utilização do objeto GT:BSurface, é igual à temperatura média do ar exterior do arquivo climático.</p>

Tabela 3.4 - Grupos e subgrupos das simulações e suas variações “conclusão”

Grupos de Simulação	Subgrupos	Variações	Observações
Operação do Slab e outras alternativas	3. Procedimento de convergência e temperatura do solo na simulação preliminar pelo EP ¹	<p>(A) Com <i>Slab</i>. Com camada de isolamento no piso na simulação preliminar no EP¹</p> <p>(B) Sem <i>Slab</i>. Sem camada de isolamento no piso e com temperatura do solo de 18°C, na simulação preliminar no EP¹</p> <p>(C) Sem <i>Slab</i>. Sem camada de isolamento no piso e com temperatura do solo de 25°C, na simulação preliminar no EP¹</p>	O procedimento de convergência foi testado ao se comparar os resultados do <i>Slab</i> após a primeira rodada e após se atingir a convergência.
Influência dos dados de entrada do <i>Slab</i>	4. Amplitude diária da temperatura	(A) Amplitude = 0	Cada uma dessas alterações foi feita separadamente. No caso do subgrupo 6, foram criadas no EP duas superfícies no piso (núcleo e perímetro).
	5. Evapotranspiração	(A) Sem evapotranspiração	
	6. Inserção da Temperatura gerada pelo <i>Slab</i> no EP	(A) Inserção de temperaturas diferentes no EP, para o núcleo e o perímetro do piso.	As dimensões do perímetro correspondem a uma faixa de 1,5m em torno do perímetro da edificação (CLEMENTS, 2004). A área restante corresponde ao núcleo.
	7. Dimensão do domínio horizontal	(A) 7,5m (B) 30m	
	8. Tempo de iteração	(A) 5 anos (B) 20 anos	
Influência das propriedades termofísicas do solo	9. Condutividade (k), calor específico (Cp) e densidade (ρ) do solo (solo úmido, intermediário e seco)	<p>(A) solo seco k: 0,5 W/m.K ρ: 1200 kg/m³ C_p: 1200 J/kg.K</p> <p>(B) solo úmido k: 2 W/m.K ρ: 1700 kg/m³ C_p: 1700 J/kg.K</p>	Valores medidos por Kersten (1949) e fornecidos por Bahnfleth (1989).

Nota:¹ A simulação preliminar é definida no item 2.2.3.3 “Funcionamento do Slab”.

Tabela 3.5 – Dados de entrada do objeto GDomain (descritos na Tabela 3.4) “continua”

Campos de entrada	Valor adotado
Name	GDomain
Ground Domain Depth (m)	15 ¹
Aspect Ratio	1.41
Perimeter Offset (m)	10
Soil Thermal Conductivity (W/m.K)	1 ¹
Soil Density (kg/m ³)	1200 ¹
Soil Specific Heat (J/kg.K)	1200 ¹
Soil Moisture Content Volume Fraction (%)	30
Soil Moisture Content Volume Fraction at Saturation (%)	50
Type of Undisturbed Ground Temperature Object	Site:GroundTemperature: Undisturbed:FiniteDifference (subgrupo 2, variação C) Site:GroundTemperature: Undisturbed: KusudaAchenbach (subgrupo 2, variação D)
Name of Undisturbed Ground Temperature Object	GDomainFD (subgrupo 2, variação C) GDomainKA (subgrupo 2, variação D)
Evapotranspiration Ground Cover Parameter	1.5
Slab Boundary Condition Model Name	GroundCoupledOSCM
Slab Location	OnGrade
Slab Material Name	
Horizontal Insulation	No
Horizontal Insulation Material Name	
Horizontal Insulation Extents	Full
Perimeter Insulation Width	
Vertical Insulation	No
Vertical Insulation Material Name	-
Vertical Insulation Depth	-
Simulation Timestep	Hourly
GroundTemperature: Shallow	
Campos de entrada	Valor adotado
January – December Surface Ground Temperature (°C)	Temperatura média mensal do ar do arquivo climático

Nota: ¹ neste caso não foram utilizados os valores de referência do GDomain, por estes se diferenciarem do *Slab*. Dessa forma, tanto o *Slab* quanto o GDomain são rodados com o mesmo valor para esse parâmetro. Para os demais parâmetros foram adotados os valores de referência do GDomain.

Tabela 3.5 – Dados de entrada do objeto GDomain (descritos na Tabela 3.4)
“conclusão”

Site:GroundTemperature:Undisturbed: FiniteDifference (subgrupo 2, variação C)	
Campos de entrada	Valor adotado
Name	GDomainFD
Soil thermal conductivity	1 ¹
Soil density	1200 ¹
Soil specific heat	1200 ¹
Soil moisture content volume fraction (%)	30
Soil moisture content volume fraction at saturation (%)	50
Evapotranspiration ground cover parameter	1.5
Site:GroundTemperature:Undisturbed: KusudaAchenbach (subgrupo 2, variação D)	
Campos de entrada	Valor adotado
Name	GDomainKA
Soil thermal conductivity	1 ¹
Soil density	1200 ¹
Soil specific heat	1200 ¹
Average Soil Surface Temperature (°C)	-
Average Amplitude of Surface Temperature ($\Delta^{\circ}\text{C}$)	-
Phase shift of Minimum Surface Temperature (days)	-
SurfaceProperty:OtherSideConditionsModel	
Campos de entrada	Valor adotado
Name	GroundCoupledOSCM
Type of modeling	GroundCoupledSurface
Nota: ¹ neste caso não foram utilizados os valores de referência do GDomain, por estes se diferenciarem do Slab. Dessa forma, tanto o Slab quanto o GDomain são rodados com o mesmo valor para esse parâmetro.	

Tabela 3.6 - Dados de entrada da Classe “Ground Heat Transfer: Slab: Materials” e detalhes adicionais sobre o procedimento de simulação para o caso de referência e demais simulações (descrita na Tabela 3.4) **“continua”**

Simulação Preliminar
Caso de referência e subgrupos 1, 2, 3 (variação A) e 4 a 9. Conforme procedimento descrito no item 2.2.3.3 “Funcionamento do Slab”. Com uma camada de isolamento sob o piso (na interface piso e solo). Composta de lã de vidro (20cm de espessura) com condutividade de 0,045 W/m.K, densidade de 100 kg/m ³ e calor específico de 700 J/kg.K. Temperatura média mensal do solo nessa simulação igual à do ar externo.
Subgrupo 3 (variação B, e C). Conforme procedimento descrito no item 2.2.3.3 “Funcionamento do Slab”, mas com a simulação preliminar com a temperatura média mensal do solo igual a 18 ou 25 graus, e sem considerar a camada de isolamento.

Tabela 3.6 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: Materials" e detalhes adicionais obre o procedimento de simulação para o caso de referência e demais simulações (descrita na Tabela 3.4) "**conclusão**"

Procedimento de convergência		
Caso de referência e subgrupos 2 (variação A), 3 (variações A, B e C) a 9. Adoção desse procedimento, conforme descrito no item 2.2.3.3 "Funcionamento do Slab".		
Dados de entrada do Slab		
I) Ground Heat Transfer: Slab: Materials:	Valor adotado	Observações
<i>NMAT: Number of materials</i>	2	Número de materiais diferentes usados nos elementos piso e solo.
<i>ALBEDO: Surface Albedo: No Snow</i>	0,16	Indica o potencial de reflexão solar da superfície. Varia de 0 a 1. Foi utilizado o valor de referência.
<i>ALBEDO: Surface Albedo: Snow</i>	0,40	
<i>EPSLW: Surface Emissivity: No Snow</i>	0,94	Indica a capacidade de emitir e absorver radiação térmica. Varia de 0 a 1. Foi utilizado o valor de referência.
<i>EPSLW: Surface Emissivity: Snow</i>	0,86	
<i>Z0: Surface Roughness: No Snow (cm)</i>	0,75	É utilizado para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do solo e o ar. Foi utilizado o valor de referência.
<i>Z0: Surface Roughness: Snow (cm)</i>	0,25	
<i>HIN: Indoor Conv. Downward Flow (W/m².K)</i>	6,13	Define o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação combinadas entre a superfície superior do piso e o ar da zona térmica. Valor default do <i>Slab</i> retirado da norma ASHRAE Handbook of Fundamentals (2009b)
<i>HIN: Indoor Conv. Upward (W/m².K)</i>	9,26	

Nota: Quando não mencionado de outra forma, os dados de entrada mencionados acima, foram utilizados em todas as simulações (caso de referência e todos os subgrupos).

Tabela 3.7 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps" "**continua**"

II) Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps	Valor adotado e observações
<i>RHO: Slab Material density (kg/m³)</i>	Dado referente às propriedades termofísicas do piso. 2007 kg/m³. As propriedades foram retiradas a norma brasileira "Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações" NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).
<i>RHO: Soil Density (kg/m³)¹</i>	Caso de referência e todos os subgrupos, exceto subgrupo 9 (variação B). 1200 kg/m³. Esse valor corresponde ao default e também ao valor medido por Kersten (1949) e fornecido por Bahnfleth (1989). Subgrupo 9(B). 1700 kg/m³

Tabela 3.7 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps"
"conclusão"

II) Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps	Valor adotado e observações
CP: Slab CP (J/kg K)	Dado referente as propriedades termofísicas do piso 1000 J/kg K. As propriedades foram retiradas a norma brasileira "Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações" NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).
CP: Soil CP (J/kg K)	Caso de referência e todos os subgrupos, exceto subgrupo 9 (variação B). 1200 J/kg K. Esse valor corresponde ao default e também ao valor medido por Kersten (1949) e fornecido por Bahnfleth (1989). Subgrupo 9(B). 1700 J/kg K
TCON: Slab k (W/m.K)	Dado referente as propriedades termofísicas do piso 0.429 W/m.K. As propriedades foram retiradas a norma brasileira "Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações" NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).
TCON: Soil k (W/m.K)	Caso de referência e todos os subgrupos, exceto subgrupo 9. 1 W/m.K. Esse valor corresponde ao default e também ao valor medido por Kersten (1949) e fornecido por Bahnfleth (1989). Subgrupo 9. (A) 0,5 W/m.K (B) 2 W/m.K

Nota: ¹Como recomendado pelo Auxiliary Programs Manual (EERE, 2016b).

Tabela 3.8 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds"

III) Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds	Valor adotado e observações
EVTR: Is surface evapotranspiration modeled	Caso de referência e todos os subgrupos, exceto 5. TRUE ¹ Subgrupo 5. FALSE
FIXBC: lower boundary at a fixed temperature ¹	FALSE Não possui o valor da temperatura do limite inferior do domínio.
TDEEPin (°C) ¹	EM BRANCO, pois o campo anterior foi definido "FALSE".
USRHflag: is the ground surface h specified by the use ¹	FALSE Não possui o valor do coeficiente.
USRH: User specified ground surface heat transfer coefficient ¹	EM BRANCO, pois o campo anterior foi definido "FALSE".

Nota: ¹Como recomendado pelo Auxiliary Program Manual (EERE, 2016b).

Tabela 3.9 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps"

IV) Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps	Valor adotado e observações
<i>IYRS: Number of years to iterate</i> ¹	Caso de referência e todas os subgrupos, exceto 8. 10 anos (valor de referência) Subgrupo 8(A) 5 anos (B) 20 anos;
<i>Shape: Slab shape</i>	Zero (pisos retangulares, única opção disponível). Valor de referência.
<i>HBLDG: Building height (m)</i>	Dado referente à geometria do edifício. 3,47m
<i>TIN (January – December) Indoor Average Temperature Setpoint (°C)</i>	Valor gerado na simulação preliminar com EP. Ver procedimento no item 2.2.3.3 "Funcionamento do Slab".
<i>TINamp: Daily Indoor sine wave variation amplitude</i>	Subgrupos 1 a 4. Amplitude = 0 (valor de referência) Caso de referência e subgrupos 5 a 8. Amplitude média anual da temperatura interna do ar gerada na simulação preliminar com o EP (ver o procedimento no item 2.2.3.3 "Funcionamento do Slab").
<i>ConvTol: Convergence Tolerance</i>	Valor de referência do <i>Slab</i> . 0,1

Nota: ¹como recomendado pelo *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016b).

Tabela 3.10 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: Insulation"

V) Ground Heat Transfer: Slab: Insulation	Valor adotado e observações
<i>RINS: R value of under slab insulation</i>	É inserido o valor zero porque o piso da edificação não possui em sua composição nenhum tipo de isolamento.
<i>DINS: Width of strip of under slab insulation</i>	
<i>RVINS: R value of vertical insulation</i>	
<i>ZVINS: Depth of vertical insulation</i>	
<i>IVINS: Flag is there vertical insulation</i>	

Tabela 3.11 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab" "continua"

VI) Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab	Valor adotado	Observações
<i>APRatio: The area to perimeter ratio for this slab</i>	1,5m	Dado referente à geometria do edifício.
<i>SLABDEPTH: Thickness of slab on grade (m)</i>	0,139m	

Tabela 3.11 - Dados de entrada da Classe "Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab" "**conclusão**"

VI) Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab	Valor adotado	Observações
<i>CLEARANCE: Distance from edge of slab to domain edge (m)</i> ¹	15m	Caso de referência e todos os subgrupos, exceto 7. 15m Subgrupo 7. (A) 7,5m (B) 30m
<i>ZCLEARANCE: Distance from bottom of slab to domain bottom (m)</i> ¹	15m	Valor de referência do Slab.

Nota: ¹Como recomendado pelo *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016b).

3.1.6 Forma de análise dos resultados

Os dados de saída utilizados foram: a temperatura do ar interior e a temperatura operativa (horária), geradas pelo EP, e a temperatura do solo logo abaixo do piso (médias mensais), oriundas do Slab. Verificou-se principalmente o impacto que as possibilidades de modelagem, exploradas nas simulações, ocasionavam na temperatura interior horária. Averiguou-se também como esse impacto se refletia na avaliação do conforto dessa residência. Para tal, adotou-se os limites de conforto prescritos pela abordagem adaptativa da ASHRAE Standard 55 (2013), que trata de espaços naturalmente ventilados. As temperaturas correspondentes a esses limites são função da temperatura do ar exterior, obtida no arquivo climático. Utilizou-se, conforme recomendado pela Norma os limites correspondentes a 80% dos usuários satisfeitos, a definição dos limites superior e inferior para esta zona de conforto, são geradas pelas Equações 3.1 e 3.2 A Figura 3.3 apresenta a temperatura exterior, a temperatura de conforto e os limites superior e inferior, em função das horas do ano, obtidos para a cidade de São Carlos/SP-Brasil, utilizando-se o arquivo climático fornecido por Roriz (2012).

Equação 3.1

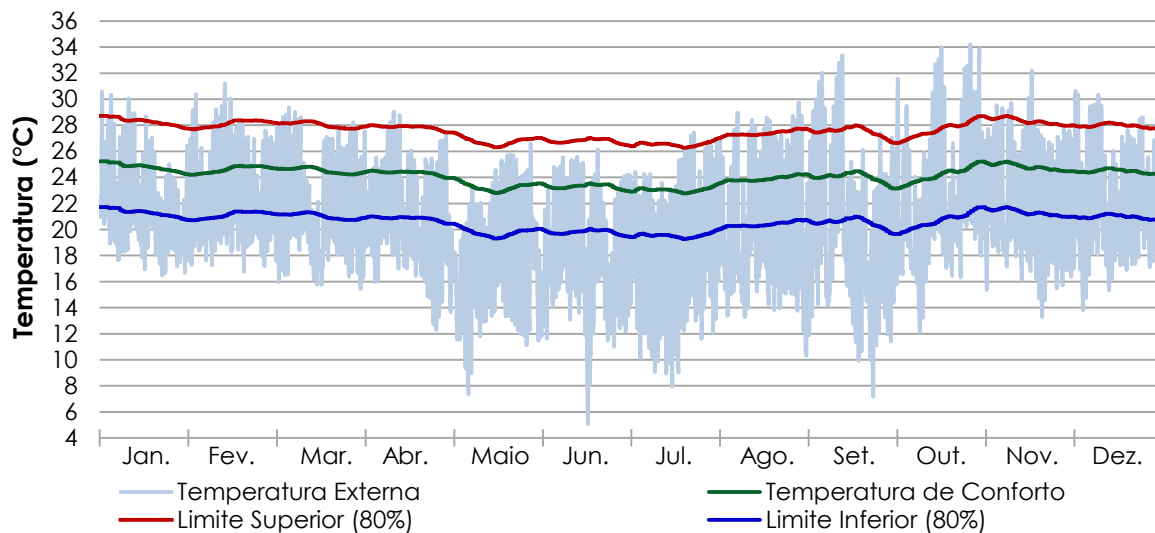
$$\text{Limite superior para aceitabilidade de 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 t_{pma(out)} + 21,3$$

Equação 3.2

$$\text{Limite inferior para aceitabilidade de 80\% (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 t_{pma(out)} + 14,3$$

Fonte: ASHRAE Standard 55 (2013)

Figura 3.3 - Limites superior e inferior da zona de conforto, temperatura de conforto e temperatura externa horárias para São Carlos/SP-Brasil



Tendo sido estabelecida a faixa de conforto, foram obtidos os graus-hora de desconforto por frio e por calor totais anuais. Cada grau-hora corresponde ao desconforto provocado quando a temperatura operativa⁹ é menor que o limite inferior (frio) ou ultrapassa o superior (calor), durante 1 hora. Os níveis anuais são a somatória dos graus-hora ocorridos ao longo das horas do ano (RORIZ; CHVATAL; CAVALCANTI, 2009).

⁹ "A temperatura uniforme de um invólucro negro imaginário no qual um ocupante trocaria a mesma quantidade de calor por radiação mais convecção como no ambiente não uniforme real" (ASHRAE, 2013).

3.2 Procedimento experimental

A principal intenção das medições é observar o comportamento térmico da célula-teste, especialmente do piso, em relação as variações de temperatura do solo. Para tal foram realizadas medições no período de 16 de junho a 8 de dezembro de 2016.

3.2.1 Medições em célula-teste

Como objeto de estudo é utilizada uma célula-teste, localizada no canteiro experimental do Laboratório de Construção Civil (LCC) e do Laboratório de Conforto Ambiental (LCA), do Instituto de Arquitetura e Urbanismo – IAU/USP na cidade de São Carlos. O canteiro dispõe de nove células-teste, utilizadas em pesquisas anteriores. Essas células têm todos os dados construtivos documentados e foram implantadas no terreno levando em consideração a trajetória solar, evitando o sombreamento de uma célula-teste sobre a outra (Figura 3.4).

Figura 3.4 - Células-teste do LCC e do LCA

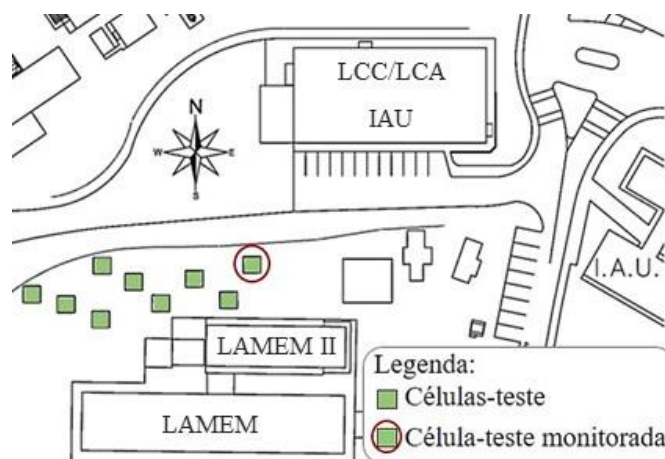


Fonte: Autor

A localização da célula-teste selecionada é indicada na Figura 3.5. A sua implantação no terreno foi feita de forma que a orientação da janela fica voltada para o norte e a orientação da fachada principal com a porta, para o leste e a direção do vento predominante da região, sudeste. Ela passou por uma nova pintura com tinta do tipo látex PVA, produzida pela indústria Sherwin Williams (Novacor), na cor extra branco, em todas as suas superfícies internas

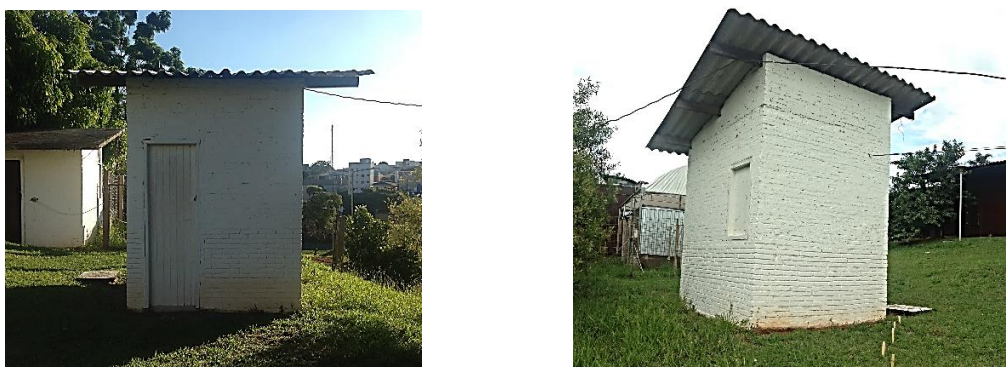
e externas (paredes, cobertura, porta e janela), exceto o piso (Figura 3.6). Uma amostra de “mdf” também foi pintada utilizando a mesma tinta, possibilitando mensurar a absorvância à radiação solar da tinta usada.

Figura 3.5 - Localização da Célula-teste



Fonte: Autor

Figura 3.6 - Célula-teste após os reparos

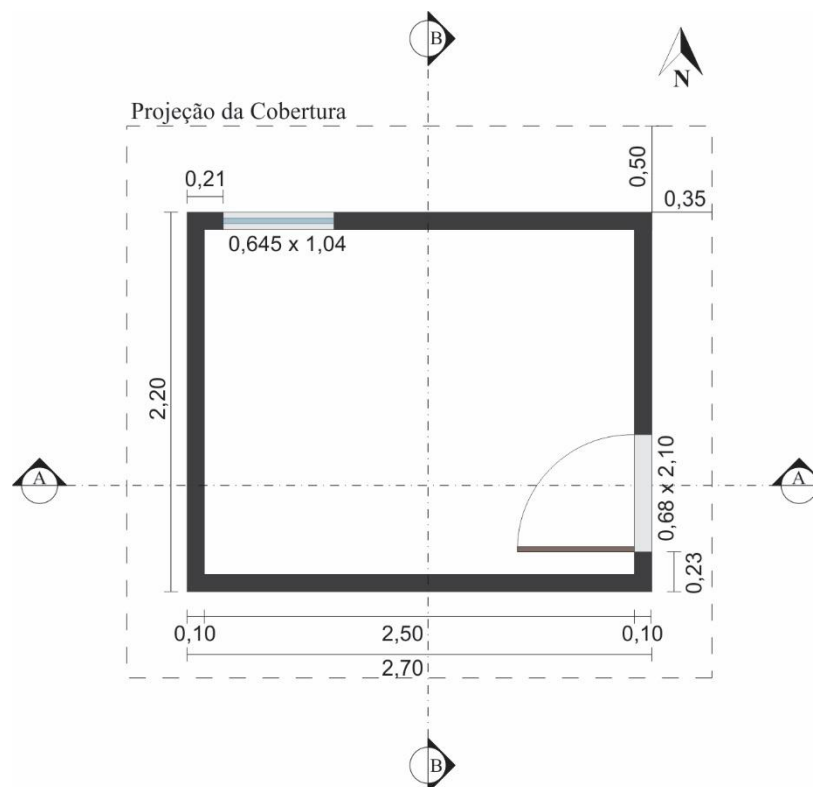


Fonte: Autor

A célula-teste possui dimensões externas de 2,20m x 2,70m e internas de 2,00m x 2,50m, com área útil de 5,00m² e altura de 2,90m na fachada principal (Figuras 3.7 e 3.8). As paredes têm 0,10m de espessura, sua construção é em tijolo cerâmico maciço (0,20 x 0,10 x 0,05m) assentados com argamassa comum de cimento. Possui piso de concreto (tipo radier com 0,14m de espessura) revestido com argamassa de cimento desempenado. Uma porta (2,10m x 0,68m) e uma janela (1,04m x 0,64m), fechadas e vedadas

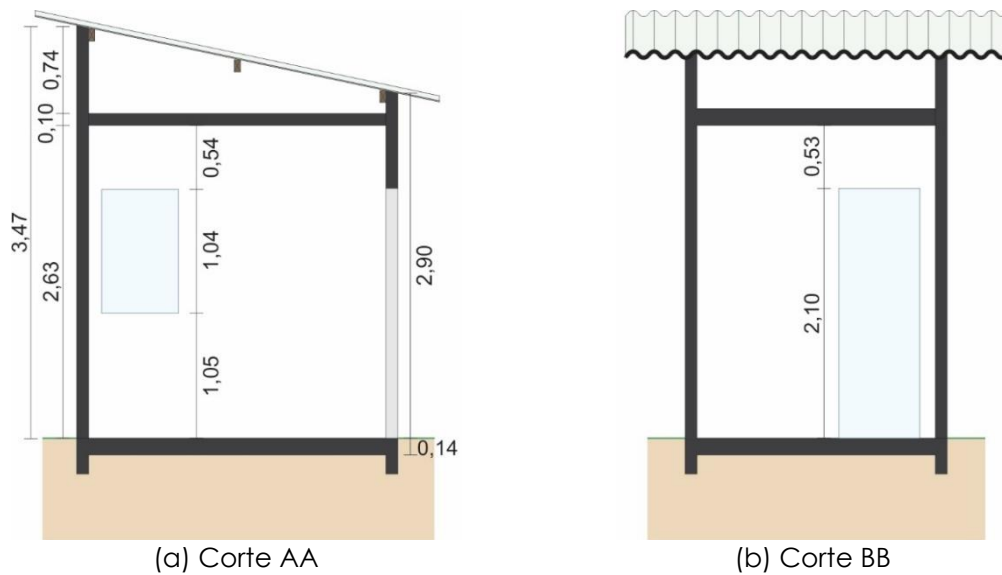
adequadamente reduzindo a infiltração (Figura 3.6). O sistema de cobertura da célula é composto por laje de blocos cerâmicos e vigotas pré-moldadas de concreto (0,10m), e do ático por telhas de fibrocimento (0,005m). Com tudo isso, pretendeu-se reduzir a influência de agentes externos interferindo nas medições no interior da célula, para auxiliar o estudo das trocas de calor pelo piso. É importante ressaltar que o ático não possui vedações, sendo este bem ventilado.

Figura 3.7 - Planta baixa da Célula-teste



Fonte: Autor

Figura 3.8 - Cortes AA e BB da Célula-teste



(a) Corte AA

(b) Corte BB

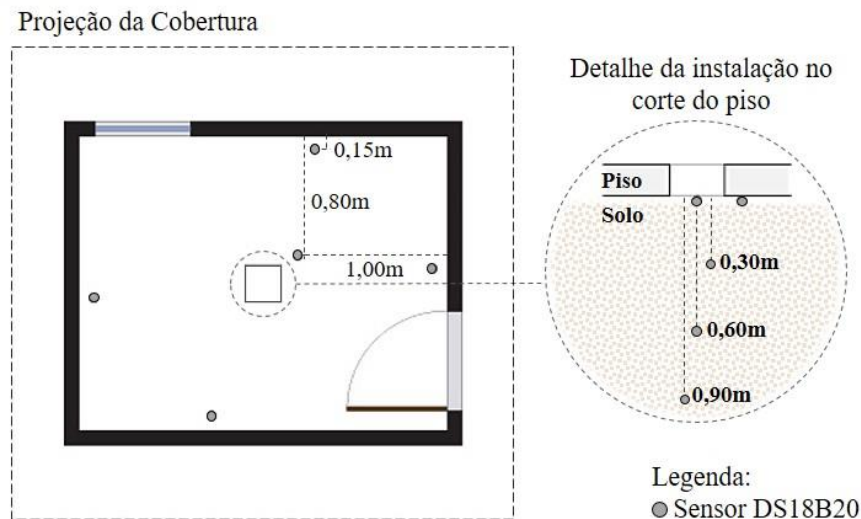
Fonte: Autor

Foram efetuadas as seguintes medições:

- A. Temperatura superficial interna do piso, uma delas próxima ao seu centro geométrico e quatro em seu perímetro (Figura 3.6);
- B. Temperatura da interface piso e solo (é feito um corte no piso na dimensão de 0,25 x 0,25m para a colocação dos sensores), detalhe apresentado na Figura 3.6;
- C. Temperatura do solo abaixo da célula-teste em três profundidades diferentes (0,30m, 0,60m e 0,90m), instalados na área de corte do piso (Figura 3.9);
- D. Temperatura superficial do solo no exterior da célula-teste. Da mesma forma que o procedimento indicado por Larsen (2011), é colocado um sensor a 0,05m da superfície, recoberto por terra;
- E. Temperatura superficial de todas as superfícies internas da célula (quatro paredes e teto);
- F. Temperatura e umidade relativa do ar no centro da célula-teste, a uma altura de 1,20m em relação ao piso, conforme indicado pela ABNT NBR 15575 (ABNT, 2013);
- G. Temperatura e umidade relativa do ar do ático. Foi colocado um sensor aproximadamente no seu centro geométrico;

H. Medição da absorvância da tinta utilizada na pintura das superfícies internas e externas da célula (os dados desse procedimento se encontram no Anexo B).

Figura 3.9 - Medições da temperatura superficial no piso e no solo



Fonte: Autor

Para as medições de temperaturas superficiais A a E foram usados 15 sensores do modelo DS18B20 *One-Wire thermometer* da marca Maxim (Figura 3.10). Estes sensores possuem resolução programável de 9 a 12 bits e precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ ("DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer - Maxim", [s.d.]). O equipamento realiza medições sequenciais dos quinze sensores, medindo um sensor a cada segundo aproximadamente e resultando em um intervalo do ciclo de medição da soma do tempo de medição dos 15 sensores. Os 15 sensores passaram por um procedimento de calibração antes da sua instalação na célula-teste (os dados desse procedimento se encontram no Anexo A). A calibração tem o objetivo de avaliar a sensibilidade de cada sensor às variações de temperatura, possibilitando obter dados confiáveis para o estudo.

Figura 3.10 - Sensor de temperatura DS18B20 One-Wire thermometer – Maxim



Fonte: Autor

As medições de temperatura e umidade relativa do ar de F e G, são feitas com o uso de HOBOS (modelo HOB0 8, marca Onset) (Figura 3.11a). Para medir a temperatura do solo no exterior é conectado ao HOB0, utilizado no interior da célula-teste, uma sonda externa (Figura 3.11b). Os valores medidos pelos HOBOS são gravados em sua memória interna, o que não possibilita o acompanhamento da medição remotamente. Sendo assim se faz necessária a retirada do HOB0 do interior da célula e do ático por alguns minutos para descarregar e salvar os dados através da conexão do sensor a um computador. A memória do HOB0 permite salvar um número limitado de dados, dessa forma, o intervalo de tempo entre as medições foi programado para 30 minutos; possibilitando assim, medir durante um mês sem nenhuma interferência de coleta de dados. O intervalo de 30 minutos foi escolhido por ser o mesmo intervalo de medição da estação meteorológica do IAU/USP¹⁰, facilitando a comparação dos dados de temperatura interna e externa da célula e do ático. Além de possibilitar também um período de medição de um mês, definido pelo limite de memória do equipamento, que é o tempo necessário para determinar uma temperatura média mensal para o solo e a temperatura interna do ar necessárias para o estudo.

¹⁰IAU/USP-SC. **PLANILHA DE DADOS METEOROLÓGICOS**. Disponível na internet via: <http://sistemas.iau.usp.br/eMeteorologica/>

Figura 3.11 - HOBO (marca Onset)



(a) HOBO



(b) Sonda externa do HOBO

Fonte: Autor

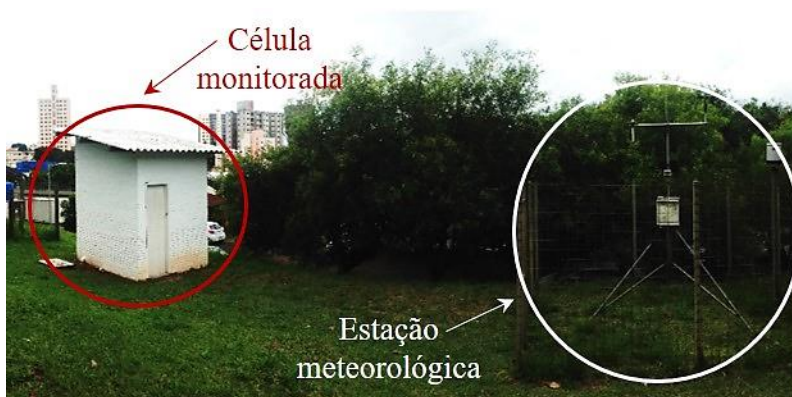
A medição de absorvância da medição H foi realizada utilizando o Espectrofotômetro da marca Varian modelo CARY 5G do Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC) do Instituto de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR) (mais detalhes sobre o procedimento estão presentes no Anexo B).

Para a verificação das medições em célula-teste e do funcionamento dos sensores de temperatura foi feito um pré-teste durante sete dias. As medições propriamente ditas foram conduzidas no período de 18 de junho a 8 de dezembro, com intervalos de falhas nas medições de 3 a 31 de agosto, de 21 a 26 de outubro, e de 2 a 9 e 15 a 17 de novembro, contando com 128 dias completos de dados. Essas falhas foram provocadas pela instabilidade da energia elétrica que ocasionou o desligamento do computador e devido a troca do computador usado para salvar os dados medidos. É importante ressaltar que, antes do início das medições, todos os sensores e computadores utilizados foram devidamente sincronizados para que não houvessem erros durante a comparação dos dados. Além disso, devido à existência de árvores nas proximidades da célula-teste, estas foram podadas periodicamente evitando o sombreamento da célula-teste.

As variáveis ambientais foram fornecidas pela estação meteorológica do IAU/USP temperatura e umidade relativa do ar externo, radiação solar global horizontal, velocidade e direção do vento, pressão atmosférica e pluviosidade. Apesar de não ser indicado o uso dos dados fornecidos pela estação para outras regiões da cidade, devido às interferências ocasionadas

pela sua implantação e seu entorno, os dados gerados pela estação são utilizados neste trabalho por representarem as condições do clima local e estar localizada ao lado da célula-teste monitorada (Figura 3.12).

Figura 3.12 - Localização da Estação meteorológica do IAU



Fonte: Autor

3.2.2 Instalação dos sensores

A instalação dos equipamentos foi iniciada após a conclusão de alguns reparos realizados na célula-teste. Os sensores de temperatura superficial DS18B20 foram instalados com fios de extensão usando conectores de ligação e entradas fêmeas RJ11. A extensão dos cabos dos sensores foi necessária para possibilitar que o equipamento de gravação dos dados ficasse localizado em uma célula-teste vizinha, evitando que o calor gerado pelo equipamento influenciasse no balanço térmico da célula-teste monitorada. A instalação dos sensores DS18B20 foi realizada da seguinte forma: o sensor foi fixado a um ponto limpo da superfície com o auxílio de fitas e cola quente, na interface entre o sensor e a superfície foi inserida pasta térmica para aumentar a superfície de contato e facilitar as trocas de calor do sistema, por fim para isolá-lo da radiação das demais superfícies foi colocada por cima do sensor uma faixa de fita metalizada (Figura 3.13).

Figura 3.13 - Instalação do sensor DS18B20



Fonte: Autor

Para possibilitar as medições do solo e da interface piso e solo foi feito um corte no piso da célula-teste em seu centro geométrico com as dimensões de 0,25 x 0,25m (Figura 3.14a). Na área do corte do piso foram executados furos para a colocação dos sensores, 3 furos em diferentes profundidades (0,30m, 0,60m, 0,90m) e 2 furos na interface solo e piso (Figura 3.14).

Figura 3.14 - Intervenção no piso para instalação do equipamento



(a) Corte no piso e furos no solo



(b) Furo na interface solo/piso

Fonte: Autor

Para medir as temperaturas do solo na área de corte do piso nas diferentes profundidades e da interface piso e solo também foram utilizados os sensores DS18B20. Da mesma forma que os sensores fixados nas diferentes superfícies, os sensores também foram envolvidos com pasta térmica, porém para estas medições, eles foram encapsulados com fita metalizada como apresentado na Figura 3.15. Para garantir o contato do sensor com o solo no interior dos furos, eles foram fixados a hastes de material isolante e presos no interior dos furos pressionando contra o fundo. Finalizada a instalação dos sensores na

área de corte do piso, esse corte foi fechado com uma tampa de isopor (0,12m de espessura) isolando o sistema de medição (Figura 3.16).

Figura 3.15 - Instalação do sensor no solo



(a) Sensor encapsulado



(b) Sensor fixado à haste

Fonte: Autor

Figura 3.16 - Sistema de medição



(a) Sistema finalizado



(b) Isolamento do sistema

Fonte: Autor

Os dados gerados pelos sensores DS18B20 foram lidos e gravados pelo programa LogTemp (versão 2.25.0.97). O programa grava os dados em arquivo de texto (.txt) e possibilita a visualização dos valores medidos em tempo real. A conexão entre os sensores e o computador foi feita por meio de um adaptador USB de rede *lan ethernet*. O computador utilizado para a gravação dos dados medidos foi instalado em uma célula-teste vizinha à célula-teste monitorada, possibilitando a checagem dos dados e o funcionamento dos sensores periodicamente sem interferir nas medições.

Para as medições de temperatura e umidade relativa do ar, o HOBO foi fixado a um anteparo no centro da célula com altura de 1,20m em relação ao piso.

Com o objetivo de evitar a influência da radiação nas medições do sensor, este foi colocado em um recipiente de alumínio fechado. O recipiente possui alguns furos, possibilitando a ventilação, a medição da umidade relativa do ar e a passagem da sonda externa conectada ao HOBO (Figura 3.17).

Figura 3.17 - Instalação do HOBO



Fonte: Autor

A sonda externa conectada ao HOBO tem seu sensor localizado no exterior da célula-teste, com a função de medir a temperatura do solo externo. O cabo da sonda sai da célula por um furo próximo ao piso, o qual foi devidamente fechado e isolado com isopor (0,08m de espessura). O sensor foi colocado a uma distância de aproximadamente 2,50m da célula monitorada e a uma profundidade de 0,05m no solo, mantendo a cobertura original do solo na área de instalação do equipamento (Figura 3.18).

Figura 3.18 - Instalação da sonda externa do HOBO



Fonte: Autor

Quanto ao HOBBO colocado no ático, este foi utilizado da mesma forma que descrito anteriormente, inserido no interior de um recipiente de alumínio fechado. Este recipiente foi preso a uma haste de metal para facilitar sua inserção no interior do ático e sua retirada durante a coleta de dados. Com o objetivo de viabilizar essas medições foi realizado, na altura do ático, um corte na parede possibilitando inserir o equipamento em seu interior (Figura 3.19). Durante as medições este corte foi devidamente fechado com o auxílio de uma “tampa” feita de madeira (espessura de 0,05m).

Figura 3.19 - Instalação do HOBBO no ático da célula-teste



Fonte: Autor

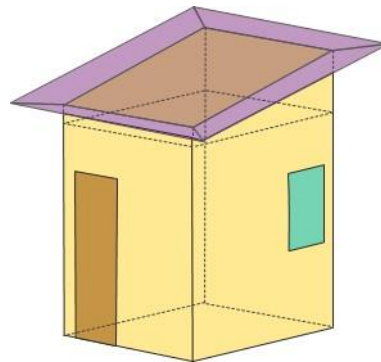
3.3 Medições e simulação

Essa etapa consiste na análise comparativa e de correlação entre a medição e a simulação. Foram realizadas simulações do modelo representativo da célula-teste, com diferentes combinações dos parâmetros de entrada do *Slab*, nos programas *EnergyPlus* (EP - versão 8.5.0) e *Slab* (versão .75). Os resultados obtidos nas simulações paramétricas são analisados e comparados aos resultados das medições em célula-teste (segunda etapa do capítulo 3 “Metodologia”). Além disso, nas análises de regressão, é investigada a sensibilidade dos resultados frente às variações dos parâmetros de entrada do *Slab*.

3.3.1 Definição do modelo virtual

Para realizar as simulações paramétricas foi definido um modelo virtual representativo da célula-teste, usada nas medições. Esse modelo possui as mesmas características da célula-teste real (geometria, dimensões, materiais e orientação solar – a caracterização da célula-teste se encontra na primeira etapa do capítulo 3 “Metodologia”) (Figura 3.20). Para a simulação do modelo foram definidas duas zonas térmicas, uma zona representa o interior da célula-teste e a outra zona o ático. A modelagem da célula-teste foi feita de forma que os beirais da cobertura representam elementos de sombreamento, e a modelagem do piso constitui um elemento único. Dessa forma, o *Slab* gera apenas uma série de valores médios mensais da temperatura da interface piso e solo e o EP, por sua vez, adota em seus cálculos esses valores para estimar o comportamento térmico do modelo.

Figura 3.20 - Modelo virtual representativo da célula-teste



Fonte: Autor

A composição da envoltória do modelo foi definida de acordo com a documentação da construção da célula-teste. Na Tabela 3.12 são apresentadas as composições e propriedades térmicas do modelo. É importante ressaltar que para as simulações os valores das propriedades do piso foram variados dentro de uma faixa de valores definidos no próximo item 3.3.2 (“Simulações paramétricas: dados de entrada”).

Tabela 3.12 - Descrição da composição e propriedades térmicas da envoltória

Fechamento	Composição	Absortância (%)	Valor U ² (W/m ² K)	Valor R ² (m ² .K/W)	Valor C ² (kJ/m ² K)
Externo	Tijolo cerâmico maciço (0,10m)	0,14	3,70	-	149
Cobertura do ático	Telhas de fibrocimento (0,005m)	0,14	4,65	-	12
Cobertura da célula-teste	Laje pré-moldada (0,10m)	-	3,11	-	189
Piso ¹	Concreto (tipo radier) + revestido com argamassa de cimento (0,14m)	-	-	0,08	328

Nota: ¹ para o piso apresenta-se o valor da resistência térmica em lugar da transmitância pela diferença na resistência superficial externa.

²as propriedades dos materiais e os cálculos da transmitância (U), resistência (R) e capacidade (C) térmicas foram efetuados conforme a norma brasileira "Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações" NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

Fonte: ABNT (2005).

A modelagem da ventilação foi feita através do módulo *Zone Ventilation* do EP, com taxas de renovação de ar fixas para o ático e para a célula em todos os modelos. A taxa de renovação de cada zona térmica foi definida com base na observação da célula-teste real durante a etapa 3.2 "Procedimento experimental" e também a partir de testes de simulação para a correta quantificação desse valor. Para a zona térmica correspondente ao ático foi definida a taxa de renovação de 170 ren/h, pois esta é bem ventilada e tem valores de temperatura do ar similares as temperaturas do ar externo. Já para a zona térmica que representa a célula, é adotada a taxa de 1 ren/h.

3.3.2 Simulações Paramétricas: dados de entrada

Este item consiste na definição parâmetros de entrada e suas respectivas faixas de variação para as simulações paramétricas. Entre os parâmetros necessários para caracterizar o modelo, são selecionados os que podem gerar maior impacto nos resultados do *Slab*. Esses parâmetros são identificados na etapa 3.1 da "Metodologia" ("Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no

programa *EnergyPlus*"). Também são avaliados parâmetros que não foram abordados na análise supracitada: o albedo e as propriedades do piso. O albedo foi selecionado por ser um parâmetro medido experimentalmente e ser pouco abordado em avaliações de desempenho. A definição da sua faixa de variação foi feita a partir da extrapolação dos valores obtidos em medição (os dados desse procedimento se encontram no Anexo C). As propriedades do piso do protótipo foram selecionadas devido à sua influência nas trocas de calor entre o edifício e o solo. A faixa de variação dessas propriedades foi definida de acordo com os valores indicados pela norma NBR15220-2 (ABNT, 2005a). A definição da faixa de variação dos demais parâmetros de entrada foi feita com base em pesquisa bibliográfica. Os parâmetros correspondentes à geometria e dados construtivos da célula-teste foram obtidos na sua documentação descritiva e mantidos fixos, com exceção para as propriedades do piso. A faixa de variação de cada parâmetro possibilita delimitar o espaço amostral a ser contemplado nas simulações subsequentes. O arquivo climático utilizado corresponde às condições climáticas da cidade de São Carlos/SP, onde está implantada a célula-teste, e também foi mantido fixo para todas as simulações (mais informações sobre o clima adotado se encontram no item 3.1.3 "Clima"). Este arquivo é modelado a partir de dados fornecidos pela estação meteorológica do IAU e da estimativa de certas variáveis ambientais não medidas pela estação (os detalhes da modelagem do arquivo climático se encontram no Anexo F).

3.3.3 Simulações Paramétricas

Nesta sub-etapa foram gerados e simulados os modelos elaborados a partir do agrupamento das variações dos parâmetros de entrada nos programas EP e o *Slab*. A faixa de variação de cada parâmetro, definida no item anterior (3.3.2 "Simulações paramétricas: dados de entrada"), é o banco de dados utilizado para o agrupamento das variações. Esse agrupamento é feito a partir da criação de uma matriz de dados, a qual é produto da combinação dos valores de cada faixa de variação, com intervalos predefinidos. A abordagem

paramétrica adotada para criação dos modelos foi feita através da versão beta do programa Parametriza (RORIZ, 2017). Esse programa permite criar uma matriz de dados e gerar automaticamente os modelos de simulação com formato “.idf”. Para a modelagem e simulação dos modelos foi adotada a forma de acionamento e interação do *Slab* com o EP identificada como a mais correta na etapa 3.1 da “Metodologia” (“Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*”). Por fim, esta série de modelos é agrupada em arquivos *EnergyPlus Group files* (EPG) na aba “*Group of Input File*” da EP-Launch e estes são executados. O arquivo EPG agrupa arquivos “.idf” auxiliando o usuário na gestão de um grande número de modelos, possibilitando executar múltiplos arquivos “.idf” com apenas um comando. O número de modelos simulados foi definido com base na quantidade de parâmetros selecionados para a análise, assim como a quantia de variações de cada um deles.

3.3.4 Pós-processamento dos resultados das simulações

Ao fim do processo de simulação foi gerado um grande número de arquivos de saída (*outputs*), fornecidos em arquivos no formato “.Slab” que é um arquivo simples que pode ser aberto como arquivo de texto no formato “.txt”. De forma que, cada *output* corresponde a uma variação de combinação dos parâmetros. Devido ao grande número de arquivos, é utilizado o programa Parametriza (RORIZ, 2017) para que os resultados de interesse, desses arquivos, sejam importados para um arquivo único no formato CSV (*comma separated variable*). O CSV é um arquivo simples de armazenamento e pode ser aberto como planilha de dados no Excel®. Esse procedimento possibilita o tratamento de muitos dados de forma conjunta e rápida, agilizando esse processo e viabilizando a análise de muitas variações. A partir dos resultados gerados pelas simulações foram selecionados os dados de temperatura da interface piso e solo (médias mensais). Esses dados são utilizados para as análises das sub-etapas subsequentes.

3.3.5 Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro

Neste item foi desenvolvida uma análise comparativa entre os resultados das simulações paramétricas e os valores obtidos por meio de medição (etapa 3.2 “Procedimento experimental”). Para a realização da análise foram utilizados os resultados da temperatura média mensal da interface piso e solo, gerados pelo *Slab* e obtidos nas medições em célula-teste. Além disso, foram selecionados apenas os resultados referentes aos meses com maior quantidade de dados oriundos da medição. Inicialmente, a análise comparativa foi desenvolvida observando a frequência de ocorrência dos erros (temperatura simulada – temperatura medida), distribuídos em faixas de diferença de temperatura. Em seguida, averiguou-se o percentual de ocorrência de erro de cada valor adotado para os parâmetros selecionados, comparando-o com os valores mais próximos das condições reais obtidos por meio de ensaios experimentais. Para tal, foram desenvolvidos ensaios com o solo e com a grama (cobertura da superfície do solo) presentes próximos à célula-teste. Foram realizados ensaios de caracterização do solo (ensaios de determinação da densidade do solo, de análise granulométrica, de determinação do teor de umidade e classificação do solo), medição da condutividade térmica do solo com uso de sonda térmica e medição do albedo da grama com uso do espectrofotômetro (detalhes sobre esses procedimentos se encontram nos Anexo C, D, E, respectivamente). A partir desses ensaios também foi identificado o modelo de menor erro composto por combinações de parâmetros mais próximas da realidade para o mês de outubro. O mês de outubro foi selecionado por ser o mês no qual foram desenvolvidos os ensaios com o solo, tendo em vista que as propriedades do solo variam com o tempo é essencial analisar os resultados do mesmo mês. Para a identificação do modelo, foram aplicados filtros em uma planilha eletrônica com todas as combinações e seus respectivos erros em relação a medição. Após identificar o modelo, foi verificado o valor do erro permitindo avaliar se o *Slab* funciona corretamente ou não quando adotados parâmetros

próximos da realidade. Também foi comparado à medição, o resultado de um modelo simulado com os mesmos dados de entrada que o modelo de menor erro, porém, usando o dado de temperatura média mensal do ar interna simulada no EP.

Posteriormente, foi realizada a análise de correlação para avaliar a relação entre os parâmetros de entrada com o erro (temperatura simulada – temperatura medida), podendo determinar quais parâmetros têm maior potencial de impacto na simulação. Salienta-se que neste estudo a análise foi global, de forma que foram avaliados os efeitos da variação de todos os parâmetros ao mesmo tempo. Para tal, foi adotado o método estatístico de regressão linear, por ser um método abrangente e que requer moderado custo computacional. A regressão permitiu investigar de que forma as variáveis independentes (parâmetros de entrada) se relacionam com a variável dependente (variável resposta). Em consequência do número de parâmetros selecionados, essa análise de regressão é do tipo multivariada e foi aplicada com o auxílio do programa OriginLab®. Essa análise gera a equação que estima o erro e o coeficiente de determinação (R^2). A Equação 3.3 ilustra a forma geral dessa relação, em que y corresponde à variável dependente (variável resposta) em função da variação das variáveis independentes (parâmetros de entrada – x_1, x_2, \dots, x_n). O parâmetro β_0 corresponde ao intercepto do plano de regressão, n consiste no número de combinações e β_j corresponde ao coeficiente de regressão de cada variável independente.

Equação 3.3

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^n \beta_j x_j$$

O R^2 indica o percentual que a variação da variável dependente é explicada pela variação da variável independente e pode variar entre 0 e 1. Esse coeficiente permite avaliar a precisão da equação. Para desenvolver a

análise e validar a equação, também foram utilizadas todas as combinações da simulação paramétrica que geraram resultados para os meses com maior quantidade de dados oriundos da medição. Posteriormente, os valores estimados pela equação e os valores gerados na simulação foram plotados em um diagrama de dispersão para verificação da correlação entre eles. Tendo-se verificado a correlação, o impacto de cada variável foi avaliado com base nos coeficientes de regressão. Através desses coeficientes foi possível observar o potencial de impacto de cada parâmetro no erro, e se sua relação é direta (coeficientes positivos) ou inversa (coeficientes negativos). Este estudo não apresenta testes de significância dos coeficientes e também não são apresentadas as estimativas dos erros padrões.

3.3.6 Análise de regressão

Neste item foi feita uma análise de regressão a partir dos dados simulados, a fim de verificar o grau de correlação entre os parâmetros avaliados e o resultado gerado pelo *Slab* para a temperatura da interface piso e solo, para o edifício em questão (célula-teste). A análise foi desenvolvida da mesma forma e com as mesmas combinações de parâmetros descritos no item anterior (3.3.5 "Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro"), porém, nesta a variável resposta de interesse é a temperatura da interface piso e solo simulada. Para verificar a precisão da equação foi observado o coeficiente de determinação (R^2). Obtendo-se um R^2 que indique que o modelo de equação gerado é capaz de explicar os dados, foi realizada a validação da equação através da sua aplicação com as mesmas combinações usadas na análise de regressão. Em seguida, foi plotado um diagrama de dispersão para verificar a correlação entre os valores de temperatura da interface piso e solo estimados pela equação e os gerados pela simulação. Por fim, foi observado o potencial de impacto de cada parâmetro na temperatura da interface piso e solo, e se sua relação é direta (coeficientes positivos) ou inversa (coeficientes negativos). Com tudo isso, foi possível investigar a importância relativa de

cada variável e indicar quais delas deve-se ter mais atenção durante a modelagem no *Slab*.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, inicialmente (item 4.1) são apresentados testes do impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*, em uma habitação de interesse social unifamiliar térrea, naturalmente ventilada. Posteriormente, (item 4.2) são mostrados os resultados do procedimento experimental. Foi observada a evolução das temperaturas na célula-teste e sua relação com o regime térmico do solo. Em seguida, (item 4.3) são apresentadas as medições e a simulação. Foi identificado qual modelo simulado gerou menor erro e se o *Slab* funciona corretamente.

4.1 Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*

Esta subseção apresenta os resultados das simulações descritas na etapa “Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*” (subseção 3.1), no capítulo 3 “Metodologia”, que foram também publicados em um artigo científico publicado na revista *Ambiente Construído*¹¹. As simulações são divididas em 9 subgrupos, os quais são descritos na Tabela 3.4 no item 3.1.5 “Dados de entrada e variação das simulações”. Os resultados são organizados de acordo com o tipo de análise conduzida, conforme indicado a seguir:

- (Item 4.1.1) Acionamento do *Slab* interna ou externamente ao EP (simulações do subgrupo 1);
- (Item 4.1.2) Uso ou não do *Slab*, com ou sem o procedimento de convergência (simulações dos subgrupos 2 e 3);
- (Item 4.1.3) Influência dos dados de entrada do *Slab* (simulações dos subgrupos 4 a 8);
- (Item 4.1.4) Influência das propriedades termofísicas do solo (simulações do subgrupo 9).

¹¹ COSTA, V. A. C. DA; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in *EnergyPlus* simulation program. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 3, p. 115–135, 2017.

4.1.1 Acionamento do *Slab* interna ou externamente ao EP

Foram realizadas simulações com as duas formas de acionamento, com os mesmos dados de entrada, conforme o procedimento indicado no item 2.2.3.3 "Funcionamento do *Slab*" e os dados de entrada descritos no capítulo 3 ("Metodologia"). Ambas as simulações apresentaram todas as variáveis de saída com valores idênticos. Isso indica que quando o *Slab* é acionado internamente, ele funciona corretamente. Além disso, como ele foi rodado apenas uma vez quando acionado externamente, isso confirma que o mesmo ocorreu quando ele foi acionado internamente, ou seja, não são feitas iterações em busca da convergência.

A partir desse resultado, em todas as simulações posteriores o *Slab* passou a ser acionado internamente ao EP.

4.1.2 Uso ou não do *Slab*, com ou sem o procedimento de convergência

De acordo com o apresentado no capítulo 3 "Metodologia" (subgrupo 2 das simulações), foram analisadas as seguintes situações, referentes ao uso ou não do *Slab*:

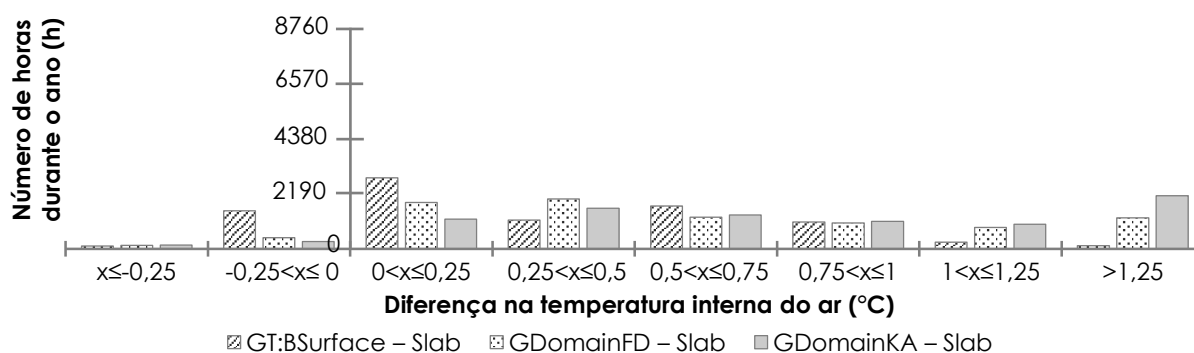
(Subgrupo 2, variação A) *Slab*. Uso do *Slab*, com a adoção do procedimento de convergência e a simulação preliminar feita com a camada de isolamento no piso.

(Subgrupo 2, variação B) GT:BSurface (*Site: Ground Temperature: Building Surface*). Sem o *Slab*, com a temperatura da interface solo e piso igual à média mensal da temperatura do ar do arquivo climático.

(Subgrupo 2, variação C) GDomainFD (*Site: Ground Domain: Slab with FiniteDifference*). Sem o *Slab*, com a adoção do método de cálculo FiniteDifference.

(Subgrupo 2, variação D) GDomainKA (*Site: Ground Domain: Slab with KusudaAchenbach*). Sem o *Slab*, com a adoção do método de cálculo KusudaAchenbach.

Figura 4.1 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes com o *Slab* e outras alternativas



Os resultados são apresentados na Figura 4.1. Ela indica a quantidade de horas do ano em que a diferença entre a temperatura interna do ar horária dos casos 2B, 2C, 2D e do caso *Slab* (caso 2A) encontra-se dentro de certos limites definidos no eixo x. Sendo que os valores positivos correspondem a temperaturas internas do ar dos casos 2B, 2C e 2D superiores ao caso *Slab*, e nos valores negativos ocorre o oposto. Observa-se que o não uso do *Slab* causa considerável impacto na temperatura interna do ar horária, que se eleva na maior parte das horas do ano para as três alternativas. O caso GT:BSurface apresenta diferenças menores ou iguais a $+0,5^{\circ}\text{C}$ em 63,8% do tempo. Já tanto no caso GDomainFD quanto no GDomainKA, as diferenças são ligeiramente superiores e as suas distribuições bastante similares entre si. Tem-se valores acima de $+1,25^{\circ}\text{C}$ em 14% e 24% das horas do ano, respectivamente, com valor máximo de $+3,06^{\circ}\text{C}$ no caso GDomainKA.

Ao se optar pela utilização do *Slab*, Andolsun et al. (2012) afirmam que, para obter-se resultados mais precisos, é necessário que haja a convergência da temperatura interna do ar. O resultado final convergido é o mais correto, por se referir à mesma combinação de temperaturas médias mensais do solo e internas nos dois algoritmos de cálculo: o do EP e o do *Slab*. Antes do procedimento de convergência, é efetuada uma simulação preliminar, para se obter a primeira estimativa das temperaturas internas, que são dados de entrada do *Slab*. Tanto o procedimento de convergência quanto a simulação preliminar são descritos no item 2.2.3.3 “Funcionamento do *Slab*”.

Com isso, o segundo teste se refere à verificação do impacto da adoção do procedimento de convergência, considerando-se também distintas alternativas de modelagem no EP para a simulação preliminar. Foram comparados seis casos (detalhados no capítulo 3 "Metodologia", simulações do subgrupo 3):

(Subgrupo 3, variação A) Slab. Com o procedimento de convergência e a simulação preliminar, considerando uma camada de isolamento no piso. Foram necessárias 7 iterações.

(Subgrupo 3, variação B) T_{18°C}. Com o procedimento de convergência e a simulação preliminar, sem isolamento no piso e temperatura do solo igual a 18°C, que é o mínimo valor permitido pelo EP. Foram necessárias 6 iterações.

(Subgrupo 3, variação C) T_{25°C}. Com o procedimento de convergência e a simulação preliminar, sem isolamento no piso e temperatura do solo igual a 25° C, que é o máximo valor permitido pelo EP. Foram necessárias 7 iterações.

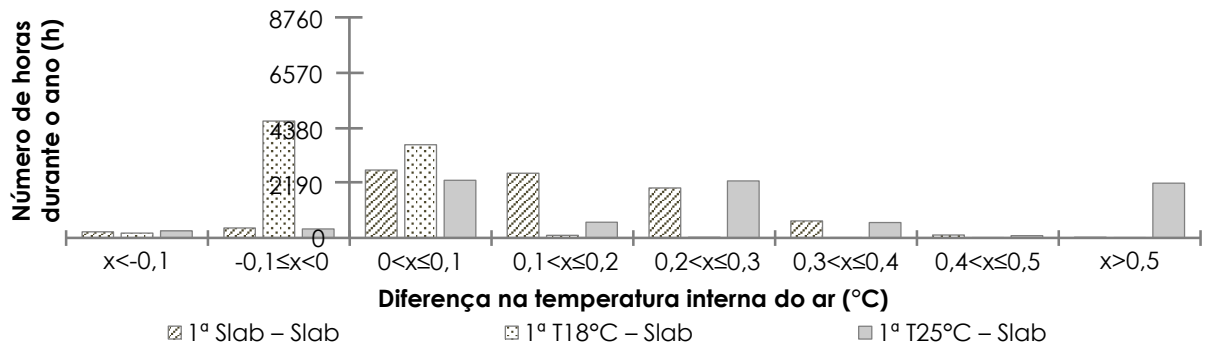
(Subgrupo 3, variação D) 1ªSlab. Igual ao caso 3A, mas encerrando-se a simulação após a primeira rodada do EP/*Slab*.

(Subgrupo 3, variação E) 1ªT_{18°C}. Igual ao caso 3B, mas encerrando-se a simulação após a primeira rodada do EP/*Slab*.

(Subgrupo 3, variação F) 1ªT_{25°C}. Igual ao caso 3C, mas encerrando-se a simulação após a primeira rodada do EP/*Slab*.

Como esperado, os casos 3A, 3B e 3C, ao final do procedimento de convergência, resultaram na mesma combinação final de temperatura interior e do solo. Também necessitaram de quantidades de iterações para se atingir a convergência muito similares entre si. Já Andolsun et al. (2012) indicaram uma redução significativa da quantidade de iterações ao adotarem um caso similar ao 3A (com uma camada de isolamento na simulação preliminar). Isso se deve possivelmente aos valores iniciais de temperatura interior adotadas para inserção na primeira rodada do EP/*Slab*, que já se encontravam próximos do seu resultado final.

Figura 4.2 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes do procedimento de convergência



O impacto de não se adotar o procedimento de convergência (comparação entre os casos 3A, 3D, 3E e 3F), é apresentado na Figura 4.2. Essa diferença é de 0°C a 0,3°C em 83,11% das horas do ano, para o caso 3D (simulação preliminar com isolamento). Para o caso 3E (1ª T_{18°C}), as diferenças se concentram em valores entre -0,1°C a +0,1°C em 95,74% das horas do ano, apresentando uma diferença máxima de -2,01°C. E para o caso 3F (1ª T_{25°C}) é superior a +0,5°C em 24,97% do período. Ou seja, caso não seja adotado o procedimento de convergência durante o uso do *Slab*, para a edificação com estas características, a simulação preliminar sem isolamento e com 25 graus é a que apresenta a maior diferença, seguida do caso 3D (1ª *Slab*) e da com 18°C.

Essa diferença na temperatura interna é consequência da diferença na temperatura do solo adotada no EP, conforme apresentado na Tabela 4.1. É possível observar que é no caso de 25°C, em comparação aos de 18°C e com isolamento na simulação preliminar, que são observadas as maiores diferenças com relação à temperatura do solo usada no EP para essas simulações e a que seria a mais correta. Esses resultados atestam o já observado anteriormente: no piso sem isolamento, diferenças na temperatura do solo impactam diretamente a temperatura interior. A diferença entre os casos sem convergência é menor, quanto mais próxima da temperatura do solo final é feita a primeira simulação (1ª iteração). Para este caso específico, isso correspondeu à simulação preliminar de 18°C. No entanto, isso varia em

função das características do edifício e do clima, não sendo possível se estimar anteriormente a melhor solução. Como o piso não possui isolamento térmico, o que é usual nas edificações brasileiras, diferenças na temperatura do solo média influenciam diretamente no ambiente interno.

Tabela 4.1 - Tabela comparativa da temperatura do solo adotada nos casos A, B, C, D, E e F do subgrupo 3 do teste do procedimento de convergência e temperatura inicial

Mês	Diferença de Temperatura (°C)					
	(a) <i>Slab</i>	(b) $T_{18^{\circ}\text{C}} - (a) \text{ Slab}$	(c) $T_{25^{\circ}\text{C}} - (a) \text{ Slab}$	(d) $1^{\circ}\text{Slab} - (a) \text{ Slab}$	(e) $1^{\circ}T_{18^{\circ}\text{C}} - (b) T_{18^{\circ}\text{C}}$	(f) $1^{\circ}T_{25^{\circ}\text{C}} - (c) T_{25^{\circ}\text{C}}$
Jan.	22,1	0	0	+0,56	-0,16	+0,72
Fev.	22,9	0	0	+0,59	-0,23	+0,70
Mar.	22,1	0	0	+0,53	-0,18	+0,71
Abr.	21,3	0	0	+0,44	-0,13	+0,76
Mai	19,3	0	0	+0,32	+0,05	+0,90
Jun.	20,2	0	0	+0,54	+0,13	+1,71
Jul.	20,4	0	0	+0,74	+0,20	+1,91
Ago.	22,3	0	0	+1,10	+0,01	+1,70
Set.	20,6	0	0	+0,65	+0,09	+1,09
Out.	22,5	0	0	+0,72	-0,04	+0,87
Nov.	22,2	0	0	+0,65	-0,10	+0,78
Dez.	22,5	0	0	+0,64	-0,13	+0,77

Finalmente, foi verificado o impacto das diferenças na temperatura horária supracitadas na avaliação do conforto na edificação. Na Tabela 4.2 tem-se os graus-hora (°CH) de desconforto por frio, por calor e totais, bem como a porcentagem de aumento (+) ou redução (-) dos mesmos em relação ao caso 2A (*Slab*).

As outras opções refletem o comportamento já observado para a temperatura interna: os casos GDomainKA e GDomainFD são os que apresentam maior impacto (redução de 55,2% a 44,0% no desconforto total em relação ao caso *Slab*). Os casos GT:BSurface e $1^{\circ}T_{25^{\circ}\text{C}}$, são os casos que apresentam diferença intermediária (diminuindo o total de desconforto em 26,2% e 26,9%). O caso $1^{\circ}T_{18^{\circ}\text{C}}$ é o que apresenta a menor alteração (-0,2%). Esses resultados atestam o impacto considerável das alternativas estudadas tanto na temperatura interior quanto na avaliação do conforto, indicando a

importância, tanto de uso do *Slab*, quanto do procedimento de convergência. As altas diferenças observadas entre o objeto *GDomain* e o *Slab* indicam a necessidade de um melhor entendimento de ambos os métodos. Também a comparação com os dados reais medidos pode permitir a verificação do método mais adequado para o tipo de edificação em questão.

Tabela 4.2 - Horas de desconforto durante o ano

CASOS	Por frio (°Ch)	Por calor (°Ch)	Por frio - Diferença com o caso de Referência(%)	Por calor - Diferença com o caso de Referência(%)	Total (°Ch)	Total - Diferença com o caso de Referência(%)
<i>Slab</i>	4195,8	6,2	---	---	4202,0	---
GT:BSurface	3043,2	57,8	-27,4	+823,3	3101,0	-26,2
GDomainFD	2234,1	115,9	-46,7	+1751,2	2350,1	-44
GDomainKA	1731,1	151,1	-58,7	+2313,9	1882,3	-55,2
1° <i>Slab</i>	3586,6	10,8	-14,5	+72,5	3597,5	-14,3
1° T18°C	4186,5	5,9	-0,2	-5,7	4192,4	-0,2
1° T25°C	3061,0	12,1	-27,0	+93,2	3073,1	-26,8

4.1.3 Influência dos dados de entrada do *Slab*

Tendo-se verificado a importância do uso do *Slab* nas simulações de edificações com o piso em contato com o solo, surgem ainda muitas dúvidas referentes aos seus dados de entrada, especialmente no Brasil, onde há ausência de trabalhos que tratem destas questões. Para avaliar o impacto de alguns desses dados de entrada, selecionados como relevantes, foram simulados oito casos, cuja descrição detalhada encontra-se no capítulo 3 “Metodologia”. Em todos foi adotado o procedimento de convergência.

Caso de referência. Onde não foram alterados os dados de entrada citados abaixo, referentes aos casos 4 a 8.

(Subgrupo 4, variação A) Amplitude zero. Com amplitude igual a zero.

(Subgrupo 5, variação A) Evapotranspiração. Com a evapotranspiração desativada.

(Subgrupo 6, variação A) Temperatura do Slab. Com duas temperaturas do solo, a do núcleo e do perímetro.

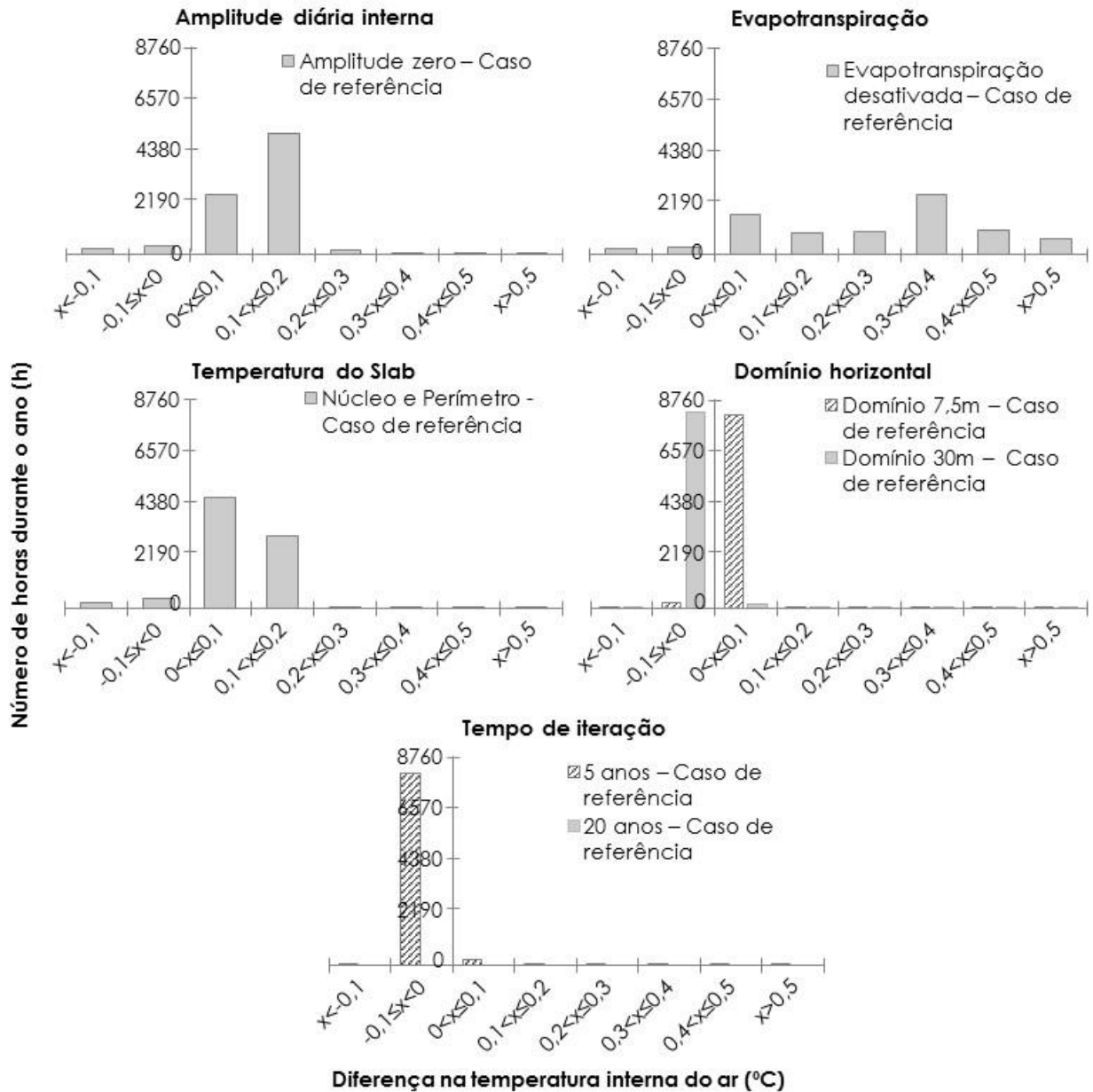
(Subgrupo 7, variação A) Domínio Horizontal. Considerando a dimensão do domínio horizontal de 7,5m.

(Subgrupo 7, variação B) Domínio Horizontal. Considerando a dimensão do domínio horizontal de 30m.

(Subgrupo 8, variação A) Tempo de iteração. Considerando a quantidade de anos de iteração igual a 5.

(Subgrupo 8, variação B) Tempo de iteração. Considerando a quantidade de anos de iteração igual a 20.

Figura 4.3 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes dos dados de entrada do Slab



A alteração que apresentou maior diferença em relação ao caso de referência foi a com a evapotranspiração desativada (Figura 4.3). Ela variou de $-1,78^{\circ}\text{C}$ a $1,13^{\circ}\text{C}$, com 50,67% das diferenças acima de $0,3^{\circ}\text{C}$. Quanto à avaliação do conforto (Tabela 4.3), este foi o parâmetro com maior impacto, com 23,8% menos graus-hora de desconforto total em um ano. Esse resultado corrobora os resultados obtidos por Bahnfleth (1989), que desenvolveu uma pesquisa em que compara a evapotranspiração ativada e desativada em

condições climáticas distintas. Ele verificou que as maiores diferenças entre o uso ou não da evapotranspiração foram apresentadas no clima quente e seco.

As outras alterações (amplitude zero, temperatura do *Slab*, domínio horizontal e tempo de iteração) apresentaram de médio a baixo impacto. A diferença desses casos em relação ao caso de referência variou de $-0,1^{\circ}\text{C}$ a $0,2^{\circ}\text{C}$ em 62,56% a 99,68% do ano, com valor máximo de $-2,37^{\circ}\text{C}$ para o caso 6A.

Quanto à amplitude, o manual do EP informa que esse dado possui pouca influência. Isso foi o observado para esta edificação, cuja amplitude média anual é igual a $5,86^{\circ}\text{C}$. Na avaliação do conforto, esse caso (4A) apresentou o número total de horas de desconforto 11% inferior ao caso de referência.

Com relação ao caso 6A (temperatura do *Slab*), Clements (2004) informa que o uso das temperaturas do núcleo e do perímetro apresentam melhores resultados de transferência de calor, se comparados ao uso da temperatura média. A simulação mais detalhada (com as temperaturas do núcleo e do perímetro) ocasionou, para este edifício, uma avaliação de desconforto total 6,7% inferior.

Já o teste do domínio horizontal foi feito para se verificar o seu impacto, pois foram encontradas informações na literatura apenas sobre o domínio vertical (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). Este aspecto apresentou um impacto de menos de 0,5% na avaliação do desconforto.

Em relação ao tempo de iteração, quando ele foi igual a 20 anos, a diferença foi sempre igual a zero. Para o período de 5 anos, a influência no graus-hora de desconforto também foi muito baixa, igual a +0,5%. Isso mostra que o período a partir de 10 anos é satisfatório para a convergência dos cálculos, de acordo com o que é sugerido pelo *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016b), e que o aumento no número de anos adotado não tem efeito nos resultados.

Tabela 4.3 - Horas de desconforto durante o ano

CASOS	Por frio (°Ch)	Por calor (°Ch)	Por frio - Diferença com o caso de Referência (%)	Por calor - Diferença com o caso de Referência (%)	Total (°Ch)	Total - Diferença com o caso de Referência (%)
Caso 4A (Amplitude zero)	4195,8	6,2	-11,1	+32,2	4202,0	-11,0
Caso 5A (Sem evapotranspiração)	3586,6	10,8	-24	+61,1	3597,5	-23,8
Caso 6A (Núcleo e perímetro)	4398,3	6,2	-6,8	+32,2	4404,6	-6,7
Caso 7A (Domínio horizontal = 7,5m)	4705,1	4,3	-0,3	+2,3	4709,4	-0,3
Caso 7B (Domínio horizontal = 30m)	4726,9	4,2	+0,1	0,0	4731,2	+0,1
Caso 8A (5 anos de iteração)	4743,9	4,1	+0,5	-2,4	4748,0	+0,5
Caso 8B (20 anos de iteração)	4719,9	4,2	0,0	0,0	4724,1	0,0
Caso de Referência	4719,9	4,2	---	---	4724,1	---

4.1.4 Influência das propriedades termofísicas do solo

Os valores referentes às propriedades termofísicas do solo estão entre os dados de entrada que geram mais dúvidas durante a simulação. A falta de informações referentes ao tema no Brasil, além da dificuldade em se definir propriedades que variam com o tempo, localização, tipo de cobertura e composição do solo.

Para verificar o impacto das propriedades do solo foram selecionados três conjuntos de valores utilizados por Bahnfleth (1989). Esses conjuntos representam o solo nas condições de alta, média e baixa condutividade, sendo que o solo com baixa condutividade é seco e o de alta condutividade é úmido. Dessa forma, foram comparados os seguintes casos:

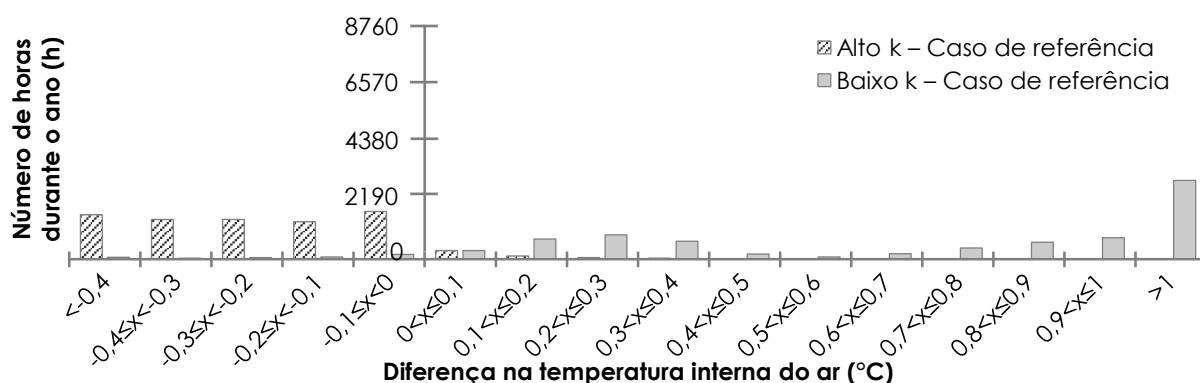
Caso de referência. Médio k. Com a condutividade média de $k = 1 \text{ W/m.K}$, $\rho: 1200 \text{ kg/m}^3$ e $C_p: 1200 \text{ J/kg.K}$

(Subgrupo 9, variação A) Solo seco. Baixo k. $k = 0,5 \text{ W/m.K}$, $\rho: 1200 \text{ kg/m}^3$ e $C_p: 1200 \text{ J/kg.K}$

(Subgrupo 9, variação B) Solo úmido. Alto k. $k = 2 \text{ W/m.K}$, $\rho: 1700 \text{ kg/m}^3$ e $C_p: 1700 \text{ J/kg.K}$

Informações mais detalhadas sobre esses casos encontram-se no capítulo 3 “Metodologia”. Todos foram simulados com o procedimento de convergência. O valor médio da condutividade foi adotado como de referência apenas para ser um parâmetro de comparação, não podendo ser considerado o mais correto. As propriedades termofísicas do solo são variáveis ao longo do tempo e do espaço, e a forma mais adequada seria a medição *in loco* de suas propriedades. A intenção do teste foi verificar se no modelo do *Slab*, variações desse valor causariam impacto na temperatura interior.

Figura 4.4 - Diferença na temperatura interna do ar horária nos testes de influência das propriedades termofísicas do solo



As diferenças entre a temperatura interna do ar são apresentadas na Figura 4.4. O caso Solo seco (baixo k) apresentou 35,11% do ano com temperatura acima de 1°C e 5,25% com temperaturas inferiores em relação ao caso médio k (caso de referência), e uma diferença máxima de $1,7^{\circ}\text{C}$. Já o caso Solo úmido (alto k) apresentou uma diferença máxima de $1,8^{\circ}\text{C}$, e 93,12% do tempo, com diferenças entre 0°C e $-0,4^{\circ}\text{C}$.

O impacto observado se refletiu significativamente no desconforto (Tabela 4.4). O caso Baixo k, apresentou 58,6% a menos de desconforto por frio em relação ao Médio k, 92,3% a mais por calor e 57,5% menos desconforto total

anual. O caso Alto k também apresentou alto impacto, com 25% a mais de desconforto total (por apresentar sempre temperaturas menores).

Tabela 4.4 - Horas de desconforto durante o ano

CASOS	Por frio (°Ch)	Por calor (°Ch)	Por frio - Diferença com o caso de Referência (%)	Por calor - Diferença com o caso de Referência (%)	Total (°Ch)	Total - Diferença com o caso de Referência (%)
Caso de referência (Médio k)	4719,9	4,2	---	---	4724,1	---
Caso 9B (Alto k)	5908,2	0,9	+25,1%	-366,6%	5909,2	+25,0%
Caso 9A (Baixo k)	1950,4	54,9	-58,6%	+92,3%	2005,3	-57,5%

4.1.5 Considerações finais

Esta etapa dos resultados investigou diferentes alternativas de modelagem dos parâmetros relacionados às trocas de calor entre o piso e o solo, com ênfase no pré-processador *Slab*, vinculado ao EP. O método consistiu em simulações computacionais de uma edificação térrea, com o piso em contato com o solo, naturalmente ventilada, localizada em São Carlos/SP, Brasil.

Os resultados indicaram que não usar o *Slab* gera uma diferença muito significativa na avaliação do desempenho. Através da inserção direta da temperatura do solo, adotada igual à temperatura do ar do arquivo climático, obteve-se uma redução dos graus-hora de desconforto totais em 26,2%. Já a adoção do objeto *Site: Ground Domain (GDomain)*, causou um impacto ainda maior no desconforto total, com diferenças de -44% para o método *FiniteDifference* e -55,2% para o método *KusudaAchenbach*. Outro aspecto verificado foi, caso aplicado o *Slab*, a necessidade do procedimento de convergência. Esse procedimento considera várias iterações entre o *Slab* e o EP, que atualmente não são executados automaticamente. Utilizando-o apenas uma vez resultou em uma redução do total anual de graus-horas de

desconforto, quando se considera a avaliação de conforto para o edifício estudado.

Quanto aos dados de entrada do *Slab*, as propriedades termofísicas do solo foram as que apresentaram maior influência. A edificação foi avaliada como sendo 57,5% menos desconfortável, com a adoção do solo seco, e 25% mais desconfortável, com o solo úmido, em comparação a um nível intermediário de umidade. A literatura aponta as dificuldades quanto a esses parâmetros, já que eles são variáveis ao longo do ano e deveriam ser preferencialmente oriundos de medição.

O estudo também indicou a relevância da evapotranspiração, da amplitude média anual e da modelagem do núcleo e do perímetro separadamente. Não considerar esses aspectos causou uma redução do desconforto total anual em 23,8, 11 e 6,7%, respectivamente. Os outros dados de entrada avaliados (dimensão do domínio horizontal e quantidade de anos de iteração) apresentaram um impacto menor ou igual a 0,5% no desconforto total.

Essas conclusões indicam uma grande necessidade de se conhecer melhor o tema investigado e através de comparação com dados reais medidos definir o processo de cálculo que melhor representa a realidade, pois há incertezas em diversos dos dados de entrada. Esta questão é especialmente relevante para as edificações brasileiras, que usualmente não são condicionados artificialmente e não possuem isolamento térmico no piso, estando sujeitas a maiores fluxos de calor através desse elemento. Há a necessidade de mais estudos que abordem o tema, de modo a possibilitar a obtenção de resultados mais próximos da realidade.

4.2 Medições em célula-teste

São mostrados a seguir os resultados das medições desenvolvidas em célula-teste no período de 18 de junho a 8 de dezembro de 2016, com intervalos de falhas nas medições de 3 a 31 de agosto, de 21 a 26 de outubro, e de 2 a 9 e 15 a 17 de novembro. Primeiramente é analisada a evolução das temperaturas na célula-teste e no solo ao longo do período de medição. Em seguida, foi selecionado um intervalo de sete dias representativo do período citado para uma análise mais detalhada.

A primeira análise se concentra nas Figuras 4.5 e 4.6. A Figura 4.5 ilustra a evolução das temperaturas na célula-teste, no solo e do ar exterior durante o período completo de medição. Tem-se as temperaturas do ar interna e externa, as temperaturas da interface piso e solo, ou seja, logo abaixo do piso, do solo a 0,90m de profundidade, no centro da célula-teste, e a temperatura do solo a 0,05m de profundidade, no entorno da edificação. Já a Figura 4.6 apresenta as temperaturas do ar interna e externa, e a temperatura do ático para o período de 21 de setembro a 9 de dezembro de 2016. É apresentado um menor período, pois o HOB0 foi instalado posteriormente com o objetivo de observar a influência do ático na evolução das temperaturas na célula-teste.

Figura 4.5 - Evolução horária das temperaturas na célula-teste e no solo no período de 18 de junho a 8 de dezembro

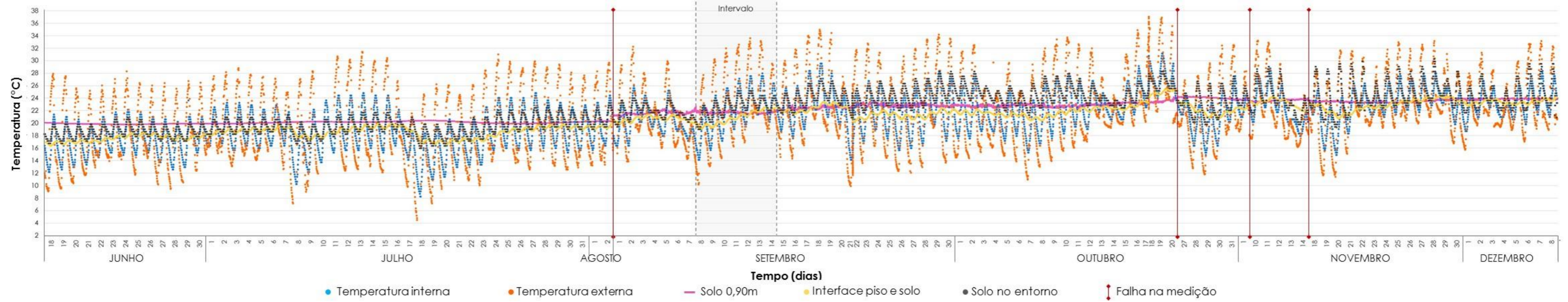
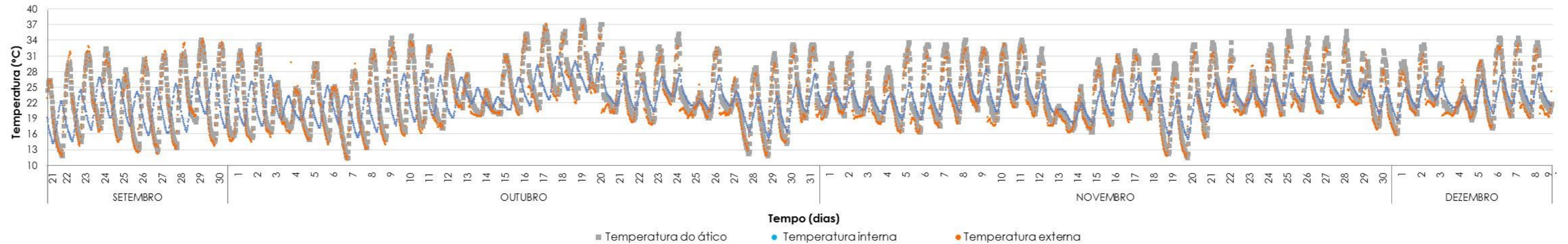


Figura 4.6 - Evolução horária das temperaturas do ar interno e externo na célula-teste e no ático



A Tabela 4.5 mostra a amplitude diária média das temperaturas interna, externa, da interface piso e solo, e a do solo (abaixo da célula-teste, a 0,30, 0,60 e 0,90m e no seu entorno) nos meses que abrangeram a medição. Na Tabela 4.6 é apresentada a temperatura média mensal do ar externo e a sua diferença em relação às temperaturas médias mensais do ar interno e da interface piso e solo.

Tabela 4.5 - Amplitude diária média mensal das temperaturas (°C)

Amplitude de temperatura (°C)	Jun. ¹	Jul.	Ago. ¹	Set.	Out.	Nov. ¹	Dez. ¹
Text	15,16	15,47	15,66	15,32	14,68	12,25	11,76
Tint	7,13	7,80	7,82	7,42	6,93	5,20	5,59
Tpiso/solo	0,65	0,79	0,70	0,81	0,71	0,66	0,60
Solo 0,30m	0,12	0,19	0,05	0,20	0,19	0,22	0,14
Solo 0,60m	0,04	0,10	0,04	0,19	0,17	0,18	0,16
Solo 0,90m	0,03	0,05	0,04	0,43	0,32	0,18	0,25
Solo no entorno	2,67	3,10	3,53	3,43	3,62	5,82	5,37

Nota: ¹É importante ressaltar que os meses de junho, agosto, novembro e dezembro não estão completos, apresentando apenas 43%, 6%, 63% e 25% do total de dias do mês medido, respectivamente.

Tint: Temperatura Interna; Text: Temperatura Externa e Tpiso/solo: Temperatura da interface piso e solo

■ Maior Amplitude (não são considerados os meses de junho, agosto, novembro e dezembro)

Tabela 4.6 - Diferença entre as temperaturas médias mensais do ar externo, interno e da interface piso e solo

Temperatura média mensal	Jun. ¹	Jul.	Ago. ¹	Set.	Out.	Nov. ¹	Dez. ¹
Text	17,98	19,21	19,93	22,08	22,78	22,86	23,46
Tint - Text	-0,80	-0,91	-0,36	-0,65	-0,28	-0,02	-0,25
Tpiso/solo - Text	-0,54	-0,70	-0,60	-0,88	-0,65	+0,03	-0,13

Nota: ¹É importante ressaltar que os meses de agosto, novembro e dezembro não estão completos, apresentando apenas 6%, 63% e 25% do total de dias do mês medido, respectivamente.

Percebe-se na Figura 4.5 e na Tabela 4.5, que a inércia térmica da envolvente da célula-teste proporcionou ao ambiente amplitudes de temperatura interna bastante inferiores às da temperatura externa. As maiores amplitudes se

concentram no mês de setembro, com exceção das amplitudes do solo no entorno, e das temperaturas do ar interna e externo, que ocorrem nos meses de outubro e julho, respectivamente. A temperatura do solo abaixo da célula-teste (a 0,90m de profundidade), apresentou uma curva de temperatura quase constante, com uma pequena amplitude diária média de $0,22^{\circ}\text{C}$ para todo o período (Figura 4.5). Apesar disso, foram observados alguns dias com amplitude diária média de até $0,67^{\circ}\text{C}$, possivelmente devido às grandes variações das temperaturas interna e externa na célula-teste nos dias anteriores. Já as temperaturas do solo no entorno e na interface piso e solo apresentaram-se mais sensíveis à variação diária das temperaturas externa e interna, respectivamente, sendo que a temperatura do solo no entorno a que sofre maior impacto (Figura 4.5 e Tabela 4.5). Embora a temperatura do solo no entorno seja mais vulnerável às variações climáticas, essa apresentou amplitudes muito inferiores às da temperatura externa, devido à presença da grama sobre o solo (Tabela 4.5). Essa cobertura de grama atua como isolante térmico e reduz a amplitude térmica nas camadas mais superficiais do solo. A temperatura da interface piso e solo se comportou de maneira semelhante à temperatura interna, porém com amplitude diária média inferior (Tabela 4.5). Na comparação entre as amplitudes de temperatura na interface piso e solo e do solo abaixo da célula-teste, é possível verificar que, a amplitude diminuiu com o aumento da profundidade, no entanto esse comportamento não se repete em todos os meses (Tabela 4.5). Já em relação ao ático (Figura 4.6), foi observada a similaridade das curvas de temperatura do ático e do ar externo, decorrente da alta taxa de ventilação no ático, ocasionada pelas aberturas entre o telhado e as empenas¹².

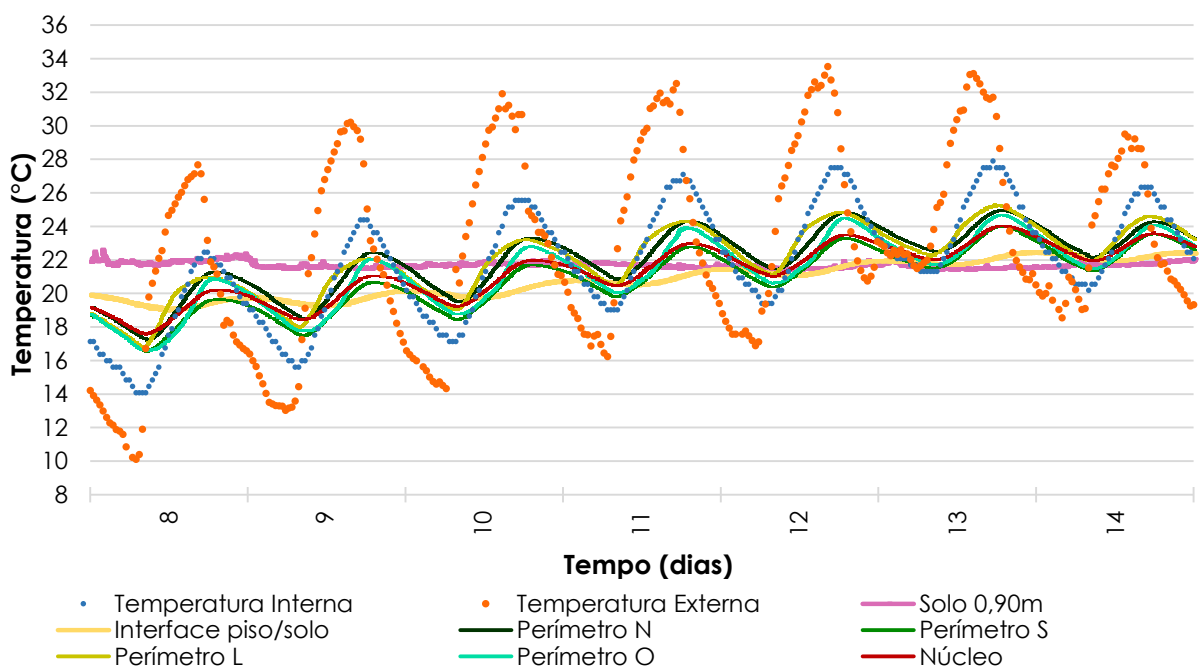
Na Tabela 4.6, nota-se que, quando comparadas as médias mensais das temperaturas interna e da interface piso e solo com a temperatura externa, a temperatura interna foi a que apresentou a maior diferença com $-0,91^{\circ}\text{C}$ no mês de julho, com variação absoluta de $0,89^{\circ}\text{C}$. Verifica-se também que, nos

¹² A empena consiste na estrutura superior às paredes externas, que fecha o vão entre a laje de teto e o telhado

meses mais frios, a temperatura interna é menor que a temperatura da interface piso e solo, de forma que, o ambiente interno ganha calor do solo e nos meses de verão o oposto acontece. As médias da temperatura interface piso e solo apresentaram uma variação de $-0,88$ a $+0,03^{\circ}\text{C}$ de diferença em relação à temperatura externa. Observar a diferença entre as temperaturas externa e da interface piso e solo é extremamente relevante, visto que as médias mensais da temperatura externa são comumente adotadas como temperatura do solo em programas de simulação computacional (PAPST, 1999; VENÂNCIO, 2007).

Foi observado que a evolução das temperaturas se comportam de maneira semelhante durante todo o período de medição, portanto para uma análise mais detalhada, foi selecionado apenas um intervalo que compreende os dias 8 a 14 de setembro (sete dias) como mostra a Figura 4.7. Esse período foi selecionado por ser representativo da medição. Também apresenta dados adicionais, as temperaturas superficiais do piso na região do núcleo (centro da célula) e nos quatro perímetros (norte, sul, leste e oeste).

Figura 4.7 - Evolução horária das temperaturas na célula-teste no intervalo de 8 a 14 de setembro



É possível observar no intervalo selecionado, que todas as temperaturas apresentadas se comportam de acordo com as variações de temperatura do ar externo, sendo o menor impacto, observado para a temperatura do solo a 0,90m. A temperatura do solo a 0,90m tende a se manter mais estável, apresentando amplitude diária máxima de 0,44°C. Em relação à temperatura da interface piso e solo, nota-se que o seu comportamento está associado às variações da temperatura interna. Percebe-se também que a temperatura da interface piso e solo reage às variações de temperatura interna com atraso térmico e baixa amplitude, efeito da resistência térmica do piso e da inércia térmica do solo. Já as temperaturas superficiais do piso (o núcleo e os perímetros), são mais sensíveis à temperatura interna, apresentando maior amplitude e variação entre elas. Tal resultado corrobora com a literatura (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990; CLEMENTS, 2004), ao atestar que a temperatura e as trocas de calor não se distribuem de forma uniforme por toda a superfície do piso.

Nas Figuras 4.8 e 4.9, são quantificadas as diferenças horárias entre as temperaturas interna e da interface piso e solo, e entre as temperaturas do núcleo ($T_{\text{núcleo}}$) e a média das temperaturas dos quatro perímetros ($T_{\text{perímetro(média)}}$) para os dias do intervalo de 8 a 14 de setembro, respectivamente.

Figura 4.8 - Diferença horária entre a temperatura interna (T_{int}) e a temperatura da interface piso e solo ($T_{piso/solo}$)

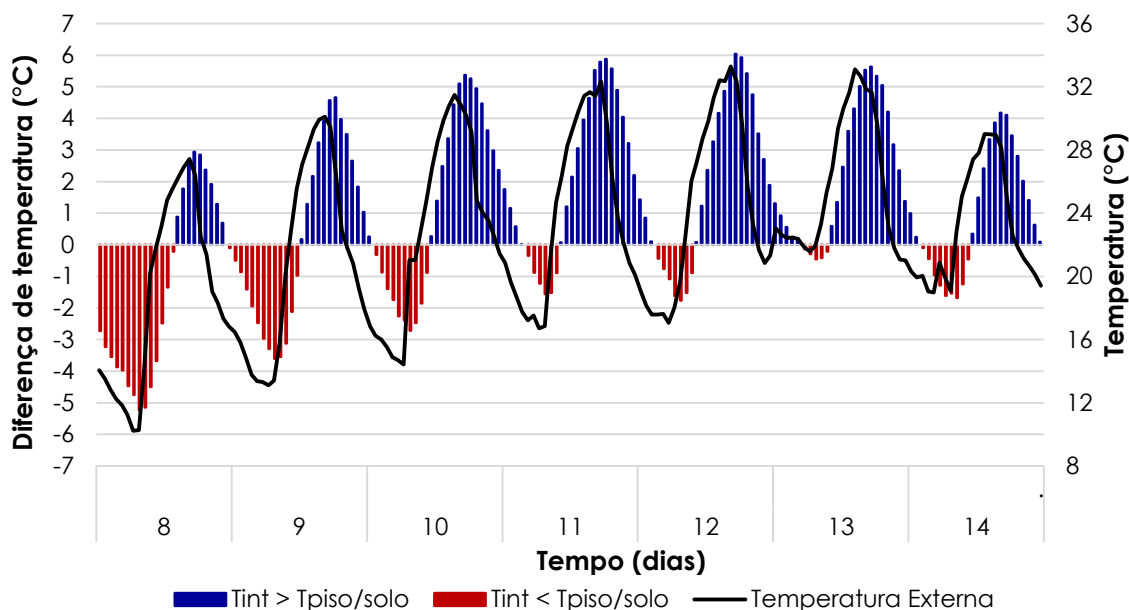
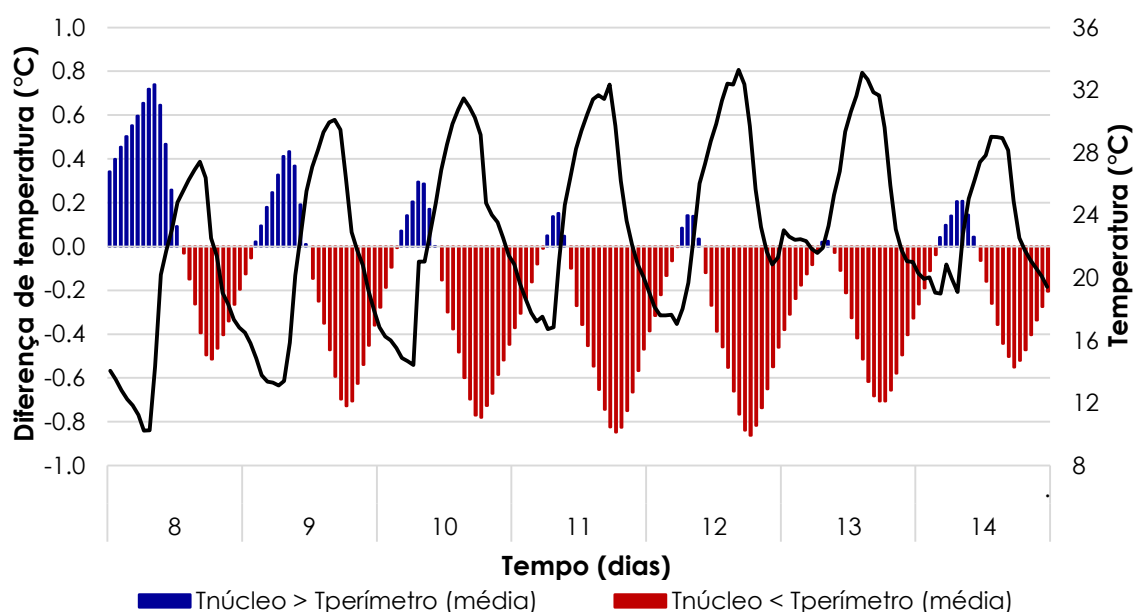


Figura 4.9 - Diferença horária entre a temperatura do núcleo ($T_{núcleo}$) e a média das temperaturas dos perímetros ($T_{perímetro(média)}$)



A Figura 4.8 mostra que houve uma variação no sentido das trocas de calor entre o ambiente interno e a interface piso e solo. Observa-se também que, para este intervalo, a temperatura interna é maior que a temperatura da interface piso e solo na maior parte do tempo e o solo ganha calor do ambiente. Percebe-se que, essa variação no sentido das trocas de calor se

relaciona com as variações de temperatura externa. O aumento da temperatura externa (as 9h) resulta no aumento da temperatura interna, o que faz com que as diferenças entre a temperatura interna e a temperatura da interface piso diminuam até que a temperatura interna seja maior (as 12h). O oposto acontece quando a temperatura externa começa a diminuir (as 17h), até que a temperatura da interface piso e solo seja maior que a temperatura interna (entre 1 e 3h). É importante destacar que nos meses mais frios o comportamento é semelhante, porém, o contrário acontece, a temperatura interna é menor que a temperatura da interface piso e solo na maior parte do tempo e o solo perde calor para o ambiente.

Em relação às diferenças de temperatura entre o núcleo e o perímetro, a Figura 4.9 mostra que a temperatura média do perímetro é superior à temperatura do núcleo na maior parte do tempo e a variação de preponderância de temperatura apresentada também tem relação com as variações de temperatura externa. Possivelmente, isso ocorre devido à influência das trocas de calor entre o perímetro do piso com as paredes da célula-teste. Além disso, o perímetro sofre mais a influência das alterações da temperatura do ar externo do que o núcleo.

4.2.1 Considerações finais

As medições em célula-teste mostraram que, apesar do solo sofrer influência das variações das temperaturas interna e externa, ele apresenta variações de temperatura muito inferiores a elas. Notou-se que a temperatura do solo tende a ficar mais constante quanto maior a profundidade, sendo que a 0,90m de profundidade o solo apresentou uma curva de temperatura quase constante, com amplitude diária média de 0,22°C para todo o período. Observou-se também que as temperaturas da interface piso e solo e superficiais do piso têm forte relação com a evolução de temperatura do ar interna, com menor impacto na temperatura da interface piso e solo. Ela apresentou amplitudes bastante inferiores à temperatura interna, isso se deve a inércia térmica do solo que faz com que a temperatura da interface piso e

solo responda às variações de temperatura interna com atraso térmico. Verificou-se também, que as variações das trocas de calor entre o ambiente interno e a interface piso e solo estão relacionadas diretamente com as variações da temperatura externa, pois ela tem um grande impacto na temperatura interna. Destaca-se nesses resultados, que as diferenças entre as temperaturas médias mensais da interface piso e solo e do ar externo ($T_{\text{piso/solo}} - T_{\text{ext}}$), não chegam a valores significativos ($-0,88^{\circ}\text{C}$ a $+0,03^{\circ}\text{C}$). Portanto, o uso da temperatura externa como temperatura do solo em avaliações de desempenho é uma alternativa quando não é possível realizar a medição ou não se tem dados suficientes para estimar esse valor. Em relação à evolução das temperaturas superficiais do piso (do núcleo e do perímetro), constatou-se que as temperaturas são diferentes dependendo da região do piso, com temperaturas superiores na região do perímetro na maior parte do tempo. O perímetro apresentou amplitudes de temperatura maiores que o núcleo, possivelmente havendo também maior fluxo de calor nessa região, como foi indicado na literatura (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990; CLEMENTS, 2004).

4.3 Medições e simulação

Esta subseção apresenta os resultados da terceira etapa da pesquisa, descrita no capítulo 3 ("Metodologia"). As análises aqui apresentadas foram realizadas com base nos dados obtidos a partir da etapa 3.2 "Medições em célula-teste" da "Metodologia" (capítulo 3), e são divididas da seguinte forma:

- Item 4.3.1 – Simulações paramétricas: dados de entrada.
- Item 4.3.2 – Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro.
- Item 4.2.3 – Simulações paramétricas: análise de regressão.

4.3.1 Simulações Paramétricas: dados de entrada

Com base nos resultados da subseção 4.1 ("Impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo no programa *EnergyPlus*") são definidos os parâmetros de entrada para as simulações paramétricas. O critério adotado para a seleção desses parâmetros é o impacto da sua variação na quantidade de graus-hora de desconforto total do modelo estudado na etapa anterior. Foram selecionados os parâmetros de maior impacto, que geram diferenças maiores que 20% nos graus-hora de desconforto total, esses parâmetros são: a evapotranspiração e as propriedades termofísicas do solo. Adicionalmente, também são estudadas as variações do albedo da superfície do solo e as propriedades termofísicas do piso da célula-teste, por serem dados de entrada que apresentam grande incerteza. Na Tabela 4.7 são apresentados os parâmetros avaliados e a faixa de variação de cada um deles. As combinações dos parâmetros selecionados resultaram no total de 10.368 modelos simulados. Os demais dados de entrada do *Slab* foram mantidos fixos com os valores de referência do programa, exceto para os dados referentes a geometria da célula-teste e a tolerância de convergência (Tabela 4.8).

Tabela 4.7 - Relação dos parâmetros avaliados e a sua faixa de variação

Parâmetros	Intervalo de variação	Variações
Albedo	0,15 – 0,75	0,15 – 0,45 – 0,75
Evapotranspiração	True – False	True – False
Propriedades do piso ¹	ρ (kg/m ³)	1760 – 2640
	C_p (J/kg.K)	800 – 1200
	k (W/m.K)	1,40 – 2,10
Propriedades do solo ²	ρ (kg/m ³)	300 – 1998
	C_p (J/kg.K)	800 – 3650
	k (W/m.K)	0,06 – 2,19

Nota: ¹ as faixas de variação das propriedades do piso foram baseadas nos dados de referência da norma brasileira “Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações” NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

² as faixas de variação das propriedades do solo foram retiradas de dados das propriedades térmicas de materiais naturais de Oke (1987).

Tabela 4.8 – Dados de entrada fixos para todos os modelos

Campo de entrada	Valor adotado
NMAT: Number of materials	–
ALBEDO: Surface Albedo: Snow	0,4
EPSLW: Surface Emissivity: No Snow	0,94
EPSLW: Surface Emissivity: Snow	0,86
Z0: Surface Roughness: No Snow (cm)	0,75
Z0: Surface Roughness: Snow (cm)	0,25
HIN: Indoor Hconv. Downward Flow (W/m ² .K)	6,13
HIN: Indoor Hconv. Upward (W/m ² .K)	9,26
FIXBC: is the lower boundary at a fixed temperature	TRUE ou FALSE
TDEEPin (°C)	–
USRHflag: is the ground surface h specified by the use	TRUE ou FALSE
USRH: User specified ground surface heat transfer coefficient (W/m ² .K)	–
IYRS: Number of years to iterate	10
Shape: Slab shape	0
HBLDG: Building height (m)	–
ConvTol: Convergence Tolerance ¹	0,05
APRatio: The area to perimeter ratio for this slab ²	1,5
SLABDEPTH: Thickness of slab on grade (m)	0,1
CLEARANCE: Distance from edge of slab to domain edge (m)	15
ZCLEARANCE: Disctance from bottom of slab to domain bottom (m)	15

Nota: ¹ o valor da de tolerância da convergência foi reduzido para obter-se resultados mais corretos, por isso não foi adotado o valor de referência.

² a relação área/perímetro da célula-teste é 0,60, porém o programa não permite o uso de valores inferiores a 1,5, portanto foi adotado o vai mínimo.

Nos campos de entrada relacionados ao isolamento do piso é inserido o valor 0, devido à ausência de isolamento no piso da edificação estudada (célula-teste).

O acionamento do *Slab* nestes modelos é realizado internamente ao EP. O acionamento interno é adotado pois essa opção facilita o processo de simulação e segundo os resultados da etapa anterior, gera resultados corretos e idênticos ao acionamento externo. Em relação ao procedimento de convergência e a simulação preliminar, estes não são adotados nesta etapa. Os modelos utilizam as médias de temperatura do ar interna medidas (Tabela 4.9) como dado de entrada das simulações, desta forma esses procedimentos não são necessários. A amplitude média diária interna referente a todo o período, também é dado de entrada fixo em todas as simulações com o valor de 7,05°C. Foram selecionados para a análise dos resultados, os meses de julho, setembro e outubro, por serem os meses com mais dados medidos.

Tabela 4.9 – Temperatura do ar interna média usado nas simulações

Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
17,19°C	18,31°C	19,57°C	21,43°C	22,5°C	22,84°C	23,21°C

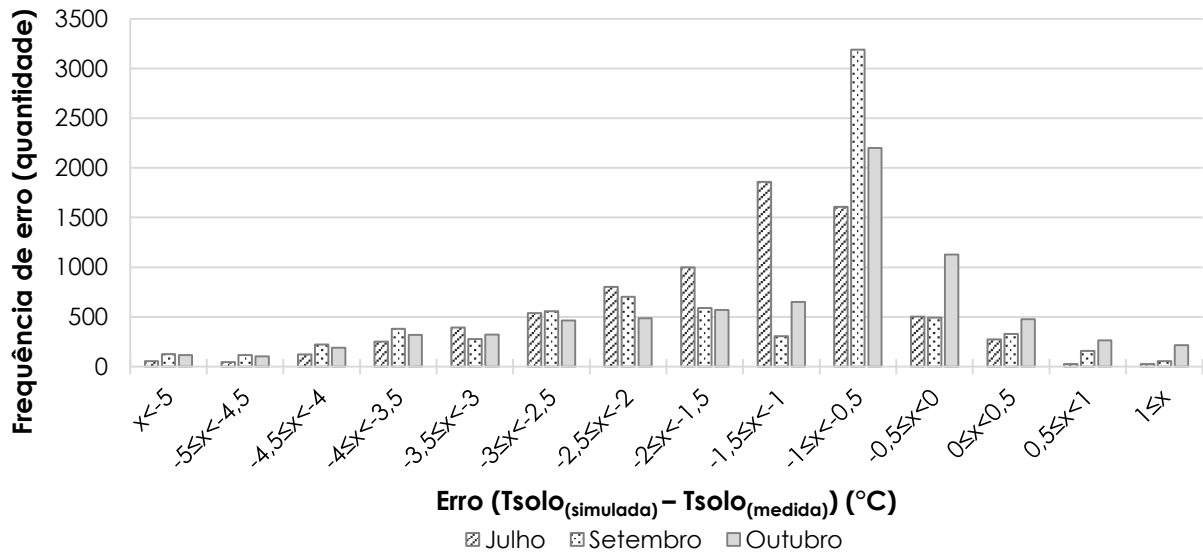
Após rodar todos os modelos, são contabilizados quantos destes geraram resultados e quantos ocasionaram falhas na simulação e conseqüentemente não produziram resultados. Foram gerados 7.506 resultados para cada mês, contando com 22518 resultados correspondentes aos três meses avaliados, os quais são insumo das análises subseqüentes. Com relação aos modelos que resultaram em falhas (2.862 modelos), o pré-processador indica que as falhas foram ocasionadas devido a erros durante os seus cálculos. Os erros consistem no cálculo de valores de temperatura irreais para o contexto.

4.3.2 Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro

A Figura 4.10 mostra a quantidade de ocorrência de erro, diferença entre a temperatura do solo simulada e a medida ($T_{\text{solo}}(\text{simulada}) - T_{\text{solo}}(\text{medida})$), de todos os modelos simulados (22.518 modelos). Essa diferença se distribui em faixas de temperatura definidas no eixo x, de forma que os valores positivos

($x > 0$) correspondem a valores da simulação superiores à medição, e nos valores negativos ocorre o oposto. Os resultados da temperatura simulada apresentaram uma grande variação de erros em relação à medida, essa diferença variou entre $-8,65^{\circ}\text{C}$ e $+2,14^{\circ}\text{C}$. Isso ocorreu devido à grande variação dos parâmetros de entrada, principalmente os relacionados ao solo e ao albedo. Apesar disso, observou-se que 61% a 66% dos erros se concentram entre 0 e -2°C , para todos os meses. Percebeu-se também que, em 92% dos modelos a temperatura do solo simulada é inferior à medida.

Figura 4.10 – Frequência de erro da temperatura simulada em relação à temperatura medida



As próximas análises foram desenvolvidas com base nos dados apresentados na Tabela 4.10. A Tabela 4.10 apresenta os valores adotados para cada parâmetro das simulações paramétricas e os valores considerados reais para as condições do estudo. Os valores considerados reais foram obtidos por meio de ensaios realizados com amostras de solo e de grama coletadas ao lado da célula-teste. Destaca-se que esses valores estão dentro das faixas de variações consideradas para as simulações paramétricas.

Tabela 4.10 – Parâmetros adotados nas simulações e os valores para as condições reais do estudo

Parâmetros		Valores adotados	Condições reais
Albedo		0,15 – 0,45 – 0,75	0,16 – 0,20 ⁵
Evapotranspiração		<i>True – False</i>	<i>True</i>
Propriedades do piso	ρ (kg/m ³)	1760 – 2200 – 2640	1760 – 2640 ¹
	C_p (J/kg.K)	800 – 1000 – 1200	800 – 1200 ¹
	k (W/m.K)	1,40 – 1,75 – 2,10	1,40 – 2,10 ¹
Propriedades do solo	ρ (kg/m ³)	300 – 866 – 1432 – 1998	1868 ³
	C_p (J/kg.K)	800 – 1750 – 2700 – 3650	800 – 1480 ²
	k (W/m.K)	0,06 – 0,77 – 1,48 – 2,19	0,80 ⁴

Nota: ¹ as faixas de variação das propriedades do piso foram baseadas nos dados de referência da norma brasileira "Desempenho térmico de edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de elementos e componentes de edificações" NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

² faixas de valores para as propriedades de solos classificados como arenosos com 40% de índice de vazios (OKE, 1987). A classificação do solo foi realizada por meio da análise granulométrica (detalhes sobre esse procedimento se encontra no Anexo D).

³ valor oriundo de ensaios de determinação da densidade do solo (detalhes sobre esse procedimento se encontra no Anexo D).

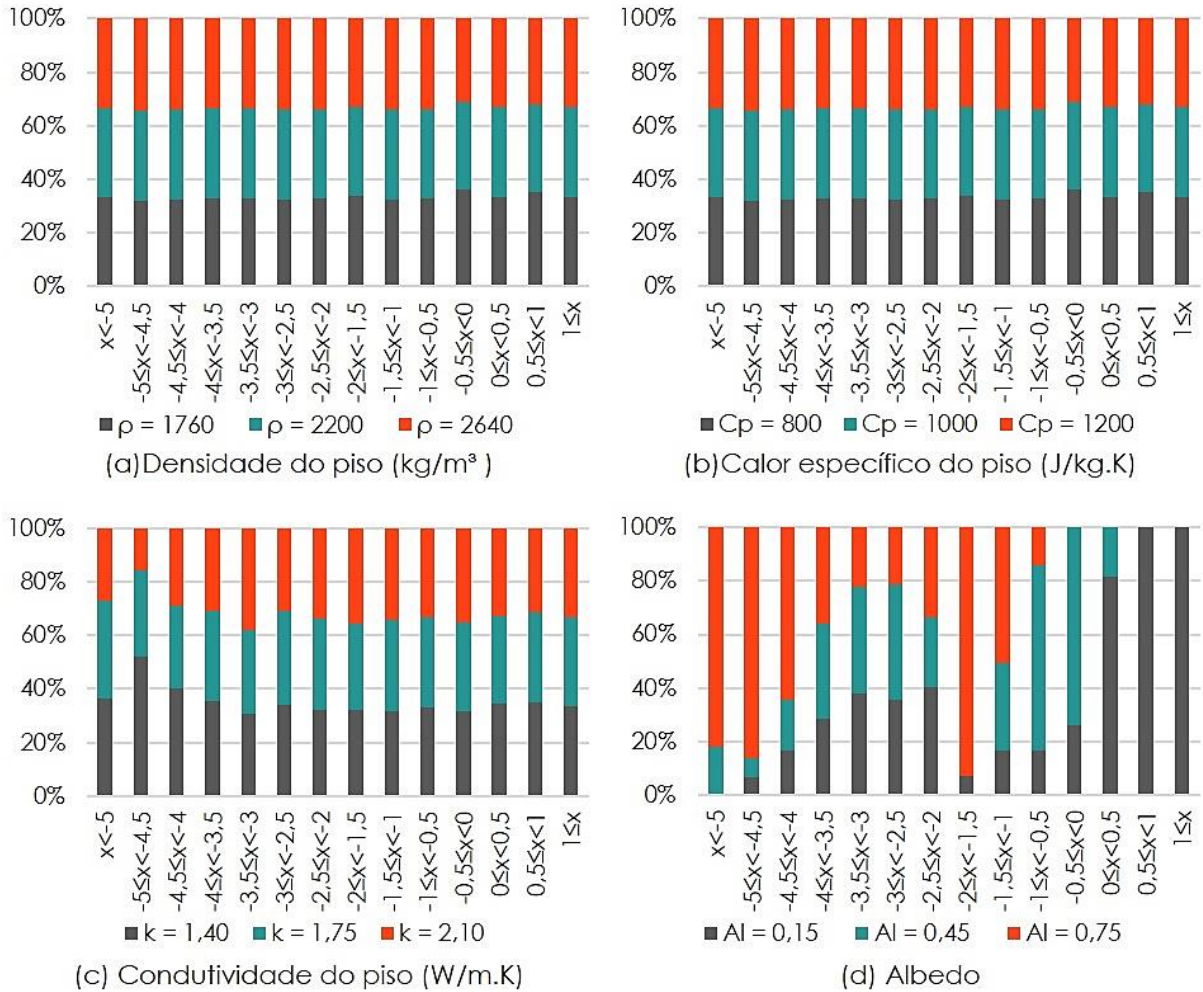
⁴ valor oriundo de ensaios de condutividade térmica do solo (detalhes sobre esse procedimento se encontra no Anexo E).

⁵ valor oriundo da medição do albedo no espectrofotômetro (detalhes sobre esse procedimento se encontra no Anexo C).

⁶ é considerado o uso da evapotranspiração como a condição mais real, por esta ocorrer naturalmente em superfícies gramadas.

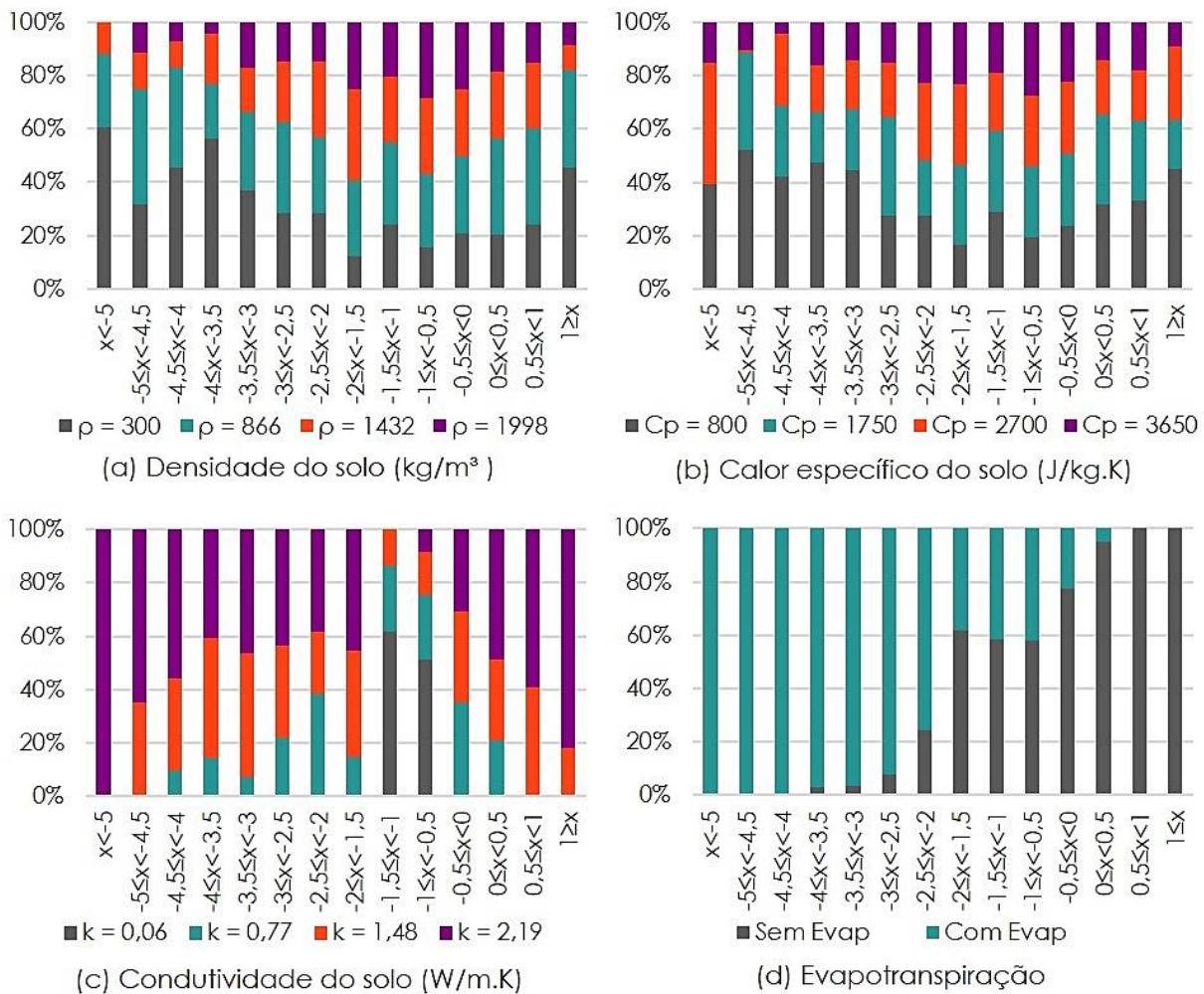
As Figuras 4.11 e 4.12 apresentam os percentuais de ocorrência de erro, de todos os resultados obtidos, para cada valor adotado em todos os parâmetros variados: as propriedades do piso, do solo, o albedo e o uso ou não da evapotranspiração. O erro está distribuído em faixas definidas no eixo x de cada gráfico.

Figura 4.11 - Percentual de ocorrência de erro de cada valor adotado para os parâmetros relacionados às propriedades do piso e do albedo



Na Figura 4.11, observa-se que os valores adotados para as propriedades do piso têm participação semelhante em todas as faixas de erro, com exceção apenas para a condutividade. Quando o modelo adotou condutividade igual a 1,40 W/m.K, este resultou em 52% dos modelos simulados com erros entre -5°C e $-4,5^\circ\text{C}$. Ressalta-se que esse comportamento está relacionado ao uso de valores reais nas simulações paramétricas para as propriedades do piso. Quanto ao albedo, os valores 0,45 e 0,75 foram os que tiveram a maior participação nos erros negativos. Já o albedo 0,15, valor mais próximo das condições reais, apresentou maior participação em erros menores, entre 0 e valores maiores ou iguais a $+1^\circ\text{C}$.

Figura 4.12 - Percentual de ocorrência de erro de cada valor adotado para os parâmetros relacionados às propriedades do solo e o uso ou não da evapotranspiração



As propriedades do solo tiveram participação variada na distribuição dos erros (Figura 4.12). A condutividade (k), por exemplo, apresentou maior percentual de erros quando adotado o valor de $2,19 \text{ W/m.K}$. Os menores percentuais de erros ocorreram, quase sempre, quando a condutividade era igual a $0,77 \text{ W/m.K}$. Destaca-se que o k igual a $0,77 \text{ W/m.K}$ é o valor mais próximo do valor real para o mês de outubro ($0,80 \text{ W/m.K}$ – ver no Anexo E), e que a sua participação nas faixas de erro de maior grandeza pode estar relacionada com a variação do k dos outros meses avaliados. Foi observado também que o k igual a $0,06 \text{ W/m.K}$ apresentou erros concentrados entre $-1,5$ e $-0,5^\circ\text{C}$, sem participação nas demais faixas. Em relação a densidade do solo (ρ), esta apresentou os maiores erros com os valores de 300 e 866 kg/m^3 e os menores

com 1998kg/m^3 , sem participação deste último nos erros acima de -5°C . Esse resultado vai de encontro com a densidade medida experimentalmente (ver no Anexo D), igual a 1868kg/m^3 , que é próxima à densidade 1998kg/m^3 simulada, com os menores erros. Já o calor específico (C_p), segundo dados da literatura, para o tipo de solo estudado, está entre 800 e 1480 J/kg.K , entretanto, as simulações com o C_p igual a 800J/kg.K apresentaram a grande ocorrência nos erros. O C_p igual a 3650J/kg.K apresentou participação baixa nos erros e os C_p igual a 1750 e 2700 J/kg.K média participação. Essa grande variação na participação dos parâmetros relacionados ao solo é devido à variação das suas propriedades ao longo do tempo. Em relação a evapotranspiração, Figura 4.12, os menores percentuais de erros ocorreram quando ela estava desativada, apesar disso, em condições reais a evapotranspiração é um fenômeno que ocorre naturalmente em superfícies gramadas. Dessa forma, isso indica que possivelmente os erros presentes nos modelos com o uso da evapotranspiração devem-se ao efeito de outros parâmetros.

Posteriormente, foram identificados quais modelos são compostos por combinações de parâmetros mais próximos da realidade, para o mês de outubro, segundo os dados apresentados na Tabela 4.10. Para tal, foram aplicados filtros nos parâmetros que compõem os modelos por meio de planilha eletrônica. Inicialmente foram selecionados apenas os modelos que usaram a evapotranspiração ativa e o albedo igual a $0,15$. A partir dessa filtragem inicial, foram aplicados filtros para os parâmetros do solo que foram medidos experimentalmente, a densidade (1998kg/m^3) e a condutividade ($0,77\text{ W/m.K}$). Com base nessa filtragem, todos os modelos apresentaram C_p igual a 800 J/kg.K . Através desses critérios foi selecionado o modelo que apresentou o menor erro (Tabela 4.11). Ressalta-se que a avaliação do erro foi realizada utilizando como referência a temperatura média mensal da interface piso e solo medida.

Tabela 4.11 – Combinações de menor erro com as variáveis mais próximas às condições reais

Parâmetros		Menor erro (+0,0021°C)
Albedo		0,15
Evapotranspiração		1
Propriedades do piso	ρ (kg/m ³)	2640
	C_p (J/kg.K)	1200
	k (W/m.K)	1,75
Propriedades do solo	ρ (kg/m ³)	1998
	C_p (J/kg.K)	800
	k (W/m.K)	0,77

Tendo-se identificado o modelo de menor erro, a temperatura média mensal do solo ($T_{\text{solo}}(\text{menor erro})$) foi comparada à temperatura média mensal medida ($T_{\text{solo}}(\text{medida})$). Também foi comparada à temperatura medida, a temperatura do solo de um modelo igual ao de menor erro, porém, este usou as temperaturas médias mensais do ar interna simulada como dado de entrada do *Slab* ($T_{\text{solo}}(T_{\text{int}}/\text{simulada})$) (foram realizadas 6 iterações para obter a convergência).

A Tabela 4.12 mostra o erro entre as temperaturas do solo $T_{\text{solo}}(\text{menor erro})$, $T_{\text{solo}}(T_{\text{int}}/\text{simulada})$ e a medida na etapa “3.2 Procedimento experimental”, no mês de outubro. Sendo que os valores positivos correspondem às temperaturas superiores à medida. É possível observar as temperaturas obtidas pelo *Slab* ($T_{\text{solo}}(\text{menor erro})$ e $T_{\text{solo}}(T_{\text{int}}/\text{simulada})$) apresentaram valores de temperaturas superiores à medida. O modelo de menor erro apresentou uma diferença muito pequena em relação à medida, de +0,0021°C. Esse modelo atesta que, o *Slab* funciona corretamente, e que quando utilizados parâmetros adequados, este gera resultados que representam com precisão a realidade. Notou-se que o $T_{\text{solo}}(T_{\text{int}}/\text{simulada})$, foi a temperatura com maior diferença em relação à medida, erro de +5,84°C, isso se deve a erros na temperatura do ar interna oriundos da modelagem da célula-teste no EP. Esse resultado ressalta a importância da correta modelagem no EP e do impacto dos resultados dessa modelagem nos resultados do *Slab*.

Tabela 4.12 – Erro na temperatura média mensal do solo em relação a valores medidos (°C)

$T_{\text{solo}}(\text{medida})$	$T_{\text{solo}}(\text{menor erro}) - T_{\text{solo}}(\text{medida})$	$T_{\text{solo}}(T_{\text{int}}/\text{simulada}) - T_{\text{solo}}(\text{medida})$
22,13°C	+0,0021°C	+5,84

Com o propósito de investigar a influência dos dados de entrada do *Slab* no erro, foi aplicada a análise de regressão linear múltipla. São utilizadas para essa análise todas as 22.518 combinações correspondentes aos três meses selecionados. É importante ressaltar que a Evapotranspiração é uma variável binária, ou seja, permite adotar *True* para considerar a evapotranspiração nos cálculos de troca de calor e *False* quando ocorre o contrário. Dessa forma, são adotados os valores 1 para representar a evapotranspiração ativa e 0 quando a evapotranspiração está desativada.

A Equação 4.1 estima o erro (variável resposta), frente às variações dos parâmetros de entrada (variáveis explicativas). A equação apresenta a correlação obtida, com R^2 igual a 0,78 mostrando que existe uma relação baixa entre o erro e os parâmetros, sugerindo a existência de outros parâmetros ou relações, não avaliadas, atuantes nesse erro.

Equação 4.1

$$\begin{aligned} \text{Erro} = & \beta_0 + (-0,5065 * T_{\text{int}}(\text{média})) + (0,52317 * T_{\text{ext}}(\text{média})) + (1,38977 * \text{Evap}) \\ & + (1,8775 * \text{Al}) + (3,44836 \times 10^{-5} * \rho_{(\text{piso})}) + (7,5864 \times 10^{-5} * C_{p(\text{piso})}) \\ & + (-0,13754 * k_{(\text{piso})}) + (-6,4115 \times 10^{-4} * \rho_{(\text{solo})}) + (-2,8267 \times 10^{-4} \\ & * C_{p(\text{solo})}) + (0,53071 * k_{(\text{solo})}) \end{aligned}$$

Onde:

Erro – a diferença entre as temperaturas médias mensais da interface piso e solo simulada e a medida ($T_{\text{solo}}(\text{simulada}) - T_{\text{solo}}(\text{medida})$)

β_0 – intercepto do plano de regressão (igual a 0)

$T_{\text{int}}(\text{média})$ – temperatura interna média mensal (°C)

$T_{\text{ext}}(\text{média})$ – temperatura externa média mensal (°C)

Evap – evapotranspiração

Al – albedo

$\rho_{(\text{piso})}$ – densidade do piso (kg/m³)

$C_{p(\text{piso})}$ – calor específico do piso (J/kg.K)

$k_{(\text{piso})}$ – condutividade do piso (W/m.K)

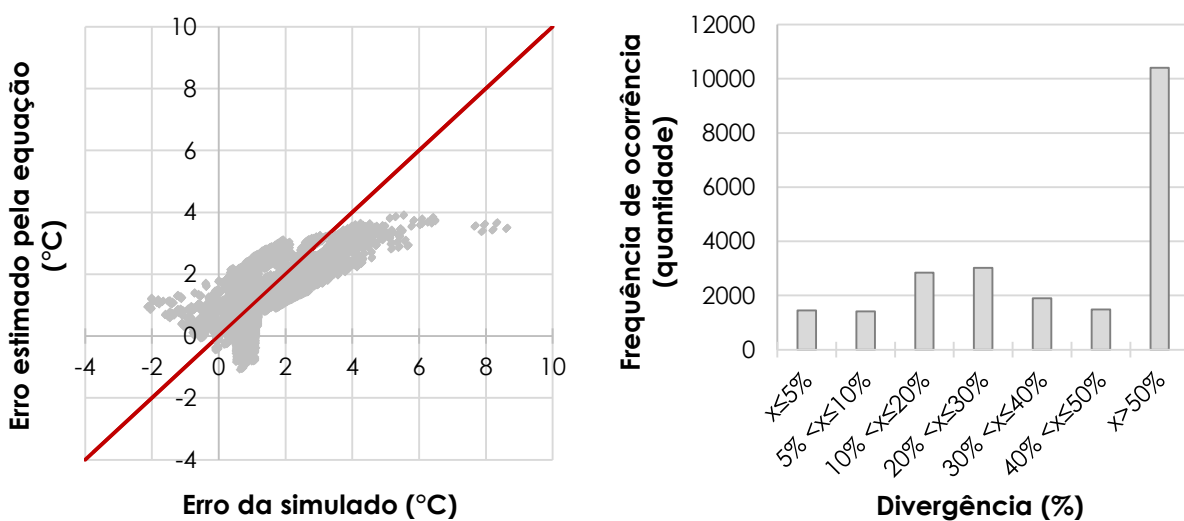
$\rho_{(\text{solo})}$ – densidade do solo (kg/m^3)

$C_{p(\text{solo})}$ – calor específico do solo (J/kg.K)

$k_{(\text{solo})}$ – condutividade do solo (W/m.K)

Fazendo-se a correlação entre o erro estimado e o erro simulado através da validação da equação, obtiveram-se o diagrama de dispersão e o gráfico de frequência de divergência entre os valores estimados e simulados, Figura 4.13a e Figura 4.13b, respectivamente. No gráfico de frequência de divergência (Figura 4.13b), foi possível observar que em 46% das ocorrências aconteceram diferenças superiores a 50% em relação aos valores simulados. Essas diferenças se distribuem na mesma proporção entre valores de erro estimado superiores (+) e inferiores (-) aos valores simulados, sendo que elas variaram entre $+3,26^\circ\text{C}$ e $-5,14^\circ\text{C}$.

Figura 4.13 - Correlação entre o erro simulado e o erro estimado segundo a Equação 4.1



(a) Diagrama de dispersão da relação entre o erro estimado e o erro simulado

(b) Frequência de divergência do erro estimado em relação ao erro simulado

Averiguou-se também o potencial de impacto das variáveis explicativas no erro estimado pela Equação 4.1, dentro de cada faixa de variação, e o sentido dessa relação, direta (+) ou inversa (-), conforme apresentado na Tabela 4.13. Adicionalmente, os coeficientes de regressão são multiplicados pelo valor máximo e mínimo de cada variável. A diferença entre esses valores

corresponde ao impacto da variação de cada variável no resultado, para os valores considerados.

Tabela 4.13 - Impacto da variação das variáveis analisadas no erro estimado pela Equação 4.1 em relação aos valores medidos “continua”

Variável	Faixa de variação	Coefficiente de regressão	Amplitude do impacto no erro (°C)
Temperatura interna média mensal (°C)	18,31 – 22,50	-0,5065	-2,12
Temperatura externa média mensal (°C)	19,21 – 22,78	+0,52317	+1,87
Albedo	0,15 – 0,75	+1,8775	+1,13
Evapotranspiração	True – False	+1,38977	+1,39

Tabela 4.13 - Impacto da variação das variáveis analisadas no erro estimado pela Equação 4.1 em relação aos valores medidos “conclusão”

Variável	Faixa de variação	Coefficiente de regressão	Amplitude do impacto no erro (°C)	
Propriedades do piso ¹	ρ (kg/m³)	1760 – 2640	+3,44836 x 10 ⁻⁵	+0,03
	Cp (J/kg.K)	800 – 1200	+7,5864 x 10 ⁻⁵	+0,03
	k (W/m.K)	1,40 – 2,10	-0,13754	-0,10
Propriedades do solo ²	ρ (kg/m³)	300 – 1998	-6,41149 x 10 ⁻⁴	-1,09
	Cp (J/kg.K)	800 – 3650	-2,82673 x 10 ⁻⁴	-0,81
	k (W/m.K)	0,06 – 2,19	+0,53071	+1,13

Os resultados indicaram que as variáveis avaliadas têm de alto a baixo potencial de impacto no erro, visto que sua amplitude variou de -2,12°C a +0,03°C. A temperatura interna (média mensal) foi a variável que apresentou o maior potencial de impacto. Esse resultado vai de encontro com os resultados da análise anterior (Tabela 4.12), onde foi constatada a grande influência da temperatura interna na temperatura da interface piso e solo (média mensal). As propriedades do piso, por sua vez, foram as variáveis com menor grau de sensibilidade na variável resposta, com amplitude de impacto entre -0,10°C e +0,03°C, semelhante à análise anterior (Figura 4.11). A correlação mostrada indica que as variáveis: temperatura interna e externa média mensal, o uso da evapotranspiração, o albedo e as propriedades do

solo são as variáveis de maior impacto no erro da temperatura da interface piso e solo média mensal. Consequentemente elas são as variáveis que devem-se ter mais cuidado na definição para obter-se uma avaliação mais correta das trocas de calor entre as edificações e o solo.

4.3.3 Simulações paramétricas: análise de regressão

Finalmente, é feita uma análise de regressão a partir dos dados simulados, a fim de verificar o grau de correlação entre os parâmetros avaliados e o resultado gerado pelo *Slab* para a temperatura da interface piso e solo, para o edifício em questão (célula-teste). Destaca-se que a intenção dessa análise não é gerar uma equação que substitua o *Slab*. Seu objetivo é analisar a influência dos parâmetros de entrada do pré-processador no resultado da temperatura da interface piso e solo. Para essa análise, foi adotado o mesmo método estatístico, as mesmas combinações e parâmetros do item 4.3.2 (“Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro”), porém nesta, a variável de interesse é a temperatura da interface piso e solo simulada ($T_{\text{piso/solo}}(\text{simulada})$).

A Equação 4.2 estima a média mensal da temperatura da interface piso e solo (variável resposta) frente às variações das variáveis de entrada (variáveis explicativas). Essa equação apresenta a correlação obtida, com R^2 igual a 0,99. Este coeficiente mostra que existe uma relação muito forte entre a temperatura da interface piso e solo e as variáveis analisadas.

Equação 4.2

$$\begin{aligned}
 T_{\text{piso/solo}}(\text{estimada}) &= \beta_0 + (0,80001 * T_{\text{int}}(\text{média})) + (1,14614 * T_{\text{ext}}(\text{média})) + (-1,386 \\
 &* \text{Evap}) + (-1,86356 * Al) + (-3,74359 \times 10^{-6} * \rho_{(\text{piso})}) + (-8,2359 \\
 &\times 10^{-6} * Cp_{(\text{piso})}) + (0,17619 * k_{(\text{piso})}) + (6,48403 \times 10^{-4} * \rho_{(\text{solo})}) \\
 &+ (2,87235 \times 10^{-4} * Cp_{(\text{solo})}) + (-0,5282 * k_{(\text{solo})})
 \end{aligned}$$

Onde:

$T_{\text{piso/solo}}(\text{estimada})$ – temperatura média mensal da interface piso e solo

β_0 – intercepto do plano de regressão (igual a 0)

$T_{\text{int}}(\text{média})$ – temperatura interna média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{\text{ext}}(\text{média})$ – temperatura externa média mensal ($^{\circ}\text{C}$)

Evap – evapotranspiração

Al – albedo

$\rho_{(\text{piso})}$ – densidade do piso (kg/m^3)

$C_{p(\text{piso})}$ – calor específico do piso ($\text{J}/\text{kg.K}$)

$k_{(\text{piso})}$ – condutividade do piso ($\text{W}/\text{m.K}$)

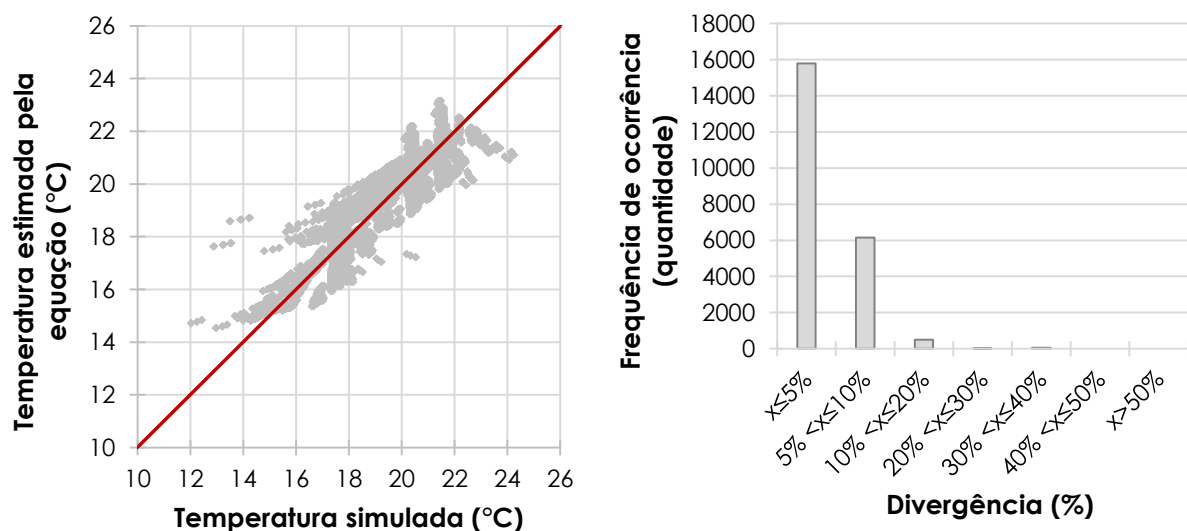
$\rho_{(\text{solo})}$ – densidade do solo (kg/m^3)

$C_{p(\text{solo})}$ – calor específico do solo ($\text{J}/\text{kg.K}$)

$k_{(\text{solo})}$ – condutividade do solo ($\text{W}/\text{m.K}$)

Para a validação da equação são utilizadas as mesmas combinações. Através do diagrama de dispersão, a Figura 4.14a ilustra a associação obtida entre a temperatura simulada e os valores estimados pela equação. A Figura 4.14b apresenta a frequência de ocorrência de divergência da temperatura estimada em relação à temperatura simulada.

Figura 4.14 - Correlação entre a temperatura do solo simulada e estimada segundo a Equação 4.2



(a) Diagrama de dispersão da relação entre a temperatura estimada pela equação e a temperatura simulada

(b) Frequência de divergência entre as temperaturas estimada pela equação e a simulada (Temperatura estimada – Temperatura simulada)

O gráfico de frequência de divergência (Figura 4.14b) apresenta 97% dos valores estimados com diferença de até 10% em relação ao valor simulado, e 70% com diferenças de até 5%. Com base nesses resultados é possível afirmar que a equação é uma alternativa adequada, na previsão da temperatura da interface piso e solo (média mensal) para as condições e para a edificação estudada (célula-teste). Dessa forma, em situações em que não é possível o uso do *Slab*, a equação apresenta-se como um método rápido e preciso de previsão desse valor.

Após a validação da equação, foi observado o grau de sensibilidade dos parâmetros de entrada do *Slab* na estimativa da temperatura média mensal da interface piso e solo através dos coeficientes de regressão (Tabela 4.14). Também é verificado qual o sentido dessa relação, direta (+) ou inversa (-), e se está coerente com o fenômeno das trocas de calor entre o piso e o solo em condições reais. O cálculo da amplitude desse impacto na temperatura da interface piso e solo é realizado da mesma forma que a análise do item 4.3.2 (“Análise comparativa entre as simulações e as medições, e a correlação dos parâmetros de entrada com o erro”).

Tabela 4.14 – Impacto da variação dos parâmetros analisados na temperatura da interface piso e solo estimada pela Equação 4.2

Variável	Faixa de variação	Coefficiente de regressão	Amplitude do impacto na temperatura (°C)	
Temperatura interna média mensal (°C)	18,31 – 22,50	+0,80001	+3,35	
Temperatura externa média mensal (°C)	19,21 – 22,78	+0,14614	+0,52	
Albedo	0,15 – 0,75	-1,86356	-1,12	
Evapotranspiração	True – False	-1,386	-1,39	
Propriedades do piso ¹	ρ (kg/m ³)	1760 – 2640	-3,74359 x 10 ⁻⁶	0,00
	Cp (J/kg.K)	800 – 1200	-8,2359 x 10 ⁻⁶	0,00
	k (W/m.K)	1,40 – 2,10	+0,17619	+0,12
Propriedades do solo ²	ρ (kg/m ³)	300 – 1998	+6,48403 x 10 ⁻⁴	+1,10
	Cp (J/kg.K)	800 – 3650	+2,87235 x 10 ⁻⁴	+0,82
	k (W/m.K)	0,06 – 2,19	-0,5282	-1,13

A variável que apresentou maior potencial de impacto foi a temperatura interna média mensal, com amplitude de impacto de $+3,35^{\circ}\text{C}$ e coeficiente de regressão $+0,80001$. O valor do coeficiente indica que a cada acréscimo de 1°C na temperatura interna (média mensal), é acrescido $0,80^{\circ}\text{C}$ no resultado. Dessa forma, a relação entre ela e o resultado é direta, ou seja, quanto maior a temperatura interna, maior é a temperatura da interface piso e solo. O efeito dessa relação está de acordo com o real, pois a temperatura do ar interna influencia de maneira significativa a magnitude e o sentido dos fluxos de calor entre o ambiente interno e o solo.

A segunda variável de maior impacto foi a evapotranspiração. Usar ou não esse fenômeno nos cálculos do *Slab* resulta na variação da temperatura da interface de $-1,38^{\circ}\text{C}$. A relação entre essas variáveis é inversa, com coeficiente de regressão negativo. Esse resultado corrobora com as análises da etapa anterior, em que se obteve valores de temperatura interna inferiores quando a evapotranspiração estava ativa.

Quanto às propriedades termofísicas do solo, a condutividade foi o parâmetro com maior sensibilidade e impacto no resultado. Ela possui um coeficiente de regressão de $-0,5282$ e gera uma variação de temperatura na interface de $-1,13^{\circ}\text{C}$. O mesmo comportamento foi observado na análise da do item 4.14 ("Influência das propriedades termofísicas do solo"), em que o k alto resultou em valores de temperatura interna inferiores quando comparado ao k médio e o inverso ocorreu para o k baixo. Em relação às demais propriedades do solo, a densidade e o calor específico, diferente da condutividade, têm relação direta com a temperatura da interface, com coeficiente de regressão de $6,48403 \times 10^{-4}$ e $2,87235 \times 10^{-4}$, respectivamente. Ambas também têm alto impacto no resultado. Essas duas propriedades do solo expressam a sua capacidade de armazenar calor validando a relação obtida.

O albedo também apresentou alto impacto, com variação de temperatura na interface de $-1,12^{\circ}\text{C}$ dependendo do valor adotado. Ele possui coeficiente de regressão negativo indicando sua relação inversa com a variável dependente. Esta variável indica o potencial de uma superfície de reflexão

solar, quanto maior o albedo, menor é a absorção de calor da superfície e conseqüentemente menor a temperatura do solo e da interface.

Em relação à temperatura externa (média mensal), ela possui médio impacto na variação de temperatura da interface (+0,52°C). A relação entre elas é direta e seu coeficiente de regressão é +0,14614. É importante destacar que apesar do modelo simulado ser pequeno, sua temperatura interna influencia muito mais na temperatura da interface do que a temperatura externa. Isso mostra a importância de se modelar a edificação corretamente e como o comportamento térmico do edifício impacta no regime térmico do solo.

Já em relação às propriedades termofísicas do piso, todas apresentam baixo impacto, com variação na temperatura da interface de +0,12°C a 0°C. A densidade e calor específico possuem coeficientes de regressão iguais ($-8,2359 \times 10^{-6}$) e relação inversa com o resultado, quanto maiores essas variáveis, mais o piso armazena calor e menor é a temperatura da interface. A condutividade, no entanto, tem relação direta (+0,17619), quando maior sua capacidade de conduzir calor, maior será a temperatura da interface.

4.3.4 Considerações finais

Essa etapa dos resultados comparou as temperaturas da interface piso e solo das simulações paramétricas com as oriundas da medição, com o propósito de investigar se o pré-processador *Slab* funciona corretamente. Além disso, foram verificados os impactos de alguns parâmetros de entrada do *Slab* na temperatura da interface piso e solo e no erro ($T_{\text{piso/solo}}(\text{simulada}) - T_{\text{solo}}(\text{medida})$). Os resultados indicaram que o pré-processador *Slab* funciona corretamente e gera resultados com precisão. Porém, para que ele gere resultados próximos da realidade, deve-se ter atenção aos parâmetros de entrada adotados, especialmente as propriedades do solo, a evapotranspiração, o albedo e a temperatura média mensal do ar interna. Verificou-se que os parâmetros relacionados às propriedades do solo são os mais difíceis de se estimar, pois estes mudam ao longo do ano. Mesmo quando utilizados parâmetros próximos da realidade, como o *Slab* possui apenas um campo de entrada

para cada parâmetro, este pode gerar erros de grandezas diferentes para cada mês. Dessa forma, o *Slab* deveria fornecer campos de entrada mensais para as propriedades do solo. Percebeu-se também, a importância do albedo e da evapotranspiração nos cálculos do *Slab* das trocas de calor entre o piso e solo, parâmetros que geralmente não são abordados nas avaliações de desempenho. Esses parâmetros apresentaram grande potencial de impacto nos resultados da temperatura da interface piso e solo e no erro. Tendo isso em vista, ressalta-se a necessidade de mais estudos que abordem esses parâmetros, para que eles possam ser definidos de forma adequada nas simulações. Constatou-se também que a temperatura média mensal do ar interna é o parâmetro de maior impacto nos resultados do *Slab*. Dessa forma, é extremamente importante que a temperatura interna simulada pelo EP esteja correta para que o *Slab* gere resultados que representem a realidade, isso indica a importância da correta modelagem no EP.

5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa investigou o funcionamento do pré-processador *Slab* frente às diferentes alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo de edificações térreas, observando qual delas melhor representa o real. Para tal, foram realizadas medições em célula-teste e verificado o impacto de distintas alternativas de modelagem buscando compreender o funcionamento do programa e identificar qual dessas opções melhor representava os dados medidos.

As medições em célula-teste mostraram que as temperaturas da interface piso e solo e superficiais do piso têm forte relação com a evolução de temperatura do ar interna, com menor impacto na temperatura da interface piso e solo. Ela apresentou amplitudes bastante inferiores à temperatura interna. Também foi possível observar que a temperatura da interface piso e solo responde às variações da temperatura interna com atraso térmico. Esse comportamento se deve à grande inércia térmica do solo. Quando estas temperaturas foram comparadas em valores horários, verificou-se que houve uma variação na predominância entre elas e que isso se relaciona diretamente com as variações da temperatura externa. Apesar disso, a sensibilidade da temperatura da interface piso e solo às variações da temperatura externa é pequena, apresentando diferença de até $0,88^{\circ}\text{C}$ na temperatura média mensal. Tendo em vista que a temperatura externa (média mensal) é comumente usada como temperatura do solo, esses resultados sugerem que essa alternativa não causa um impacto significativa nos resultados das avaliações de desempenho. Em relação à evolução das temperaturas superficiais do piso (do núcleo e do perímetro), constatou-se que as temperaturas são diferentes dependendo da região do piso, com temperaturas superiores na região do perímetro na maior parte do tempo. O perímetro apresentou amplitudes de temperatura maiores que o núcleo, possivelmente havendo também maior fluxo de calor nessa região, como foi indicado na literatura.

O impacto de distintas alternativas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo, indicou que, não usar o *Slab* gera uma diferença muito significativa na avaliação do desempenho. O uso de outras opções de modelagem do *EnergyPlus* (EP), como os objetos *Site: Ground Temperature: Building Surface* (GT:BSurface) e o *Site: Ground Domain* (GDomain), causaram um grande impacto nos graus-hora de desconforto totais, de -26,2% e de -55,2%, respectivamente, em relação ao observado com o uso do *Slab*. Quando o *Slab* foi usado, percebeu-se que, a forma de uso do pré-processador e os dados de entrada também geram grandes variações nos resultados. Quanto à forma de uso, foi observado que atualmente o *Slab* e o EP não realizam a convergência de seus cálculos automaticamente, mesmo quando o *Slab* é acionado internamente. O procedimento de convergência é necessário para que os dois algoritmos de cálculo, do *Slab* e do EP, utilizem a mesma combinação de temperaturas médias mensais do solo e internas, gerando resultados mais corretos. Foi constatado que, quando a convergência é realizada, as temperaturas iniciais do solo e interna não influenciam no resultado final. Ambas as temperaturas convergem para o valor correto de acordo com o contexto definido através dos demais dados de entrada. Em relação aos dados de entrada, em uma análise preliminar, foi observado que a condutividade do solo e a evapotranspiração têm o maior potencial de impacto frente o desconforto da habitação, causando uma variação de até 57,2% e 23,8%, respectivamente.

Na análise de regressão, investigou-se o potencial de impacto dos parâmetros de entrada do *Slab* na temperatura da interface piso e solo, por meio da regressão linear múltipla. A partir dos coeficientes de regressão da equação, com R^2 igual a 0,99, verificou-se que a variável com maior correlação foi a temperatura interna média mensal, com amplitude de impacto de +3,35°C. É interessante destacar que as propriedades do piso foram as variáveis que apresentaram menor correlação, possivelmente porque foram utilizados valores dentro das condições reais de estudo. O mesmo comportamento foi observado na análise comparativa, examinando o erro dos resultados das simulações paramétricas em relação aos valores provenientes da medição.

Nestes resultados, destacou-se a importância das variáveis evapotranspiração, albedo e as propriedades do solo, que apresentaram alto impacto, sugerindo maior cuidado para obter-se resultados mais corretos. Por fim, analisando o modelo de menor erro, com combinações próximas do real, notou-se que ele se ajustou bem à temperatura da interface piso e solo medida. Já quando foi comparada a evolução da temperatura interna horária desse modelo, houve grandes diferenças em relação à medição. Esse resultado atesta que o *Slab*, quando usado de forma adequada, funciona corretamente e gera valores muito próximos do real. Porém, ainda existem erros no modelo referentes à modelagem do EP. Isso mostra a importância da modelagem correta do modelo, tendo em vista que pode causar grandes incertezas nos resultados.

É importante destacar que as conclusões apresentadas não podem ser generalizadas a qualquer tipo de edificação, elas referem-se apenas ao modelo utilizado nesta pesquisa ou similares. Edificações maiores, multizonas, com ventilação e/ou condicionamento de ar, podem apresentar comportamentos diferentes.

Dessa forma, como contribuição à área, a presente pesquisa analisou as diferentes formas de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo e identificou a forma mais adequada de uso do *Slab*. Também foi verificado o grande potencial de impacto de algumas das variáveis de entrada dele que normalmente não são abordadas nas avaliações de desempenho. Além disso, é apresentado como síntese dessa pesquisa, um Manual do *Slab* para auxiliar e incentivar o uso do pré-processador em avaliações de edificações térreas do tipo laje de piso sobre o solo.

5.1 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- Simulações paramétricas que abordem um número maior de variáveis de entrada e abranjam mais variações de valores para cada uma delas;

- Aprofundar o estudo sobre o grau de sensibilidade dos resultados do *Slab* às variáveis de entrada e a correlação entre elas, com o auxílio de técnicas de calibração;
- Analisar o funcionamento do *Slab* com outras edificações, maiores, multizonas e com diferentes configurações de piso e diferentes tipos de solo;
- Simplificação dos dados de entrada referentes às trocas de calor entre o piso e o solo, gerando valores de referência que possam ser usados para situações similares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. **NBR 10838**: Solo - Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática. Rio de Janeiro, 1988.
- _____. **NBR 6502**: Rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.
- _____. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- _____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações Parte 3: zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, Brasil, 2005b.
- _____. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005c.
- _____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais - Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- _____. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. **NBR 7182**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986.
- ABU-HAMDEH, N. H. Thermal Properties of Soils as affected by Density and Water Content. **Biosystems Engineering**, v. 86, n. 1, p. 97–102, set. 2003.
- ADJALI, M. H.; DAVIES, M.; LITTLER, J. Review paper: Earth-contact heat flows: Review and application of design guidance predictions. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 19, n. 3, p. 111–121, 1 jan. 1998.
- ALDUCHOV, O. A.; ESKRIDGE, R. E. Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. **Journal of Applied Meteorology**, v. 35, n. 4, p. 601–609, abr. 1996.
- ALVES, A. B. M. **Potencial de climatização por dutos subterrâneos segundo zona bioclimática, profundidade e tratamento da superfície do solo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2014.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. **Revista Ambiente**, v. 8, n. 1, p. 101–111, 2 maio 2012.
- ANDOLSUN, S. et al. EnergyPlus vs. DOE-2.1e: The effect of ground-coupling on energy use of a code house with basement in a hot-humid climate. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1663–1675, jul. 2011.
- ANDOLSUN, S. et al. EnergyPlus vs DOE-2.1e: The effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. **Energy and Buildings**, v. 52, p. 189–206, set. 2012.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. Energy Estimating and Modeling Methods General Considerations Models and Approaches. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**.

Atlanta, 2009a.

_____. **ASHRAE Handbook - Fundamentals**. Thermal and water vapor transmission data. Atlanta, 2009b.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2013**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2013.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 140-2001**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, 2014.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D5334-14: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure**. In: Annual Book of ASTM Standards, 2014.

BAHNFLETH, W. P. **Three-Dimensional Modelling of Heat Transfer From Slab Floors**. University of Illinois. Urbana, Illinois, US, 1989.

BAHNFLETH, W. P.; PEDERSEN, C. O. **A three-dimensional numerical study of slab-on-grade heat transfer**. ASHRAE Transactions. St. Louis, MO (United States): 1990, 1990.

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Influências dos algoritmos de condução e convecção sobre os resultados de simulações do comportamento térmico de edificações. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 79–97, dez. 2011.

BOWERS, S. A.; HANKS, R. J. Reflection of radiant energy from soils. **Soil Science**, v. 100, n. 2, p. 130–138, ago. 1965.

CHEN, D. Dynamic three-dimensional heat transfer calculation for uninsulated slab-on-ground constructions. **Energy and Buildings**, v. 60, p. 420–428, maio 2013.

CHVATAL, K. M. S.; MARQUES, T. H. T. Avaliação de diferentes alternativas de modelagem de habitações de interesse social no programa de simulação de desempenho térmico EnergyPlus Evaluation. **Revista Tecnológica**, v. 25, n. 1, p. 67–79, 7 nov. 2016.

CHVATAL, K. M. S.; RORIZ, V. F. Avaliação do desempenho térmico de habitações segundo a ABNT NBR 15575. In: FABRICIO, M. M.; ONO, R. (Eds.). **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras - Manutenção e Percepção dos Usuários**. ANTAC ed. Porto Alegre: ANTAC, 2015. p. 41–54.

CLEMENTS, E. **Three Dimensional Foundation Heat Transfer Modules for Whole-Building Energy Analysis**. Pennsylvania, Estados Unidos: The Pennsylvania State University, 2004.

CRAWLEY, D. B. et al. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 4, p. 319–331, abr. 2001.

CRC Handbook of Chemistry and Physics, 74th Edition, David R. Lide, editor, CRC Press, Ann Arbor, MI, 1994

CRUZ, R. J. L. V. **Utilização da Energia Térmica do Solo para Climatização de Edifícios**. Aveiro, Portugal: Universidade de Aveiro, 2013.

DAVIES, M.; TINDALE, A.; LITTLER, J. Importance of Multi-Dimensional Conductive Heat Flow In and Around Buildings. **Building Services Engineering Research and Technology**, v. 16, n. 2, p. 83–90, 1995.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus**. USA, 2016a. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. Ground

- Heat Transfer in EnergyPlus. In: **Documentation, EnergyPlus™ Version 8.5 - Auxiliary Programs**. Version 8. ed. [s.l.: s.n.]. p. 103–142.
- EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **Slab**. USA, 2016c.
- DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2008.
- DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer - Maxim**. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>>. Acesso em: 24 mar. 2016.
- EPIPHANIO, J. C. N. et al. **Comportamento espectral de solos do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: 1992, 1992.
- FAROUKI, O. T. **Thermal Properties of Soils**. U.S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory, New Hampshire, United States. 151 p., 1981.
- FUMO, N.; MAGO, P.; LUCK, R. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 12, p. 2331–2337, dez. 2010.
- GARD ANALYTICS. **Lecture 24: Ground Heat Transfer EnergyPlus University Course Teaching Material**. [s.l.: s.n.].
- GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11–23, jan. 1992.
- HONNER, M. et al. Laser scanning heating method for high-temperature spectral emissivity analyses. **Applied Thermal Engineering**, v. 94, p. 76–81, fev. 2016.
- INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 27 abr. 2017.
- INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA. **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R**. Rio de Janeiro, 2012.
- JOHANSEN, O. **Thermal Conductivity of Soils**. Tese (Ph.D) Universidade de Trondheim. Noruega, 1975.
- Kersten, M.S., Thermal properties of soils. University of Minnesota Institute of Technology Engineering Experiment Station Bulletin n°. 28, v. LII, n. 21, June 1, 1949.
- KRARTI, M.; CHUANGCHID, P.; IHM, P. Foundation Heat Transfer Module for EnergyPlus Program. **Seventh International IBPSA Conference. Anais...** Rio de Janeiro: Building Simulation, 2001
- KUSUDA, T.; ARCHENBACH, P. Earth temperature and thermal diffusivity at selected stations in the United States. **ASHRAE Transaction**, v. 71, n. 1, p. 61–75, 1965.
- LARSEN, S. F. Modelización de la transferencia de calor al suelo en los programas de simulación térmica de edificios EnergyPlus y SIMEDIF. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 15, p. 27–34, 2011.

LI, H.; HARVEY, J.; KENDALL, A. Field measurement of albedo for different land cover materials and effects on thermal performance. **Building and Environment**, v. 59, p. 536–546, jan. 2013.

MACIEL NETO, J. D. A. **Caracterização térmica de solos**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2011.

MARIN, H. F.; CASATEJADA, M. P.; CHVATAL, K. M. S. **Impacto da temperatura de controle na operação das janelas e no conforto térmico para uma habitação de interesse social naturalmente ventilada em São Carlos – SP**. XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. **Anais...**São Paulo, 2016.

MARQUES, T. H. T. **Influência propriedades térmicas envolvente opaca desempenho habitações interesse social em São Carlos - SP**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) - Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, 2013.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Florianópolis, 2015.

Metrologia e a calibração de sensores de temperatura - Sensorweb. Disponível em: <<http://www.sensorweb.com.br/blog/metrologia-calibracao-sensor-temperatura/>>. Acesso em: 24 mar. 2016.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Second ed. Vancouver: Routledge, 1987.

OLIVEIRA, L. DA S. et al. **Importância da definição da temperatura do solo para o processo de simulação termoenergética de edificações**. XIV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. **Anais...**Juiz de Fora: 2012

PAPST, A. L. **Uso de inércia térmica no clima subtropical estudo de caso em Florianópolis-SC**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1999.

PEDRINI, A. **Desenvolvimento de metodologia de calibração de modelos para simulações térmica e energética de edificações**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1997.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. **Calibration of a Computer Model of a Naturally-Ventilated House Located in Southern Brazil**. Eleventh International IBPSA Conference. **Anais...**Glasgow, Scotland: Building Simulation, 2009

PESSÔA, T. O. A. **Avaliação da Influência da Mineralogia , Índice de Vazios e Teor de Umidade em Propriedades Térmicas de Solos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

PINI, F. et al. Robotic implementation of the slide method for measurement of the thermal emissivity of building elements. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 241–246, fev. 2016.

PREVEDELLO, C. L.; ARMINDO, R. A. **Física do solo com problemas resolvidos**. 2. ed. Curitiba, 2015.

RORIZ, M.; CHVATAL, K. M. S.; CAVALCANTI, F. S. Sistemas construtivos de baixa

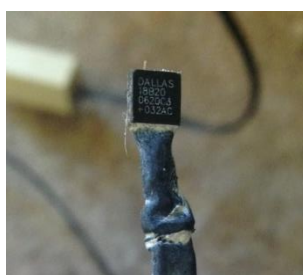
- resistência térmica podem proporcionar mais conforto. **X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**. Anais...Natal, 2009.
- RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **EPvieW**. São Carlos. Brazil, 2015.
- RORIZ, V. F. **Arquivos Energyplus Weather Data**. Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/epw_9.html>. Acesso em: 15 out. 2016.
- RORIZ, V. F. **Parametriza**. São Carlos. Brasil, 2017.
- RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **EPvieW**. São Carlos. Brazil, 2015.
- SANTOS, G. H. DOS. **Transferência tridimensional acoplada de calor e de umidade em solos sob edificações**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2003.
- SANTOS, G. H. DOS; MENDES, N. **Moisture effects of unsaturated porous soils on indoor air enthalpy**. Ninth International IBPSA Conference. **Anais...Canada: Building Simulation**, 2005.
- SELLERS, W. D. **Physical Climatology**. second ed. Chicago University of Chicago Press, 1965
- SILVA, A. S. et al. Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 103–117, dez. 2014.
- SILVA, A. S.; ALMEIDA, L. S. S.; GHISI, E. Análise de incertezas físicas em simulação computacional de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 1, p. 289–303, mar. 2017.
- SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of user behaviour and physical parameters in residential building performance simulation. **Energy and Buildings**, v. 76, p. 381–391, jun. 2014.
- SORGATO, M. J. **Deempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Univerdade Federal de Santa Catarina, 2009.
- SORGATO, M. J. et al. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 83–101, dez. 2014.
- SOUZA, H. A. DE; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em. **Ambiente Construído**, v. 11, p. 113–128, 2011.
- TAMBURRINI, M.; PALMER, D.; MACDONALD, I. **Calibrating models for simulation use in design practices**. Eighth International IBPSA Conference. **Anais...Eindhoven, Netherlands: Building Simulation, 2003** Disponível em: <http://ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_1273_1278.pdf>
- VENÂNCIO, R. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética do Campus / UFRN – vol 1**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Natal, 2007.
- WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. Building simulation calibration using sensitivity analysis. **Building Simulation**, p. 1331–1338, 2005.
- XING, L. U. **Estimations of undisturbed ground temperatures using numerical and analytical modeling**. Stillwater, OK, US: Oklahoma State University, 2014.

ZAKI, H. et al. **Thermal earth inertia such a source of energy for bio-sustainable house**. The 2005 World Sustainable Building Conference. **Anais...**Tóquio: 2005

APÊNDICE A – Calibração dos sensores de temperatura

Para a medição da temperatura superficial, este experimento utilizou sensores de temperatura do modelo DS18B20 *One-Wire thermometer* fabricados pela Maxim, Figura A.1, estes sensores possuem resolução programável de 9 a 12 bits e exatidão de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ (“DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer - Maxim”, [s.d.]).

Figura A.1 - Sensor de temperatura DS18B20 One-Wire thermometer



Fonte: Autor

Os sensores foram calibrados a fim de avaliar a variação de medição de temperatura entre eles. Todo o instrumento de medição está sujeito a “erros” (variação de valores medidos), entre os dados obtidos pelos sensores chamados de “incerteza de medição”. Essa incerteza deve ser conhecida e considerada nas análises experimentais. A incerteza pode induzir variações nos resultados medidos. Dessa forma a calibração se faz necessária para descobrir essa margem de erros, possibilitando o ajuste do instrumento ou a avaliação do experimento considerando a margem de erro apresentada no processo de calibração possibilitando-se obter resultados mais próximos dos reais. (“Metrologia e a calibração de sensores de temperatura - Sensorweb”, [s.d.])

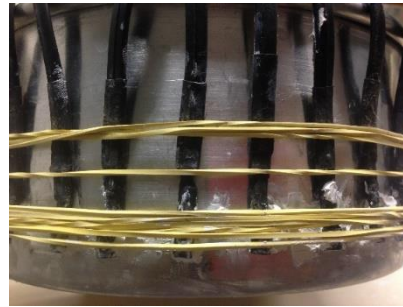
O sistema de calibração foi composto por 15 sensores de temperatura fixados a superfície externa de um recipiente de alumínio (devido a sua alta condutividade térmica). Na interface entre os sensores e o recipiente foi utilizada pasta térmica para aumentar a superfície de contato e facilitar a troca de calor entre os objetos. Para fixar os sensores ao recipiente de modo

que todos ficassem aproximadamente em uma mesma altura constante e seus “chips” de medição permanecessem voltados para a superfície do recipiente, foram usados vários elásticos como mostra o detalhe da Figura A.2.

Figura A.2 - Fixação dos sensores ao recipiente do sistema de calibração



(a) Sistema da calibração



(b) Detalhe dos sensores fixados

Fonte: Autor

Após a fixação dos sensores, este sistema foi envolvido por uma faixa de cortiça, Figura A.3, com o objetivo de isolar os sensores de quaisquer influências externas no momento da calibração e fazendo com que os sensores troquem calor apenas com o recipiente do sistema em análise. Além da cortiça, foi tomado o cuidado de realizar-se o experimento em um ambiente fechado, sem a presença de radiação solar, correntes de ar e fontes de calor próximas aos sensores, de forma que não houvesse agentes externos interferindo nas medições.

Figura A.3 - Isolamento do sistema com cortiça



Fonte: Autor

Cada sensor possui uma conexão de saída de dados RJ11 (igual a existente em linhas telefônicas), o qual é conectado a um adaptador de linha telefônica com cinco entradas e uma saída. Foram utilizados três adaptadores recebendo cada um deles cinco sensores de temperatura, totalizando 15 sensores. As saídas dos adaptadores por sua vez foram ligadas a cabos telefônicos com dimensões de 23,5m aproximadamente (com função de extensão do sistema de medição), por meio de emendas com duas entradas fêmeas RJ11. Os cabos telefônicos foram então conectados a um quarto adaptador, o qual é conectado a um notebook por um adaptador USB de rede *lan ethernet*, Figura A.4, de acordo com a configuração do sistema de medição montado para a célula-teste.

Figura A.4 - Sistema de calibração completo



Fonte: Autor

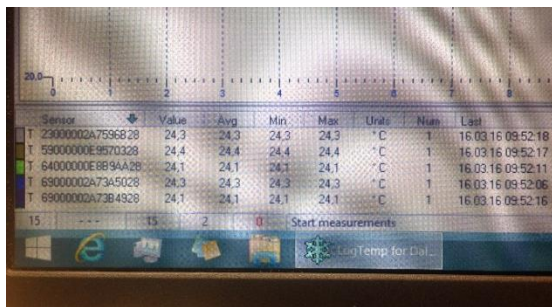
O procedimento da calibração foi realizado induzindo a variação da temperatura superficial do recipiente através da introdução alternada de água em diferentes temperaturas (quente e gelada), de forma que a distribuição das trocas de calor em todo o recipiente fosse uniforme, Figura A.5. Para a leitura e gravação dos valores medidos utilizou-se o programa LogTemp (versão 2.25.0.97). O programa grava os dados em arquivo de texto ".txt." e possibilita a visualização dos valores em tempo real da medição, apresentando também os sensores, o número total e individual de medições

realizadas, as temperaturas medidas em cada sensor (média, máxima e mínima) e o horário da última medição, Figura A.5b.

Figura A.5 - Procedimento da Calibração



(a) Adição de água ao sistema



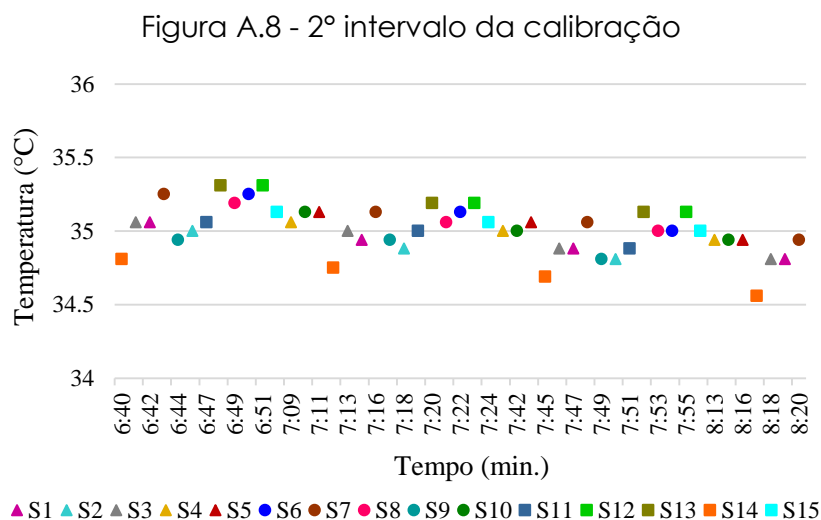
(b) Leitura dos sensores no programa LogTemp

Fonte: Autor

Comparou-se as temperaturas registradas em cada sensor no período analisado, observando as variações dos valores obtidos entre os sensores durante a oscilação de temperatura induzida pela adição de água quente e fria no sistema de calibração. Primeiramente foram analisados os valores de temperaturas de todo o período e posteriormente são selecionados dois intervalos para uma análise mais detalhada: 1º intervalo, período com brusca alteração de temperatura e 2º intervalo, período com temperaturas estáveis. A Figura A.6 apresenta o registro das temperaturas medidas pelos 15 sensores durante a calibração e a seleção dos dois intervalos analisados.

A temperaturas medidas pelos sensores apresentam boa correlação durante o aumento de temperatura induzida pela adição de água quente ao sistema, com valores bastante próximos de temperatura.

A Figura A.8 por sua vez apresenta o 2º intervalo selecionando, o qual representa o período de medições de temperatura estável sem indução da temperatura do sistema.



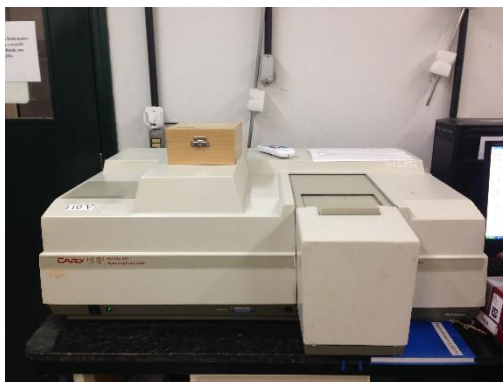
Comparando-se as temperaturas obtidas em relação ao tempo de medição, nota-se que os valores medidos têm variação inferior a $0,5^{\circ}\text{C}$ quando comparados ao valor medido antes e depois de cada sensor. Adicionalmente, quando comparados os valores de temperatura de cada sensor com a temperatura média de cada ciclo de medição (medição sequencial de 15 sensores), esses se desviam da média em no máximo $0,3^{\circ}\text{C}$. Essa análise é importante por se tratar de uma situação similar à que ocorre nas medições em célula-teste dessa pesquisa, em que as mudanças de temperatura ocorrem lentamente devido a inércia dos materiais. Os resultados permitem afirmar que os sensores possuem uma margem de erro aceitável, sendo que as variações dos valores medidos entre os sensores não influenciam nas análises e nas conclusões do estudo proposto.

APÊNDICE B – Absortância solar da tinta

Para obter a absortância¹³ da tinta aplicada na pintura da célula-teste foi utilizado o Espectrofotômetro da marca Varian modelo CARY 5G (Figura B.1), o qual pertence ao Laboratório Interdisciplinar de Eletroquímica e Cerâmica (LIEC) do Instituto de Química da Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR). O espectrofotômetro gera dados de refletância, através da diferença entre a energia incidente na amostra (emitida pelo equipamento) e a energia refletida. Através da refletância, é possível calcular a quantidade de energia absorvida pela amostra, ou seja, a absortância solar.

Esse equipamento permite analisar a refletância em cada comprimento de onda, gerando a refletância espectral relativa ao ultravioleta, visível e infravermelho, na faixa de operação entre 185 nm e 3300 nm (DORNELLES, 2008). Nesta pesquisa o espectro foi observado no intervalo de 300 a 2500 nm, por esta ser a região que apresenta a maior concentração de energia emitida pelo Sol.

Figura B.1 - Espectrofotômetro CARY 5G (UV-Vis-NIR)



Fonte: Autor

A tinta aplicada na pintura da célula-teste é do tipo látex PVA, produzida pela indústria Sherwin Williams (Novacor), na cor extra branco. Como não seria possível com esse equipamento medir a absortância das superfícies da célula-

¹³ A absortância solar é definida como a quantidade de energia solar absorvida por uma superfície (ABNT, 2005).

teste *in loco*, foi adotada uma amostra de aglomerado de madeira (superfície uniforme) para os ensaios. Dessa forma, foi considerada para todas as superfícies da célula-teste o mesmo valor de absorvância, o qual foi obtido através da medição da amostra. Essa amostra foi pintada com duas demãos de tinta, de forma que a pintura e a cor ficassem homogêneas, Figura B.2, e após a secagem da tinta foram realizados os ensaios.

Figura B.2 – Amostra de aglomerado de madeira utilizada para as medições de absorvância da tinta



(a) Amostra antes da pintura

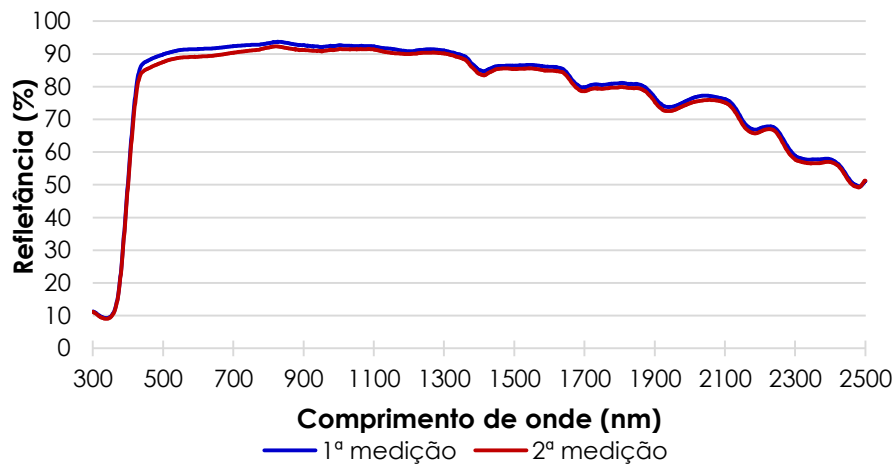


(b) Amostra pintada

Fonte: Autor

Foram realizadas duas medições da amostra. Isso é feito porque apesar de visualmente a pintura parecer uniforme, podem haver variações na extensão da amostra. Portanto, faz-se necessária a medição em mais de um ponto da superfície, para garantir que o comportamento da tinta seja analisado corretamente. A Figura B.3, apresenta o resultado gerado pelo espectrofotômetro, durante a medição, da curva de variação da refletância da tinta dentro do intervalo definido. Observa-se que as duas medições apresentam comportamento semelhante e valores muito próximos em todo o intervalo. A tinta apresenta baixa refletância na região relativa ao ultravioleta ($\lambda < 380\text{nm}$), alta na região visível (380 a 780 nm) nos comprimentos de onda correspondentes a cor, decrescendo na região do infravermelho ($\lambda > 780\text{nm}$) de 92% a aproximadamente 50%.

Figura B.3 - Resultado do espectrofotômetro nos ensaios de reflexão



Antes de calcular o valor da absortância solar, os valores da refletância devem ser corrigidos, pois estes são obtidos pela emissão de energia constante, o que não ocorre em condições reais. Deste modo, os valores são ajustados de acordo com a intensidade da radiação solar a partir de um espectro solar padrão, baseado na radiação hemisférica solar global (DORNELLES, 2008). Após a correção da refletância foi obtido o valor da absortância, que é a energia total emitida (100%) menos a porcentagem de energia refletida. A Tabela B.1 apresenta o valor da absortância solar para as duas medições.

Tabela B.1 - Absortância solar obtida através dos ensaios com o espectrofotômetro

Absortância solar (%)	
1ª medição	12,9
2ª medição	14,5

Neste estudo foi adotado o maior valor de absortância solar, 2ª medição, para as simulações computacionais da célula-teste.

APÊNDICE C – Medição do albedo

O albedo, descrito anteriormente na seção “2.2.3.2 Descrição dos dados de entrada do *Slab*”, indica o potencial de reflexão solar de uma superfície. Desse modo, foi utilizado o mesmo equipamento adotado anteriormente para obter a absortância solar da tinta, os detalhes sobre o espectrofotômetro e seu funcionamento são descritos no Anexo B.

Na Figura C.1, é apresentado o espectrofotômetro utilizado e como foi posicionada a amostra de grama no equipamento. Para possibilitar a inserção da amostra no equipamento na posição vertical, a amostra foi retirada do entorno da célula-teste com raízes e uma camada de solo. Além de auxiliar na sustentação da grama o solo fica em segundo plano na superfície e contribui na variação do albedo, como ocorre em condições reais.

Figura C.1 - Posicionamento da amostra no equipamento



Fonte: Autor

Como a cor da grama e sua textura variam durante do ano devido a variação das condições climáticas, o albedo não é fixo, variando de acordo com as variações ambientais sofridas pela grama. Em vista disso, foram realizadas duas medições, uma no período seco (setembro) e outra no período úmido (novembro), Figura C.2.

Figura C.2 - Amostras de gramas utilizadas na medição da absorvância



(a) Amostra do período seco

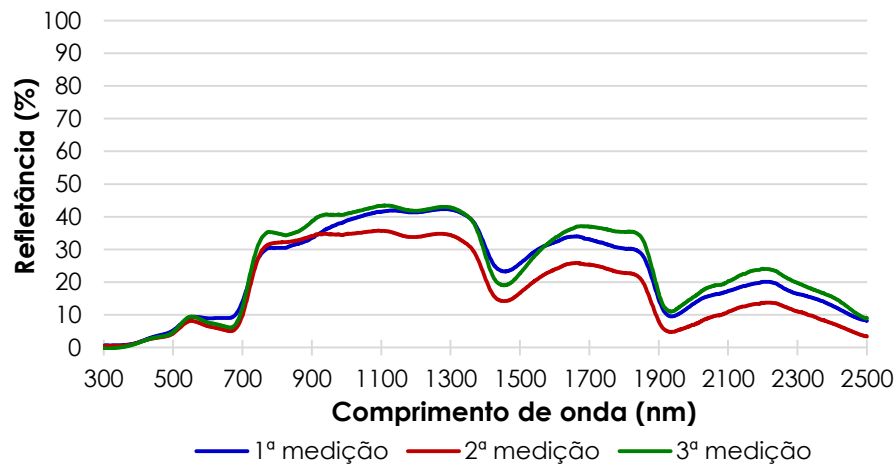


(b) Amostra do período úmido

Fonte: Autor

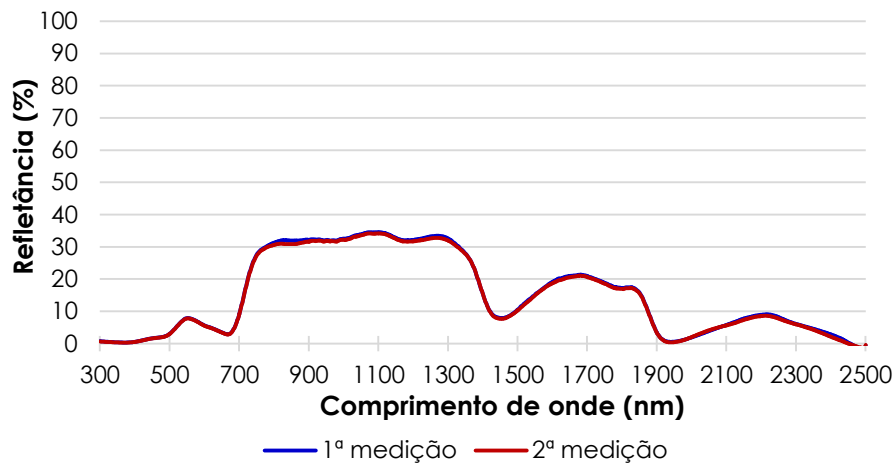
Para o período seco foram realizadas três medições do albedo, em diferentes pontos da amostra. Foi observado que as três medições apresentaram comportamento similar, porém com uma variação considerável nos valores de refletância a partir de comprimentos de onda superiores a 750nm, Figura C.3. Esse resultado indica que em uma superfície natural (não homogênea), pode haver uma variação significativa do albedo em sua extensão.

Figura C.3 - Resultado do espectrofotômetro nos ensaios de reflexão da amostra do período seco



Já no caso do período úmido, foram realizadas duas medições do albedo e estas apresentaram valores muito próximos, Figura C.4. Provavelmente isso se deve as condições da amostra, pequena variação na textura e refletância similar das cores que a compõe, e da influência do clima mais úmido na mesma.

Figura C.4 - Resultado do espectrofotômetro nos ensaios de reflexão da amostra do período úmido



Na Tabela C.1, são apresentados os valores de albedo ajustados para os dois períodos de todas as medições realizadas (detalhes sobre o ajuste do valor da refletância são descritos no Anexo B). Para este trabalho, foram adotadas as médias da variação de albedo para cada período.

Tabela C.1 - Resumo dos resultados das medições do albedo da grama

Albedo (%) - Refletância total ajustada			Média (%)
Amostra do período seco	1ª medição	20,9	20,26
	2ª medição	18,1	
	3ª medição	21,8	
Amostra do período úmido	1ª medição	16,5	16,35
	2ª medição	16,2	

APÊNDICE D – Caracterização do solo

A caracterização e classificação do solo é realizada a partir de uma amostra coletada no campus I da Universidade de São Paulo na unidade de São Carlos no dia 11 de outubro de 2016. Os ensaios são desenvolvidos de acordo com as indicações e recomendações das normas NBR 7181 (ABNT, 1984), NBR 6457 (ABNT, 2016), NBR 6502 (ABNT, 1995) e NBR 10838 (ABNT, 1988) seguindo as seguintes etapas:

1. Coleta do material da amostra;
2. Preparação da amostra para os demais ensaios;
3. Ensaio de determinação da densidade do solo;
4. Ensaio para a análise granulométrica;
5. Ensaio de determinação do teor de umidade;
6. Classificação do solo.

Etapa 1: Coleta do material da amostra

O material da amostra foi coletado próximo à célula-teste, de forma que este representasse o solo presente no entorno e sob ela. É importante destacar que a composição do solo varia no tempo e no espaço, principalmente perto da superfície. Portanto a amostra representa as condições do solo no momento da coleta, sendo este passível a alterações. Antes da coleta do material é necessário retirar uma camada de 0,40m de profundidade a partir da superfície. Esse procedimento descarta a matéria orgânica (por exemplo, a grama) e outros resíduos, com o propósito de coletar apenas o solo para os ensaios. Posteriormente, é coletada uma porção do solo, a partir dos 0,40m de profundidade, de aproximadamente 1kg. Esse material é imediatamente embalado, evitando que este perca umidade, e levado ao Laboratório de mecânica dos solos, localizado no Departamento de Geotecnia da USP-SC.

Etapa 2: Preparação da amostra para os demais ensaios

No laboratório o material coletado passa por um procedimento manual de preparação da amostra. Esse procedimento consiste em desmanchar os torrões de solo, para homogeneização da amostra, de forma cuidadosa para evitar a quebra de grãos. Para que o material não perca sua umidade, este procedimento é feito com o solo ainda dentro da embalagem vedada. Com o material homogêneo, este é dividido em porções menores obtendo-se uma amostra representativa, em quantidade suficiente para a realização dos ensaios requeridos.

Etapa 3: Ensaio de determinação da densidade do solo

Logo depois da preparação da amostra, foi separada uma fração de material, e deixada secar ao ar para realizar a determinação da densidade. Após a secagem esse material passou por peneiramento com malha de 4,8 mm e a porção que ficou retida na peneira constituiu a amostra a ensaiada. Para o ensaio foi utilizado uma balança hidrostática, seu funcionamento se baseia no princípio de Arquimedes¹⁴. Ela é usada para pesar a amostra indeformada de solo fora e dentro da água, o processo é realizado seguindo os passos a seguir:

- (a) inicialmente foi definida a massa específica aparente da parafina através da balança hidrostática;
- (b) o segundo passo foi talhar a amostra de solo, de forma que se obtivesse um formato esférico (diâmetro mínimo de 5mm);
- (c) a amostra foi envolvida por parafina derretida para que ficasse nivelada;
- (e) na sequência, a amostra é amarrada a uma linha e emergida na parafina diversas vezes, após esse processo, o material é pesado (massa do material parafinado = M_p);

¹⁴ Um corpo perde aparentemente um peso igual à quantidade de líquido ou gás deslocado.

(f) a mostra parafinada foi emergida na água e pesada com a balança hidrostática;

(g) calculou-se o volume e a densidade da amostra com as Equações D1 e D2;

Equação D.1

$$V_s = \frac{(M_p - M_i)}{\gamma_o} - \frac{(M_p - M_s)}{\gamma_{paraf}}$$

Onde:

V_s - volume da amostra (cm^3)

M_p - massa da amostra parafinada (g)

M_i - massa da amostra parafinada imersa em água (g)

M - massa da amostra (g)

γ_{paraf} - densidade aparente da parafina (g/cm^3)

ρ_o - densidade da água ($1\text{g}/\text{cm}^3$)

Equação D.2

$$\rho_h = \frac{M_s}{V_s}$$

Onde:

ρ_h - densidade aparente natural da amostra (g/cm^3)

M_s - massa da amostra (g)

V_s - volume da amostra (cm^3)

A Tabela D.1 apresenta os índices físicos medidos a partir do ensaio.

Tabela D.1 – Índices físicos do solo

ρ (g/cm^3)	n (%)
1.868	40.1

Etapa 4: Ensaio para a análise granulométrica

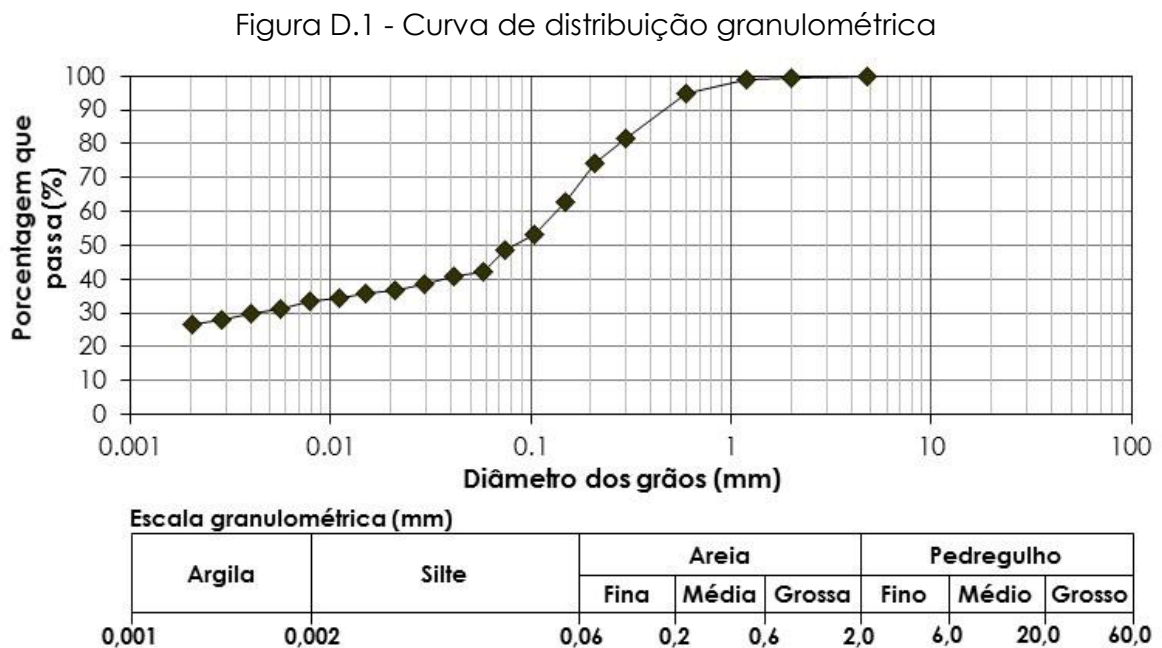
Com a amostra preparada, é separada uma porção dela, sem secagem prévia¹⁵, para realizar a análise granulométrica. Neste estudo a análise é realizada através de dois procedimentos, peneiramento e sedimentação, de acordo com os seguintes passos:

- (a) pesar a massa da amostra seca separada para o ensaio e registrar esse dado;
- (b) passar o material da amostra pelo peneiramento na malha de 2,0mm – #10);
- (c) lavar o material retido na peneira e em seguida coloca-o na estufa, após sua secagem, esse material é utilizado para o peneiramento grosso;
- (d) esse material, após a secagem, foi passado por peneiras com diferentes dimensões de malha até a peneira #10, em seguida, foram pesadas as frações retidas em cada peneira;
- (e) o material que passou pela peneira #10 foi coletado e utilizado no peneiramento fino. Logo depois, esse material foi peneirado com peneira de malha 0,075mm (#200);
- (f) da mesma forma que o passo “c”, o material retido na peneira #200 também é lavado e seco em estufa;
- (g) em seguida, o material oriundo do passo “f” foi passado por peneiras com diferentes dimensões de malha até a peneira até #200, em seguida, foram pesadas as frações retidas em cada peneira;
- (h) a partir de parte da amostra que passa na peneira #10, foi realizado também o método de sedimentação para mensurar a proporção de grãos com diâmetros inferiores a 0,075 presentes na amostra;
- (i) o material usado na sedimentação foi pesado e colocado em um béquer com desfloculante (solução de hexametáfosfato de sódio). Esse conjunto,

¹⁵ Segundo a norma NBR6457 (ABNT, 2016), a análise granulométrica sem secagem prévia apenas pode ser empregado quando a amostra apresentar no máximo 10 % de material retido na peneira de 0,42 mm.

- material e desfloculaste foi misturado até que o material ficasse imerso e deixado em repouso por no mínimo 12h;
- (j) a mistura foi agitada em um dispersor elétrico por 15 minutos e transferida para uma proveta graduada, completando-a com água destilada até 1000 ml e realizou-se o balanceamento;
- (l) efetuaram-se leituras subsequentes do densímetro a 4,8, 15 e 30 minutos, 1, 2, 4, 8, e 24 horas a partir do início da sedimentação;
- (m) calcularam-se as porcentagens correspondentes a cada leitura do densímetro, referentes a massa total da amostra.

A Figura D.1 apresenta o resultado da análise granulométrica através da curva de distribuição granulométrica.



A análise granulométrica define a distribuição das diferentes dimensões das partículas e a escala define a posição relativa aos quatro grupos: pedregulhos, areias, siltes e argilas. A partir dessa análise foi obtida a proporção dos quatro grupos na composição da amostra (Tabela D.2)

Tabela D.2 – Composição da amostra

Componentes	Proporção (%)
Pedregulho	0,5
Areia grossa	4,5
Areia média	21,0
Areia fina	32,0
Silte	15,5
Argila	26,5

Etapa 5: Ensaio de determinação do teor de umidade

Após a preparação da amostra para os ensaios (etapa 2), é separada uma porção pequena do material reservada para o ensaio de determinação de umidade. Esse ensaio é desenvolvido por meio dos seguintes passos:

- (a) pesar o recipiente (cápsula metálica), onde o material é manipulado, em uma balança de alta precisão;
- (b) de posse dos dados do ensaio da análise granulométrica, definir a quantidade de material que será usada em cada cápsula;
- (c) colocar o material na cápsula, fechá-la com tampa (para que o solo não perca umidade) e pesar o conjunto (cápsula mais material);
- (d) colocar a cápsula, destampada, em estufa à temperatura de 105 °C a 110 °C durante um intervalo de 16 h a 24h, aproximadamente. Intervalos maiores podem ser necessários, dependendo do tipo, quantidade e teor de umidade do solo;
- (e) retirar a cápsula da estufa e transferi-la para o dessecador, onde deve permanecer até atingir a temperatura ambiente;
- (f) recolocar a tampa e pesar o conjunto;
- (g) determinar o teor de umidade.

Segundo indicação da norma (ABNT, 2016), deve ser efetuado no mínimo três determinações do teor de umidade para cada amostra. Dessa forma, foram utilizadas três cápsulas para o ensaio (Figura D2). Após a pesagem das cápsulas (massa da cápsula = M_c), uma pequena porção de solo foi inserida

em cada uma delas, de aproximadamente 30g (massa do material = M). Essa quantia de solo foi definida de acordo com a análise granulométrica e a norma NBR 6457 (ABNT, 2016), que indica a quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores, que deve ser colocada em cada cápsula. Já com o material, as cápsulas são fechadas e pesadas ($M + M_c$), posteriormente, elas são destampadas e colocadas na estufa durante 24h. Após o período de 24h na estufa, as cápsulas são colocadas no dessecador, onde permaneceram até atingir a temperatura ambiente. Quando em temperatura ambiente, elas são novamente tampadas e pesadas (massa seca = M_s). Os valores de todas as pesagens (Tabela D.3) são inseridos na Equação D.3, e o valor do teor de umidade da amostra é obtido.

Figura D.3 – Cápsulas utilizadas no ensaio



Fonte: Autor

Tabela D.3 – Pesagens e teor de umidade do ensaio

Cápsula	141	40	19
M + Mc	31,20	33,44	31,52
Ms + Mc	28,82	30,84	29,17
Mc	11,12	11,25	11,46
Mw	2,38	2,60	2,35
Ms	17,70	19,59	17,71
w	13,45	13,27	13,27
WMÉDIA (%)	13,33		

Nota: M = massa do material; Mc = Massa da cápsula; Ms = massa do material seco; Mw = massa do material úmido; w = teor de umidade em porcentagem e $w_{MÉDIA}$ = umidade média das três cápsulas.

Equação D.3

$$w = \frac{M_1 - M_2}{M_2 - M_3} \times 100$$

Onde:

w - teor de umidade (%)

M₁ - massa do solo úmido mais a massa da cápsula (g)

M₂ - massa do solo seco mais a massa da cápsula (g)

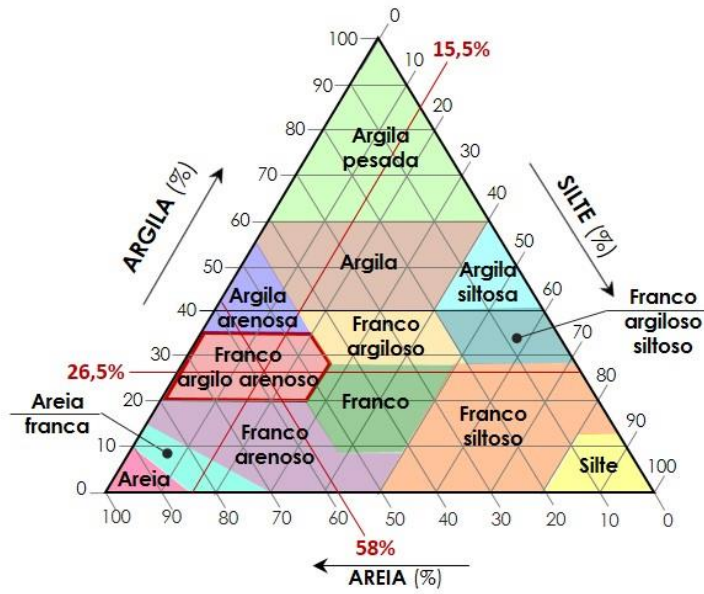
M₃ - massa da cápsula (com tampa) (g)

Etapa 6: Classificação do solo

Com base na composição do solo obtida na etapa 5, foi realizada a sua classificação textural. Esse método baseia-se na textura do solo e na sua composição granulométrica. A classificação é realizada através do diagrama de FERET, este diagrama consiste em um triângulo que possui escalas em cada um de seus lados, que correspondem a proporção de argila, silte e areia que compõem a amostra. Através do cruzamento das frações de cada componente no diagrama, é obtida a classificação do solo.

A amostra do solo ensaiada na análise granulométrica é composta por 57,5% de areia, 26,5% de argila, 15,5% de silte e 0,5% de pedregulho. Para utilizar o diagrama foram somadas as frações de pedregulho e areia, totalizando 58%, para representar a porção de areia no solo. A Figura D.4 apresenta o diagrama de FERET e o cruzamento das frações de cada componente do solo. Observa-se no diagrama que o solo analisado é classificado como Franco argilo arenoso.

Figura D.4 – Diagrama triangular de FERET



Fonte: Autor

APÊNDICE E – Medição da condutividade térmica do solo

A medição da condutividade térmica do solo foi realizada a partir da mesma amostra coletada para a caracterização e classificação do solo (Anexo D), no campus I da Universidade de São Paulo na unidade de São Carlos no dia 11 de outubro de 2016. A medição foi desenvolvida após a caracterização do solo, no qual foram obtidos os dados da amostra de solo necessários para a medição da condutividade. O ensaio foi desenvolvido de acordo com as indicações e recomendações das normas NBR 6457 (ABNT, 2016), NBR 7182 (ABNT, 1986) e a ASTM D5334 (ASTM, 2014) seguindo as seguintes etapas:

1. Coleta dos dados da amostra do solo usado para o ensaio;
2. Caracterização do Corpo de prova (molde);
3. Ensaio de compactação da amostra no corpo de prova;
4. Efetuar a pré-perfuração da amostra compactada;
5. Calibração da sonda térmica e medição da condutividade térmica do solo;

Etapa 1: Coleta dos dados da amostra do solo usado para o ensaio

Os dados oriundos da caracterização do solo (Anexo D) são insumo para a definição das condições do ensaio de compactação e para a verificação se o ensaio atende aos critérios definidos pela NBR 7182 (ABNT, 1986) para representar as condições reais do solo estudado. Foram coletados os dados referentes à densidade (ρ), a densidade seca (ρ_d) e a umidade média do solo ($w_{(média)}$) (Tabela E.1).

Tabela E.1 – Dados da amostra usada no ensaio de compactação

Índices físicos da amostra de solo	
w(média) (%)	13,33%
P (g/cm ³)	1868
P _d (g/cm ³)	1650

Etapa 2: Caracterização do Corpo de prova (molde)

A Figura E.1 apresenta o corpo de prova (molde) utilizado nos ensaios de compactação e de medição da condutividade térmica do solo. Os dados referentes às suas dimensões, volume e peso se encontram na Tabela E.2.

Figura E.1 – Corpo de prova (molde)



Fonte: Autor

Tabela E.2 – Características do corpo de prova

Dados do corpo de prova		
Molde: 1	Diâmetro: 5,38cm	Altura: 20,16cm
Peso: 249,58g	Área: 22,73 cm ²	Volume: 458,29cm ³

Etapa 3: Ensaio de compactação da amostra no corpo de prova

A partir das etapas 2 e 3, foram definidas as condições do ensaio de compactação (Tabela E.3). Essas condições dizem respeito à massa total de solo utilizada, o número de camadas compactadas, a massa de solo de cada uma dessas camadas e a energia de compactação. O ensaio foi desenvolvido com o uso de um soquete grande, um corpo de prova (mais detalhes na etapa 2) e uma balança de alta precisão. O soquete é um compactador de impacto de uso manual, ele compacta cada camada do solo contido no corpo de prova através de golpes (Figura E.2). O ensaio de compactação é desenvolvido nas seguintes etapas:

1. Pesquisar o corpo de prova;

2. Separar as porções de solo de cada camada de acordo com o peso especificado (Figura E.3a);
3. Inserir o solo referente a uma camada no corpo de prova (Figura E.3b);
4. Golpear a camada de solo até que atinja a altura definida para a camada (Figura E3c e Tabela E.3);
5. Repetir as etapas 2 e 3 até que sejam compactadas todas as camadas;
6. Pesar o corpo de prova com a amostra compactada.

Tabela E.3 – Condições da amostra no ensaio de compactação

Dados da amostra para compactação		
Ms: 856,76g	Ms(por camada): 171,35g	Altura (por camada): 3,99cm
Energia de compactação		
Soquete	Nº de camadas	Nº de golpes por camada
Grande	5	27

Nota: os dados referentes a energia de compactação foram baseados nas indicações da norma NBR 7182 (ABNT, 1986).

A altura de cada camada é definida através da densidade do solo.

Figura E.2 - Soquete



Fonte: Autor

Figura E.3 – Etapas do ensaio de compactação



(a) pesagem da massa de cada camada

(b) inserção do solo no corpo de prova

(c) compactação com o soquete

(d) amostra compactada

Fonte: Autor

Ao fim da compactação, foi separada uma porção de solo e verificado se o solo utilizado para compactação perdeu umidade em relação ao dia da coleta. A determinação do teor de umidade dessa porção de solo foi realizada da mesma forma que indicado no Anexo D.

Tabela E.4 – Verificação do ensaio de compactação

Condições finais após compactação		
Altura da amostra: 19,96cm	Volume da amostra: 453,75cm ³	ρ : 1866g/cm ³
Diâmetro: 5,38cm	Massa final da amostra: 855,4g	ρ_d : 1649g/cm ³
Molde+Amostra: 1104,98g	$W_{(média)}$: 13,19%	GC: 100%

Nota: Grau de compactação (GC) e Massa Específica Seca (ρ_d) atendidos. Desvio de umidade inferior a 0,5%, portanto, ensaio satisfatório.

Etapa 5: Efetuar a pré-perfuração da amostra compactada

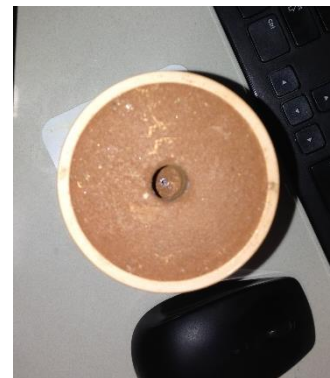
Para a medição da condutividade térmica do solo, foi utilizada uma sonda térmica, da marca e modelo Hukseflux TP-08. Esta sonda, consiste em uma agulha de aço inoxidável, com 1,2mm de diâmetro por 70mm de comprimento (Figura E.4a). Essa sonda é adequada para medição em solos e mede valores de condutividade térmica no intervalo de 0,1 a 6,0 W/m.K, com precisão de +/- 3%. Para realizar a medição, sua agulha deve ser envolvida por completo pelo solo, por isso em solos com alta densidade é recomendado que se efetue a pré-perfuração para evitar que a agulha seja danificada durante sua inserção no solo. Devido à alta densidade do solo estudado, foi

realizada a pré-perfuração no centro geométrico da amostra compactada. A pré-perfuração foi feita em duas etapas, primeiramente foi feita a perfuração com o diâmetro da base da agulha (diâmetro: 10mm e comprimento: 30mm). Essa primeira perfuração possibilita que a agulha se insira com maior profundidade na amostra. Posteriormente, foi feita a pré-perfuração da agulha, no centro da perfuração anterior, Figura E.4b.

Figura E.4 – Sonda térmica e pré-perfuração da amostra



(a) Sonda térmica Hukseflux TP-08



(b) Pré-perfuração para o uso da sonda térmica

Fonte: Autor

Etapa 6: Calibração da sonda térmica e medição da condutividade térmica do solo

Segundo a norma ASTM D5334-14, antes de realizar a medição da condutividade térmica é necessário executar a calibração da sonda a partir de um material de referência. Nesta pesquisa, foi adotada a glicerina por ser um dos materiais sugeridos pela ASTM D5334-14, com condutividade térmica de 0,286 W/m.K a 25°C (CRC, 1994). O procedimento de calibração compreendeu medições da condutividade da glicerina e o cálculo da constante de calibração, esse dado pela Equação E.1 (ASTM, 2014). Essa constante foi posteriormente inserida no programa do sistema de aquisição dos dados medidos pela sonda durante a medição da condutividade do solo (Figura E.5a). O valor obtido para a constante de calibração foi igual a 0,29 W/m.K.

Equação E.1

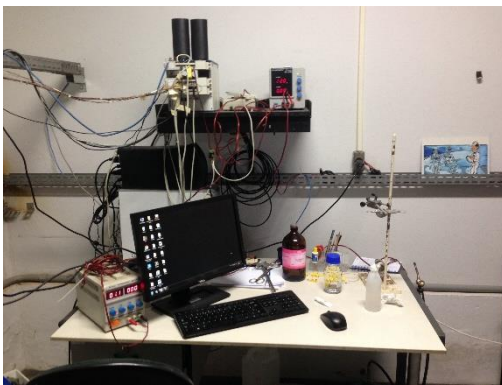
$$C = \frac{k_{glicerina}}{k_{glicerina/medido}}$$

Onde:

C - constante de calibração

 $k_{glicerina}$ - condutividade conhecida do material $k_{glicerina/medido}$ - condutividade medida pela sonda

Figura E.5 – Ensaio com a sonda térmica



(a) equipamento para medição da condutividade



(b) medição da condutividade da amostra

Fonte: Autor

Após realizada a calibração foram feitas as medições no solo (Figura E.3b), e os valores medidos, finalmente foram lidos pelo programa do sistema de aquisição (Figura E.3). Foram realizadas cinco medições com a mesma amostra e obtida a condutividade média a fim de se obter maior confiabilidade nos resultados. A Tabela E.2 mostra os valores medidos e a média obtida.

Tabela E.2 - Medições da condutividade do solo com a sonda térmica

Medições (W/m.K)					Média (W/m.K)
1	2	3	4	5	
0,78	0,76	0,79	0,81	0,84	0,80

APÊNDICE F – Modelagem do arquivo climático

O arquivo climático foi modelado a partir de um arquivo EPW base desenvolvido por Roriz (2012), que é a extensão para a leitura pelo *EnergyPlus* (EP). Esse arquivo base foi alterado apenas no período de junho a dezembro, o restante do ano foi mantido com os dados originais. Esse período corresponde aos meses em que se desenvolveram as medições em célula-teste e também são desenvolvidas as análises da simulação computacional. Para possibilitar a edição do arquivo EPW base é utilizado o pré-processador *Weather-Converter*, instalado automaticamente junto ao EP. Esse pré-processador tem a função de converter o formato de arquivos de dados climáticos para um dos formatos disponíveis para a conversão. O *Weather-Converter* é utilizado segundo as etapas descritas a seguir:

1. Executar o conversor no arquivo EPW original;
2. Converter este arquivo para o formato "*EnergyPlus CSV*" (*comma separated variable*);
3. Abra o arquivo "*EnergyPlus CSV*" como uma planilha de dados no Excel®;
4. Inserir as modificações e salvar o arquivo com formato CSV.
5. Executar o conversor novamente, desta vez selecionando o CSV;
6. Converta o arquivo CSV para o formato EPW.

A fonte de dados adotada para a modelagem desse período é a estação meteorológica do Instituto de Arquitetura e Urbanismo IAU/USP-SC¹⁶. A estação está implantada no campus universitário I da Universidade de São Paulo, localizada em São Carlos/SP e fornece dados das condições climáticas locais no intervalo de 30 minutos. Essa estação é selecionada por estar

¹⁶IAU/USP-SC. **PLANILHA DE DADOS METEOROLÓGICOS**. Disponível na internet via: <http://sistemas.iau.usp.br/eMeteorologica/>

localizada ao lado da célula-teste monitorada e representar as condições do clima local.

As variáveis ambientais fornecidas pela estação meteorológica do IAU são:

- Temperatura de bulbo seco (°C);
- Umidade relativa do ar (%);
- Radiação global horizontal (W/m²);
- Velocidade máxima do vento (m/s);
- Velocidade média do vento (m/s);
- Direção do vento (graus);
- Hora máxima (h:mm);
- Chuva (mm);
- Pressão atmosférica (mmHg).

A estação meteorológica adotada não fornece todos os dados necessários para a modelagem de arquivos climáticos usados em programas de análise de desempenho termoenergético, como geralmente ocorre em estações meteorológicas automáticas. Para obter esses dados que não estão disponíveis, existem métodos estatísticos que estimam seus valores com base nos dados reais disponíveis, obtidos por meio de medição. Na Tabela F.1 são apresentados os dados climáticos presentes em arquivos EPW completos e também são descritos quais dados o EP não utiliza em seus cálculos e os dados que são estimados para a modelagem do arquivo.

Tabela F.1 – Dados climáticos presentes em arquivos EPW “**continua**”

Coluna	Variável	EP não usa	Estação IAU	Dados estimados
1	Ano		X	
2	Mês		X	
3	Dia		X	
4	Hora		X	
5	Minuto		X	
6	Fonte		X	

Tabela F.1 – Dados climáticos presentes em arquivos EPW “conclusão”

Coluna	Variável	EP não usa	Estação IAU	Dados estimados
7	TBS (°C)		X	
8	Temperatura do ponto de orvalho (°C)			X
9	UR (%)		X	
10	Pressão atmosférica (Pa)		X	
11	Radiação horizontal extraterrestrial (Wh/m ²)	X		
12	Radiação extraterrestrial direta normal (Wh/m ²)	X		
13	Intensidade da radiação horizontal infravermelha (Wh/m ²) - (na falta calcular a partir do campo Opaque Sky Cover)			X
14	Radiação global horizontal (Wh/m ²)		X	
15	Radiação normal direta (Wh/m ²)			X
16	Radiação horizontal difusa (Wh/m ²)			X
17	Iluminância global horizontal (lux)	X		
18	Iluminância normal direta (lux)	X		
19	Iluminância horizontal difusa (lux)	X		
20	Iluminância zenital (lux)	X		
21	Direção do vento (graus)		X	
22	Velocidade do vento (m/s)		X	
23	Nebulosidade (mín = 0 e máx = 10)			X
24	Cobertura do céu opaco			
25	Visibilidade (Km)	X		
26	Altura do teto (m)	X		
27	Observação do tempo presente			
28	Códigos de tempo presente			
29	Precipitação de água (mm)	X		
30	Profundidade óptica do aerossol	X		
31	Profundidade da neve (cm)			X
32	Dias desde a última queda de neve	X		
33	Albedo	X		
34	Profundidade de precipitação líquida (mm)		X	
35	Quantidade de precipitação líquida	X		

As variáveis não utilizadas para os cálculos do EP foram preenchidas de acordo com as recomendações do *Auxiliary Programs Manual* do EP (EERE, 2016b) para as variáveis de entrada que não estão disponíveis. O manual indica códigos que devem ser inseridos na falta de dados, para cada tipo de variável. Da mesma forma que as variáveis que o EP não utiliza, foram inseridos

códigos nas variáveis cobertura do céu opaco, observação do tempo presente e códigos de tempo presente, devido à falta de dados.

Para estimar os valores horários da temperatura do ponto de orvalho, foi adotada o método descrito por Alduchov e Eskridge (1996), que consiste em uma evolução da expressão conhecida como *Magnus formula*. Esse método estima a temperatura do ponto de orvalho através dos valores de temperatura do bulbo seco e umidade relativa do ar e é representado pela Equação F.1.

Equação F.1

$$T_o = \frac{b \cdot \left[\ln\left(\frac{U_r}{100}\right) + \left(\frac{a \cdot TBS}{b + T}\right) \right]}{a - \ln\left(\frac{U_r}{100}\right) - \left(\frac{a \cdot TBS}{b + T}\right)}$$

Onde:

T_o – Temperatura do ponto de orvalho (°C)

TBS – Temperatura de bulbo seco (°C)

U_r – Umidade relativa do ar (%)

a – 17,625

b – 243,04

Para a variável nebulosidade é utilizado como fonte de dados o Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) que consiste em uma das estações meteorológicas convencionais da rede de estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Esta estação fornece dados meteorológicos diários em forma digital, de acordo com as normas técnicas internacionais da Organização Meteorológica Mundial (INMET, [s.d.]). O BDMEP dispõe de dados com intervalo de observação de doze horas para o período estudado. Dessa forma, para obter os valores horários das 24 horas de cada dia para a nebulosidade é realizada a interpolação desses valores com base nos dados medidos. A interpolação para se encontrar os valores correspondentes as horas exatas é feita por interpolação linear entre os valores medidos.

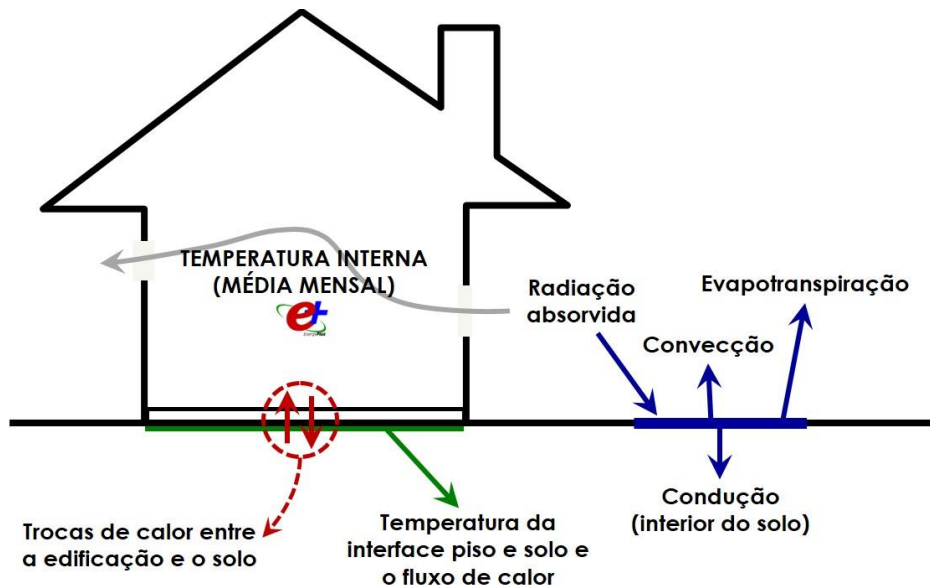
Os dados referentes a radiação solar foram obtidos pela aplicação do pré-processador *Weather-Converter*. O *Weather-Converter* além de converter o formato dos arquivos, também permitir estimar certas variáveis climáticas a partir de variáveis disponíveis (EERE, 2016b). Para que o programa identifique a variável que deve ser estimada, este indica códigos que devem ser inseridos para cada variável. Por fim, esses códigos são substituídos durante o processamento do programa pelos valores estimados. As variáveis ambientais estimadas pelo pré-processador foram radiação normal direta e radiação horizontal difusa e a variável utilizada para os cálculos do pré-processador é a radiação global horizontal medida pela estação. Logo após o arquivo de dados climáticos no formato CSV ficar completo, este é inserido no *Weather-Converter* como é descrito anteriormente nas etapas 5 e 6 de utilização do pré-processador.

APÊNDICE G – Manual do Slab

O *Slab* baseia-se em um método de cálculo, estabelecido através de um estudo 3D detalhado realizado por Bahnfleth (1989), e depois modificado por Clements (2004). Nesse estudo, o fator de escala para o fluxo de calor médio para pavimentos retangulares e em forma de L é o quociente entre a área e o perímetro do piso. O método numérico utilizado é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional, fornecendo uma solução com grande flexibilidade e bem detalhada (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). O pré-processador foi desenvolvido com a intenção de melhorar as soluções numéricas de transferência de calor com o envelope da edificação de construções com terra acoplada, fornecendo uma solução mais flexível e detalhada do que a maioria de seus contemporâneos (CLEMENTS, 2004). A Figura 2.7 apresenta um esquema representativo das trocas de calor consideradas no método de cálculo adotado pelo pré-processador.

O *Slab* possui diferentes opções de modelagem das trocas de calor entre o piso e o solo, de entrada de dados, interação com o EP e de procedimentos de simulação, requerendo do usuário conhecimento prévio do funcionamento do programa. O usuário deve definir o volume de solo considerado nos cálculos, dados meteorológicos, propriedades do solo e piso, da superfície do solo, geometria do piso, a temperatura do solo à uma dada profundidade, a evapotranspiração na superfície do solo e a altura do edifício para os cálculos de sombreamento (ANDOLSUN et al., 2012; LARSEN, 2011).

Figura G.1– Esquema representativo das trocas de calor consideradas no método de cálculo do *Slab*



Fonte: Autor

Algumas das principais características do *Slab* são:

- A simulação emprega uma técnica de solução de diferenças finitas explícita;
- É fornecido um detalhado balanço de calor pela superfície, incluindo a radiação, convecção, condução, cobertura de neve, e evapotranspiração (Figura G.1);
- Os valores das propriedades térmicas do solo e do material do piso podem ser definidos de forma independente;
- A dimensão do isolamento do perímetro pode ser definida na modelagem;
- É possível adotar isolamento vertical na fundação do piso;
- Os efeitos do sombreamento da construção no solo sobre a taxa de transferência de calor podem ser analisados;
- A simulação emprega escala de tempo em hora nos cálculos;
- O programa somente implementou modelos de pisos com formas retangulares;
- Inicialização automatizada do perfil de temperatura do solo imperturbado.

O *Slab* gera os seguintes dados nos arquivos de saída:

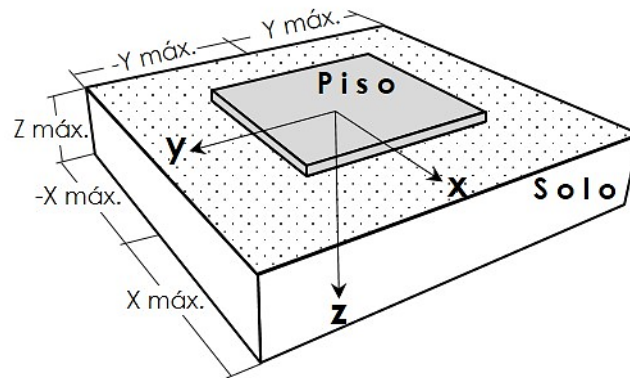
- Temperatura média mensal do núcleo, do perímetro e da interface piso/solo¹⁷ de toda área do piso;
- Fluxo de calor médio mensal nas superfícies do núcleo, do perímetro e da interface piso/solo de toda área do piso.

1. Método de cálculo do *Slab*

O método numérico para desenvolver os cálculos no programa é baseado em uma operação de diferenças finitas tridimensional. Para a aplicação desse método é necessário definir uma representação do domínio físico avaliado por um domínio virtual composto por um número finito de células de parâmetros aglomerados. O domínio virtual é modelado no programa por meio de coordenadas cartesianas, com ponto de origem no centro geométrico da laje de piso do modelo simulado (Figura G.2). Para que o método de cálculo possa ser aplicado, as células que compõem esse domínio devem ser pequenas o suficiente para que se possa assumir que suas propriedades são uniformes e que a variação de temperatura entre as células vizinhas é aproximadamente linear. Esse princípio da dimensão das células deve ser cumprido para que seja possível a aplicação da equação fundamental (equação de condução de calor ou equação de difusão de calor) - equação que regula o fluxo de calor do solo acoplado aos edifícios, Equação G.1. A equação de condução de calor é aplicada sobre cada célula que compõe o domínio permitindo a solução através de um sistema mais simples de equações (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). O programa fornece ao usuário a opção de modelar o dimensionamento dessas células ou adotar a modelagem automática gerada durante a simulação.

¹⁷ A temperatura da interface piso/solo corresponde à temperatura da face externa da laje de piso. Esse valor é adotado como temperatura do solo no programa *EnergyPlus*.

Figura G.2 - Definição do sistema de coordenadas do domínio virtual



Fonte: Autor

Equação G.1

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right)$$

Fonte: Bahnfleth (1989).

Onde:

ρ - densidade (kg/m³)

C_p - calor específico a pressão constante (J/kg.K)

T - temperatura (°C)

t - tempo (s)

x, y, z - coordenadas cartesianas

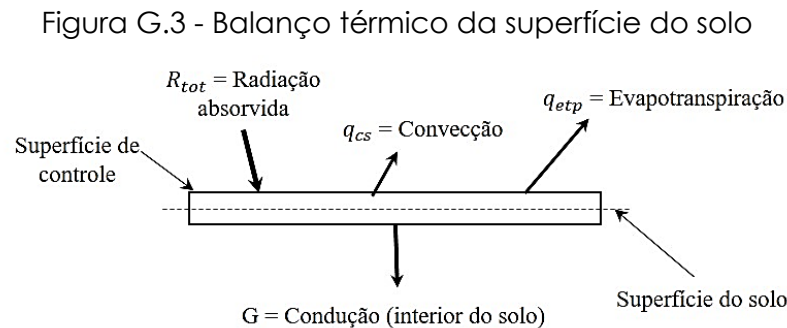
k - condutividade térmica (W/m.K)

Outro princípio importante no cálculo de transferência de calor no *Slab* é o uso da condutividade térmica efetiva para as células do domínio. A condutividade térmica efetiva faz-se necessária devido ao fato do método de cálculo do *Slab* não permite a entrada de diferentes valores para a condutividade térmica do solo. Portanto, é necessário adotar um valor representativo da condutividade térmica para o domínio considerado. Além disso, o uso de diferentes valores de condutividade térmica ocasionaria diferentes fluxos de calor nas faces de uma célula em relação as faces das células vizinhas gerando cálculos incorretos. A condutividade térmica efetiva possibilita realizar o balanço de energia das células e suas células vizinhas, garantindo a conservação de energia no cálculo (BAHNFLETH, 1989;

BAHNFLETH, W.; AMBER, J, 1990; CLEMENTS, 2004). Mais detalhes sobre o uso e aplicação da condutividade térmica efetiva nos cálculos de transferência de calor são descritos no trabalho de Bahnfleth (1989).

Os cálculos aplicados na simulação de transferência de calor da laje de piso sobre solo envolvem condições de contorno que englobam todo o complexo sistema de trocas de calor do modelo: a superfície do solo, o solo profundo, limites de campo distante e limites internos (interior da zona térmica).

A condição limite mais complexa nos cálculos de trocas de calor do modelo piso sobre solo é a superfície do solo. A complexidade nos cálculos de troca de calor na superfície do solo em contato com o ambiente externo se deve à uma variedade de mecanismos de transmissão de calor envolvidos no seu balanço térmico. Na Figura G.3 são apresentados todos os mecanismos presentes no balanço térmico da superfície do solo de forma esquemática (CLEMENTS, 2004).



Fonte: Adaptado de Bahnfleth (1989).

O balanço térmico da superfície do solo apresentado na Figura G.3, é matematicamente definido pela Equação G.2, onde a condução de calor é igual à radiação absorvida menos a convecção e a evapotranspiração.

Equação G.2

$$G = R_{tot} - q_{cs} - q_{etp}$$

Fonte: Bahnfleth (1989).

Onde:

G - taxa de condução de calor no solo

R_{tot} - saldo de radiação absorvida

q_{cs} - convecção sensível

q_{etp} - evapotranspiração (W/m^2)

A condição limite do solo profundo consiste nas condições de fluxo de calor na profundidade máxima do solo considerada nos cálculos. Dependendo do nível e presença de lençóis freáticos no solo, essa condição limite pode ser considerada como zero fluxo de calor ou em condições de temperatura constante (CLEMENTS, 2004). A condição limite zero fluxo considera que não há variação de temperatura no solo em relação a profundidade, ou seja, assume uma temperatura única para o solo. Alguns pesquisadores afirmam que na presença do lençol freático próximo à superfície do solo, a condição deve considerar uma temperatura constante, porém esta afirmação tem sido desacreditada pois a localização do lençol freático varia com o tempo e o espaço (BAHNFLETH, 1989).

Os limites de campo distante representam as condições de troca de calor e temperatura do solo longe da edificação. A presença de edificações sobre o solo influencia de forma significativa o seu regime térmico. Quando o solo está em condições normais, sem a influência de edificações ou outros agentes, solo denominado imperturbado, a sua distribuição de temperatura é apenas uma função da profundidade e do tempo (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990).

Por último, a condição limite interior que representa o limite interior da zona térmica (superfície do piso) é conduzida pelas trocas de calor geradas pelos mecanismos de transmissão de calor por convecção e radiação térmica combinados (CLEMENTS, 2004).

2. Descrição dos dados de entrada do *Slab*

Os parâmetros de entrada do *Slab* podem ser inseridos no interior do arquivo de entrada do EP ou em um arquivo de entrada do *Slab*. Independente do procedimento de simulação, são inseridos em seis classes. Quando os

parâmetros de entrada são inseridos no interior do arquivo de entrada do EP, essas classes podem ser identificadas pelo prefixo “*Ground Heat Transfer: Slab*”. Cada classe possui uma série de campos de entrada, os quais solicitam dados referentes às características da edificação e do solo, e às condições de funcionamento do próprio programa. O *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a) e o *EnergyPlus University Course Teaching Material* (GARD ANALYTICS, 2003) apresentam instruções básicas de uso do programa e a descrição de suas variáveis de entrada e de saída.

Os campos de entrada de dados do *Slab* são descritos a seguir, com os seus valores de referência fornecidos pelo programa e seu manual, além disso, no final desta seção é apresentada uma tabela resumo, Tabela G.7, com os valores de referência (EERE, 2016a, 2016b). São indicadas também algumas recomendações e observações com base na literatura.

1) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: Materials*

(a) *NMAT: Number of materials:*

Número de materiais diferentes usados no modelo, ou seja, se refere aos materiais do piso da edificação e ao solo. O número de materiais não é limitado neste campo. O manual do EP, ao descrever esse campo de entrada, menciona que usualmente é adotado o valor 2, correspondente ao piso e ao solo. (EERE, 2016a). Efetivamente, não é possível inserir mais do que dois materiais, pois nos campos a seguir (referentes as propriedades desses materiais) há espaço somente para dois materiais distintos.

(b) *ALBEDO: Surface Albedo: No Snow* e *ALBEDO: Surface Albedo: Snow*

Especifica o valor do albedo da superfície do solo dentro do domínio horizontal, para dias sem ou com cobertura de neve. Segundo Li et al (2013) o albedo (refletividade solar) é uma característica térmica importante dos materiais, que indica o potencial de uma superfície de reflexão solar. É a razão entre quantidade de radiação solar refletida e a quantidade de radiação solar incidente na superfície. O albedo varia em uma escala de 0 a 1, sendo

que 0 significa que a superfície não pode refletir (absorve 100% da radiação solar) e 1 significa 100% de reflexão da radiação solar (Tabela G.1). O *Slab* fornece dois valores de referência, de 0,05 para asfalto e 0,95 para a neve fresca baseados em dados de BAHNFLETH (1989) para a América do Norte.

Tabela G.1 - Variação do albedo das superfícies

SUPERFÍCIE		Albedo
Desertos		0,20 – 0,45
Neve		0,30 – 0,40
Solos	Escuro e úmido	0,05
	Claro e seco	0,40
Gramma	Alta (1m)	0,16
	Baixa (0,02m)	0,26

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

(c) EP_{SLW}: *Surface Emissivity: No Snow* e EP_{SLW}: *Surface Emissivity: Snow*

Este campo especifica a emissividade (térmica) da superfície do solo, sem ou com neve. Emissividade térmica é uma propriedade da superfície de um dado material que caracteriza a sua capacidade de emitir e absorver radiação térmica. Em outras palavras, é a razão entre a energia radiante emitida pela superfície e a emissão máxima teórica de um corpo negro ideal nas mesmas condições de temperatura, geometria e espectro. A emissividade influencia na temperatura e na transferência de calor através das superfícies, variando em uma escala de 0 a 1 (HONNER et al., 2016; OKE, 1987; PINI et al., 2016). Segundo Oke (1987), para superfícies naturais, a emissividade geralmente se encontra próxima a 1 (Tabela G.2), porém, desprezar a sua variação pode resultar em um impacto de até 1°C na temperatura da maioria das superfícies. O manual do programa fornece o valor de referência 0,95 para os dois casos: com neve e sem neve (EERE, 2016a).

Tabela G.2 - Variação da emissividade das superfícies

SUPERFÍCIE		EMISSIVIDADE
Asfalto (vias urbanas)		0,95
Desertos		0,84 – 0,91
Neve		0,82 – 0,99
Solos	Escuro e úmido	0,98
	Claro e seco	0,90
Grama	Alta (1m)	0,90
	Baixa (0,02m)	0,95

Fonte: Oke (1987).

(d) *Z0: Surface Roughness: No Snow* e *Z0: Surface Roughness: Snow* (cm)

A rugosidade da superfície se refere à camada limite superior do domínio vertical, que é a superfície do domínio horizontal presente no entorno da edificação, ou seja, a cobertura do solo. Para estes campos de entrada é considerada a superfície sem ou com a presença de neve. Segundo Sellers (1965) a rugosidade pode ser tão suave a ponto de medir apenas um milímetro ou possuir dimensões maiores que dois metros de altura, como em áreas florestais. Esse dado é utilizado para determinar o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície do solo e o ar. Porém, apesar dessa altura da rugosidade (z_0) ser muito próxima à altura real da cobertura do solo, esta rugosidade especifica a altura em que a velocidade (medida experimentalmente) de um perfil do vento vai a zero, ou seja é a rugosidade aerodinâmica da superfície (BAHNFLETH, 1989; OKE, 1987). Os valores fornecidos pelo manual do programa são 0,75 cm e 0,05 cm para cobertura sem neve e com neve, respectivamente, porém o valor de referência no programa é de 0,25 cm para situações com neve. (EERE, 2016a). A Tabela G.3 apresenta valores de referência para a rugosidade de diferentes superfícies.

Tabela G.3 - Variação da rugosidade das superfícies

SUPERFÍCIE		RUGOSIDADE (cm)
Solo		0,1 - 1
Areia (deserto)		0,03
Neve		0,05 - 0,1
Gramma	2 - 10cm	0,3 - 1
	25 - 100cm	4 - 10

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

(e) HIN: *Indoor Hconv. Downward Flow* e HIN: *Indoor Hconv. Upward* (W/m².K)

Especifica o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação combinadas entre a superfície superior do piso no interior do edifício e o ar da zona térmica. O calor pode fluir verticalmente nos dois sentidos, e o programa, durante a simulação, alterna entre os coeficientes usados se o sentido do fluxo de calor muda de direção. O manual e a descrição do campo de entrada no programa fornecem os valores de referência encontrados na *ASHRAE Handbook of Fundamentals*. Segundo a *ASHRAE* (2009b), os valores fornecidos na *ASHRAE Handbook of Fundamentals* para o coeficiente de transferência de calor variam com o sentido do fluxo, o movimento do ar e a emissividade da superfície. Para ambientes internos sem movimentação do ar e superfícies não refletivas com $\varepsilon = 0.90$, o coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação com fluxo vertical varia de 6,13 W/(m².K), com fluxo descendente, a 9,26 W/(m².K), com fluxo ascendente (*ASHRAE*, 2009b).

II) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps*

(a) RHO: *Slab Material density*(kg/m³)

O piso da edificação constitui o fechamento onde ocorre a transferência de calor entre o solo e o interior do ambiente construído. Dessa forma, as suas propriedades térmicas são de fundamental importância para os cálculos de troca de calor entre o solo, o piso e ambiente interno. Este campo especifica

a densidade do material que compõe o piso. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 2300 kg/m³.

(b) RHO: Soil Density (kg/m³)

Especifica a densidade do solo. A densidade do solo (ρ) é definida como a relação entre a massa de sólidos secos do solo e seu volume total. A estrutura, a umidade, a compactação, o manejo do solo, a profundidade e outras características inerentes do solo definem a sua densidade. Sua unidade é expressa em kg/m³, e representada na Equação G.3. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1200 kg/m³. A Tabela G.4 apresenta valores de referência para a densidade do solo.

Equação G.3

$$\rho = \frac{M_s}{V_s}$$

Onde:

ρ – densidade (kg/m³)

M_s – massa do solo seco (kg)

V_s – volume do solo (m³)

Tabela G.4 – Valor de referência para a densidade do solo

Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo turfa ¹⁸
1600 – 2000 kg/m ³	1600 – 2000 kg/m ³	300 – 1100 kg/m ³

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

(c) CP: Slab CP (J/kg.K)

Especifica o calor específico do piso. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 650 J/kg.K.

¹⁸ Solos com parte de sua composição de matéria orgânica, oriunda principalmente da decomposição de restos vegetais. É um solo poroso, muito explorado para uso agrícola, encontrado em áreas de clima frio.

(d) CP: Soil CP (J/kg.K)

Especifica o calor específico do solo. O calor específico do solo (C_p), também chamado de capacidade térmica mássica, consiste na quantidade de energia necessária para aumentar em 1°C a temperatura de 1g de solo. Sua unidade é expressa em J/(kg.K), e representada pela Equação G.4. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1200 J/kg.K. A Tabela G.5 apresenta valores de referência para o calor específico do solo.

Equação G.4

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T}$$

Onde:

 C_p – calor específico (J/kg.K)

Q – quantidade de calor (J)

m – massa (kg)

 ΔT – variação da temperatura (K)

Tabela G.5 – Valor de referência para o calor específico do solo

Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo turfa
800 – 1480 J/kg.K	890 – 1550 J/kg.K	1920 – 3650 J/kg.K

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Como o solo é um sistema multicomponentente, o seu calor específico consiste na somatória do calor específico das frações que o constituem (sólida, líquida e gasosa). A oscilação da fração líquida do solo influencia de forma significativa o calor específico, o aumentando consideravelmente com o incremento da umidade. O efeito da umidade no calor específico, depende do tipo de solo. O calor específico do solo reflete a sua capacidade de atuar como reservatório de calor. Dessa forma, a variação de temperatura do solo em um determinado tempo depende do seu calor específico e da forma como o calor é transmitido (PREVEDELLO; ARMINDO, 2015).

(e) TCON: *Slab* k (W/m.K)

Especifica a condutividade térmica da laje. O programa *Slab* sugere o valor de referência de 0,9 W/m.K.

(f) TCON: *Soil* k (W/m.K)

Especifica a condutividade térmica do solo. A condutividade térmica (k) expressa a capacidade do material em conduzir calor, e é por definição, o quociente entre a densidade de fluxo térmico e o gradiente de temperatura. Sua unidade é expressa em W/(m.K), e representada pela Equação G.5. A Tabela G.6 apresenta valores de referência para a condutividade do solo.

Equação G.5

$$k = \frac{q}{A \cdot (\Delta T/l)}$$

Onde:

q – fluxo de calor (W)

A – área da seção transversal (m²)

ΔT – gradiente de temperatura (K)

l – distância percorrida pelo calor (m)

k - condutividade térmica (W/m.K)

Tabela G.6 – Valor de referência para a condutividade do solo

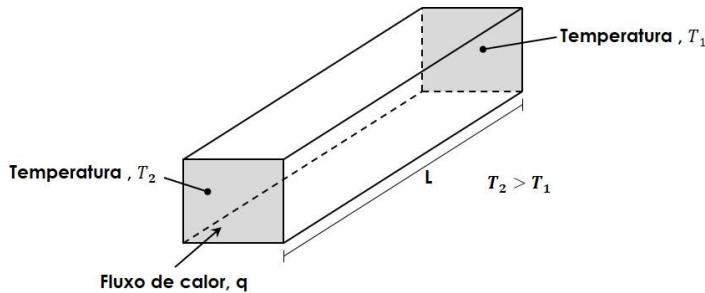
Tipos de solo		
Solo arenoso (40% de vazios)	Solo argiloso (40% de vazios)	Solo turfa
0,30 – 2,20 W/m.K	0,25 – 1,58 W/m.K	0,06 – 0,50 W/m.K

Fonte: Adaptado de Oke (1987).

Segundo Prevedello e Armindo (2015), a condutividade térmica do solo é definida pela quantidade de energia transmitida na unidade de comprimento por unidade de tempo, quando a diferença de temperatura para esta distância é dada por unidade de área. A condutividade térmica do solo, considerando um elemento prismático composto por ele, é definida através da média das condutividades entre as duas seções transversais do elemento, pois ela varia em função da alteração de temperatura e de composição do

solo entre essas seções, Figura G.4 (FAROUKI, 1981). O programa *Slab* sugere o valor de referência de 1 W/m.K.

Figura G.4 - Fluxo de calor através de um elemento prismático do solo



Fonte: Adaptado de Farouki (1981).

III) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds*

(a) EVTR: *Is surface evapotranspiration modeled*

Especifica se a evapotranspiração será ou não considerada na simulação. A evapotranspiração compreende todos os processos de perda de calor latente na superfície do solo, incluindo a evaporação, convecção e transpiração pela vegetação (BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). O programa permite duas opções para esse campo de entrada, "true" para ativar a evapotranspiração e "false" para desativá-la (EERE, 2016a). Quando ativo, assume-se que essa opção tende a acentuar os efeitos da troca de calor latente nos cálculos. Isso acontece porque é utilizada a evapotranspiração potencial (situação em que a superfície do solo está saturada). A taxa de evapotranspiração potencial é teórica e se baseia nas condições meteorológicas (radiação incidente, velocidade do vento, temperatura do ar e taxa de umidade) (BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). O uso da evapotranspiração no cálculo de transferência de calor apresenta maior influência nos resultados em climas quentes e secos, especialmente na temperatura superficial do solo. Um exemplo dessa afirmação é o estudo de BAHNFLETH (1989), em que ele faz a comparação do método de cálculo com a evapotranspiração ativada e desativada, em diferentes condições climáticas. Os resultados mostraram que os casos em que ela estava

desativada, as temperaturas médias da superfície do solo eram superiores às temperaturas médias do ar, entre 1 a 4°C, e a amplitude das temperaturas da superfície do solo foram mais elevadas que a amplitude da temperatura do ar. O contrário ocorreu nos casos ativos, onde as temperaturas médias da superfície do solo foram inferiores às médias do ar, chegando a até 10°C de diferença. As maiores diferenças entre o uso da evapotranspiração potencial foram apresentadas no clima quente e seco.

(b) FIXBC: *is the lower boundary at a fixed temperature*

Permite definir se o modelo irá utilizar uma temperatura fixa ou condição de zero fluxo de calor para o limite inferior do domínio vertical. O campo possui duas opções de entrada, “*true*” para temperatura fixa e “*false*” para fluxo zero. Quando definida a condição de temperatura fixa, o programa calcula o perfil de temperatura não perturbado e esse valor é utilizado na profundidade limite do domínio do modelo (EERE, 2016a). A alteração da condição limite inferior do domínio isoladamente tem pouca influência nos resultados (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990). Alguns pesquisadores afirmam que a definição deste parâmetro deve ser baseada na presença e distância de lençóis freáticos no domínio do modelo, já que a taxa de umidade tem significativa influência na condutividade térmica do solo (BAHNFLETH, 1989; CLEMENTS, 2004). Porém, segundo Clements (2004), essa teoria vem sendo desacreditada, pois a profundidade do lençol freático flutua com o tempo e a localização, dessa forma ele não atua como um limite de temperatura constante, mas como uma superfície de solo que tem variação em sua condutividade térmica. A comparação entre o uso de ambas as condições limite inferiores do domínio mostra que a diferença entre as taxas de transferência de calor para a temperatura fixa e o zero fluxo depende da relação área/perímetro e da profundidade adotada para o domínio vertical. O efeito das condições limite inferiores varia com a taxa de transferência de calor, o efeito aumenta com o crescimento dessa taxa. A relação área/perímetro, por sua vez, influencia nas taxas de transferência de calor pelo piso (quanto menor a relação, maior a taxa de transferência de

calor e o contrário ocorre quanto menor for essa relação). Conseqüentemente, a sensibilidade da edificação a condição limite inferior também varia com essa relação, no mesmo sentido que a transferência de calor (BAHNFLETH, 1989). Quanto menor a profundidade do domínio vertical mais significativo é o efeito de uma dada alteração das condições limite inferiores.

(c) TDEEPin (°C)

Esse campo de entrada está relacionado ao campo anterior "FIXBC: *is the lower boundary at a fixed temperature*". Aqui é definida a temperatura fixa para a condição limite inferior do domínio vertical do modelo elaborado, se for selecionada a opção "true" para o campo anterior. Se a opção selecionada for "false" o campo deverá ser deixado em branco, o que significa que o *Slab* irá calcular o perfil de temperatura não perturbada a ser usado na condição limite inferior do domínio vertical.

(d) USRHflag: *is the ground surface h specified by the use*

Permite a opção de definir um coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo ou não. Para situações em que se escolhe não definir um coeficiente, é inserido nesse campo a opção "false", e o programa então irá calcular o coeficiente de transferência de calor baseando-se nas condições meteorológicas disponíveis. Se for inserida no campo a opção "true", significa que o usuário deverá definir um coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo.

(e) USRH: *User specified ground surface heat transfer coefficient*

Define-se o coeficiente de transferência de calor para a superfície do solo, se o campo anterior estiver com a opção "true", caso contrário o campo deve ser deixado em branco.

IV) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps*

(a) IYRS: *Number of years to iterate*

Este campo define o número de anos que será utilizado para se obter os resultados, através de processos iterativos. Quanto maior o número de anos, maior a precisão do resultado da simulação. Segundo o *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a), o valor de 10 anos como referência, fornecido pelo programa, é satisfatório para que se obtenha resultados confiáveis. É importante destacar que nos primeiros anos de operação da edificação o comportamento térmico do solo passa por mudanças, sendo necessário vários anos para que o perfil perturbado mude para o perfil imperturbado sob um edifício (EERE, 2016a).

(b) Shape: Slab shape

Especifica o formato do piso, porém só a forma retangular está implementada podendo-se inserir somente o valor zero nesse campo. A limitação do formato retangular se deve à simplificação da geometria para auxiliar na modelagem da transferência de calor. Formas retangulares e quadradas são mais fáceis de modelar, e os resultados desse modelo simplificado podem ser aplicados para geometrias mais complexas, porém há de se assumir possíveis limitações na aplicação e exatidão no resultado (CLEMENTS, 2004). Apesar da limitação da forma, segundo Bahnfleth (1989) em sua pesquisa quando comparados pisos em formato retangular e na forma de "L", a relação área/perímetro parece ter maior influência sobre as trocas de calor do piso do que a variação da forma isoladamente.

(c) HBLDG: Building height (m)

Especifica a altura da edificação para que o programa calcule o sombreamento sobre o solo causado pelo próprio edifício. As condições climáticas têm grande influência na magnitude do efeito deste parâmetro. Estudos comparativos mostraram que o uso do sombreamento sobre o solo, pode resultar em uma variação de mais de 20% nas taxas de transferência de calor da laje de piso, em climas com alto potencial de evapotranspiração. Por outro lado, a variação da orientação da edificação resultou em valores idênticos (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990).

(d) TIN (*January – December*) Indoor Average Temperature Setpoint (°C)

Os doze campos presentes correspondem às temperaturas médias mensais internas do ar da edificação para cada mês do ano. Esses valores influenciam diretamente nas trocas de calor entre o ambiente interno e o solo. Para obtê-los é necessário realizar uma simulação preliminar que fornecerá uma primeira estimativa da temperatura interna do ar da edificação (média mensal). Em edificações multizonas esse valor médio é obtido por meio de uma média ponderada das temperaturas médias de cada zona térmica.

(e) TINamp: *Daily Indoor sine wave variation amplitude*

Este campo possibilita impor uma variação sinusoidal diária na temperatura interna da edificação. O valor definido corresponde à amplitude da onda senoidal. Esse valor é obtido por meio de uma simulação preliminar, a qual fornece a variação de temperatura diária da edificação. Através dos valores máximo e mínimo de temperatura de cada dia do ano encontram-se as amplitudes diárias. A amplitude da variação da onda senoidal interna diária corresponde à média das amplitudes diárias de todos os dias do ano. O programa sugere como valor de referência 0 (sem variação diária na temperatura interna).

(f) ConvTol: *Convergence Tolerance* (°C)

A tolerância de convergência é definida para controlar o processo iterativo. A iteração ocorre até que a diferença de temperatura das últimas iterações, seja menor do que o valor de tolerância definido, obtendo-se assim os resultados finais. O programa sugere como valor de referência 0,1°C.

V) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: Insulation***(a)** RINS: *R value of under slab insulation*

Especifica o valor da resistência térmica do isolamento horizontal presente logo abaixo da laje. Caso o isolamento vertical estiver selecionado, esse campo deverá ser deixado em branco ou inserido o valor zero. Apesar de

haver a possibilidade de adicionar duas tipologias de isolamento, as duas opções não podem estar ativas juntas (horizontal e vertical).

(b) DINS: *Width of strip of under slab insulation*

Define-se a dimensão em metros da largura da faixa de isolamento do perímetro abaixo do piso. Novamente se o isolamento vertical estiver selecionado, esse campo deverá ser deixado em branco ou com o valor zero.

(c) RVINS: *R value of vertical insulation*

Este campo especifica a resistência térmica do isolamento vertical presente nas bordas do piso atingindo a profundidade definida no campo “ZVINS: *Depth of vertical insulation*”. Este campo deverá ser deixado em branco ou inserir-se o valor 0, caso o isolamento horizontal, abaixo do piso, estiver selecionado.

(d) ZVINS: *Depth of vertical insulation*

Define a profundidade do isolamento vertical, a partir do piso até o término do isolamento. Se o isolamento horizontal estiver sendo usado, ou seja, o isolamento vertical não estiver ativo o campo deverá ser deixado em branco ou com o valor zero.

(e) IVINS: *Flag is there vertical insulation*

Especifica se o isolamento vertical está ativo ou não. O campo oferece duas opções, 1 para ativo e zero para desativado.

VI) **Classe:** *Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab*

(a) APRatio: *The area to perimeter ratio for this slab (m)*

Este campo fornece a relação área/ perímetro do piso da edificação avaliada. Através da proporção área/perímetro o *Slab* cria um piso equivalente e o separa em área de núcleo e área do perímetro, de acordo com as dimensões do piso, podendo assim realizar os cálculos de transferência de calor para cada área separadamente (LARSEN, 2011). A proporção

área/perímetro se relaciona diretamente com o fluxo de calor médio em pisos com formatos retangulares e em forma de “L”. Quanto maior sua proporção, maior a contribuição do núcleo no fluxo de calor no piso. É esperado que a área do perímetro tenha maior fluxo de calor do que o apresentado na área do núcleo (BAHNFLETH, 1989). O programa *Slab* não permite a inserção de valores inferiores a 1,5m e maiores que 22m.

(b) SLABDEPTH: *Thickness of slab on grade (m)*

Define a espessura do piso, a qual deverá ser de até 0,25m. É necessário que a superfície inferior da camada do piso esteja no *mesmo nível da superfície externa do solo*. Segundo o *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016a), pisos demasiadamente espessos interferem na precisão dos resultados dos cálculos.

(c) CLEARANCE: *Distance from edge of slab to domain edge (m)*

Este campo especifica a dimensão do domínio horizontal do modelo elaborado. O domínio é à distância da borda da área do modelo até o centro geométrico do piso. Essa distância é usada para definir a extensão horizontal do domínio.

(d) ZCLEARANCE: *Distance from bottom of slab to domain bottom (m)*

Especifica a dimensão do domínio vertical do modelo, ou seja, é a distância vertical entre o piso até o limite inferior da área modelada como domínio. É a dimensão usada para definir a dimensão vertical do domínio.

A Tabela G.7 apresenta um resumo dos dados de entrada do *Slab* e seus valores de referência (*defaults*) fornecido pelo pré-processador e seu manual (EERE, 2016b, 2016c)

Tabela G.7 - Campos de entrada do *Slab* “**continua**”

Classes	Campos de entrada	Valores de referência
I) Ground Heat Transfer: Slab: Materials:	NMAT: Number of materials	–
	ALBEDO: Surface Albedo: No Snow	0,16
	ALBEDO: Surface Albedo: Snow	0,4
	EPSLW: Surface Emissivity: No Snow	0,94

Fonte: EERE (2016).

Tabela G.7 - Campos de entrada do Slab “conclusão”

Classes	Campos de entrada	Valores de referência
I) Ground Heat Transfer: Slab: Materials:	EPSLW: Surface Emissivity: Snow	0,86
	Z0: Surface Roughness: No Snow (cm)	0,75
	Z0: Surface Roughness: Snow (cm)	0,25
	HIN: Indoor Hconv. Downward Flow (W/m ² .K)	6,13
	HIN: Indoor Hconv. Upward (W/m ² .K)	9,26
II) Ground Heat Transfer: Slab: MatlProps	RHO: Slab Material density (kg/m ³)	2300
	RHO: Soil Density (kg/m ³)	1200
	CP: Slab CP (J/kg.K)	650
	CP: Soil CP (J/kg.K)	1200
	TCON: Slab k (W/m.K)	0,9
III) Ground Heat Transfer: Slab: BoundConds	TCON: Soil k (W/m.K)	1
	EVTR: Is surface evapotranspiration modeled	TRUE ou FALSE
	FIXBC: is the lower boundary at a fixed temperature	TRUE ou FALSE
	TDEEPin (°C)	-
	USRHflag: is the ground surface h specified by the use	TRUE ou FALSE
IV) Ground Heat Transfer: Slab: BldgProps	USRH: User specified ground surface heat transfer coefficient (W/m ² .K)	-
	IYRS: Number of years to iterate	10
	Shape: Slab shape	0
	HBLDG: Building height (m)	-
	TIN (January – December) Indoor Average Temperature Setpoint (°C)	22
	TINamp: Daily Indoor sine wave variation amplitude	0
V) Ground Heat Transfer: Slab: Insulation	ConvTol: Convergence Tolerance	0,1
	RINS: R value of under slab insulation (m ² .K/W)	0
	DINS: Width of strip of under slab insulation (m)	0
	RVINS: R value of vertical insulation (m ² .K/W)	0
	ZVINS: Depth of vertical insulation (m)	0
VI) Ground Heat Transfer: Slab: EquivalentSlab	IVINS: Flag is there vertical insulation	0 ou 1
	APRatio: The area to perimeter ratio for this slab	-
	SLABDEPTH: Thickness of slab on grade (m)	0,1
	CLEARANCE: Distance from edge of slab to domain edge (m)	15
	ZCLEARANCE: Distance from bottom of slab to domain bottom (m)	15

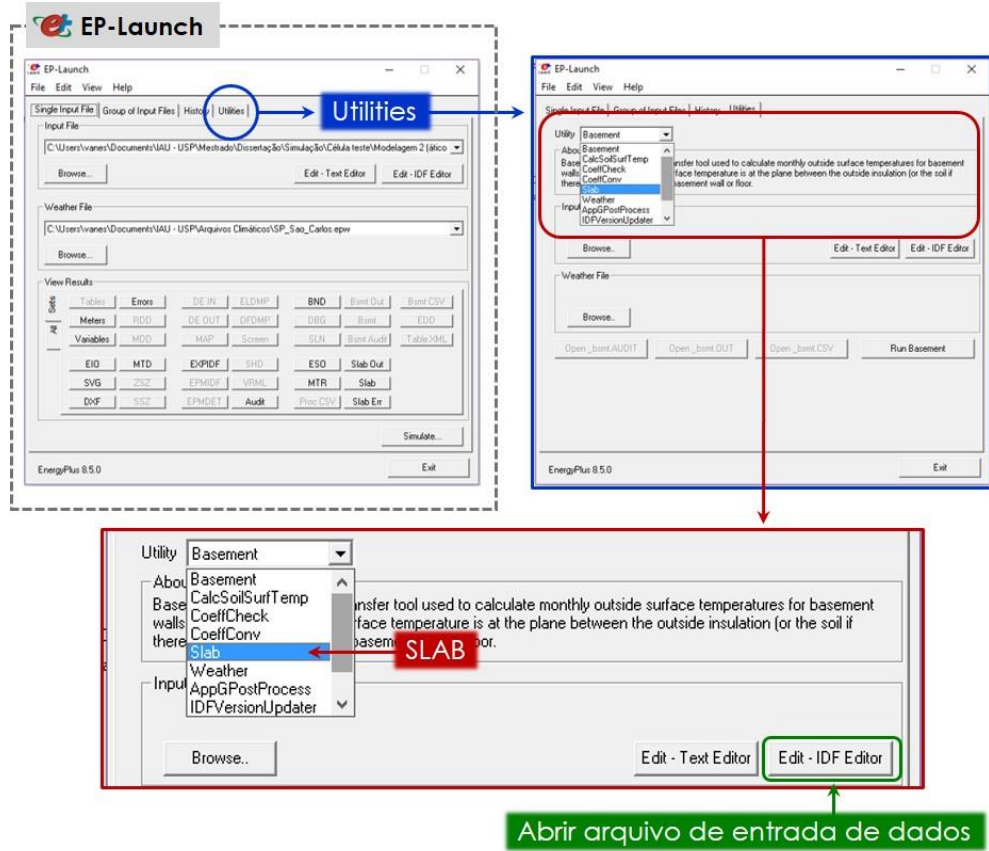
Fonte: EERE (2016).

3. Funcionamento do *Slab*

O *Slab* é um pré-processador bastante complexo, que permite diferentes formas de acionamento e de modelagem. Seu acionamento e interação com o EP podem ocorrer de duas maneiras distintas: externamente, em um arquivo de entrada de dados do *Slab* independente, ou internamente, no arquivo de entrada de dados do EP.

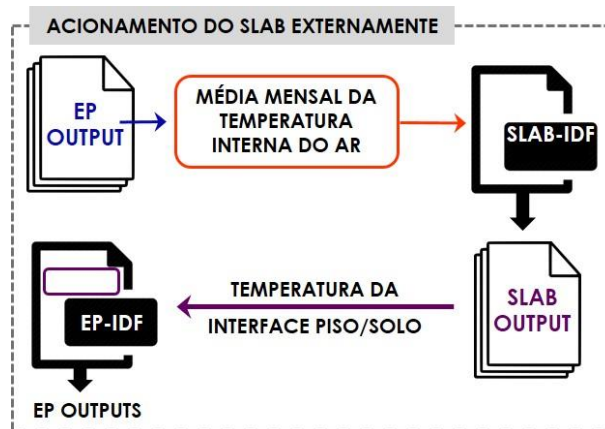
Para acessar o arquivo de dados de entrada independente do *Slab*, basta direcionar-se para a aba “*Utilities*” presente na janela de comando do EP (EP-*Launch*), selecionar a opção *Slab* no campo “*Utility*” e em seguida dirigir-se para o editor de entrada de dados (*Edit – IDF Editor*), Figura G.4. Quando essa opção é selecionada, o *Slab* é rodado individualmente, sendo necessário realizar a interação com o EP manualmente. Isso significa que o usuário deve retirar os dados de temperatura da interface piso/solo do arquivo de saída do *Slab* e inseri-los no arquivo de entrada do EP no objeto “*Site:GroundTemperature:BuildingSurface*”, Figura G.5. Para que o EP utilize os dados de entrada inseridos neste objeto, a condição limite exterior da superfície do piso (“*Outside Boundary Condition*”) deve ser definida como “*Ground*”.

Figura G.4 - Acesso ao arquivo de dados de entrada do Slab



Fonte: Autor

Figura G.5 - Aacionamento do Slab externamente

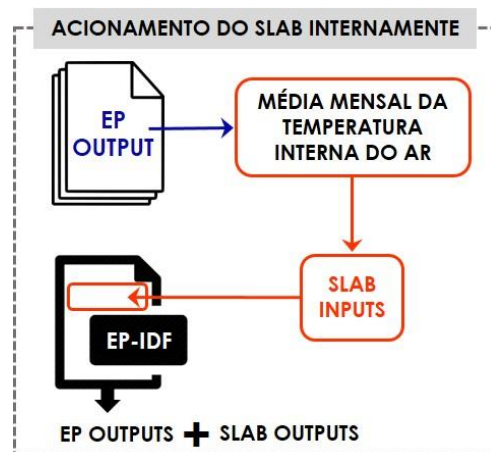


Fonte: Autor

A segunda opção é acionar o *Slab* internamente no arquivo de entrada de dados do EP (*.idf), na classe “Ground Heat Transfer”. Essa opção facilita o processo de simulação, pois todos os dados de entrada do *Slab* são inseridos

dentro do próprio arquivo de entrada do EP e o processo de interação entre os programas é feito automaticamente, Figura G.6 (LARSEN, 2011). Para que o EP utilize os resultados gerados pelo *Slab* durante a simulação, o campo de entrada que define a condição limite exterior da superfície do piso deve estar definida: *GroundSlabPreprocessorAverage*, *GroundSlabPreprocessorCore* ou *GroundSlabPreprocessorPerimeter*. As opções de entrada da condição limite exterior da superfície do piso dizem respeito à qual das séries de temperatura fornecidas pelo *Slab* será adotada na simulação do EP.

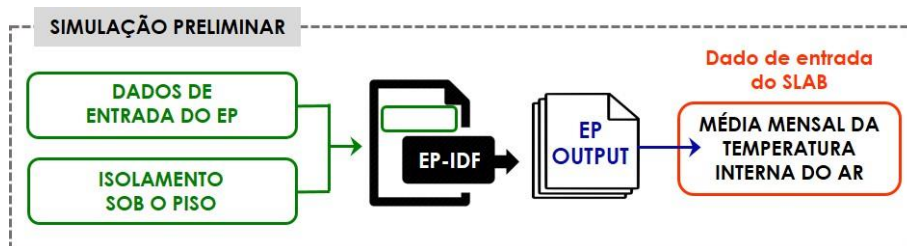
Figura G.6 - Acionamento do Slab internamente



Fonte: Autor

Independentemente de qual das opções acima for adotada para o acionamento do *Slab*, é necessário realizar uma simulação prévia pelo EP, denominada de simulação preliminar. A simulação preliminar irá fornecer uma primeira estimativa da temperatura interna do ar da edificação (média mensal), Figura G.7. Essa série de valores mensais de temperatura é um dado de entrada do *Slab*. Durante a modelagem da primeira simulação, o usuário não possui esse dado, especialmente em edifícios não condicionados artificialmente. O *Auxiliary Programs Manual* (EERE, 2016b), recomenda que nessa simulação adicione-se uma camada com elevado isolamento no piso, para que os resultados não sofram influência de uma temperatura inicial do solo.

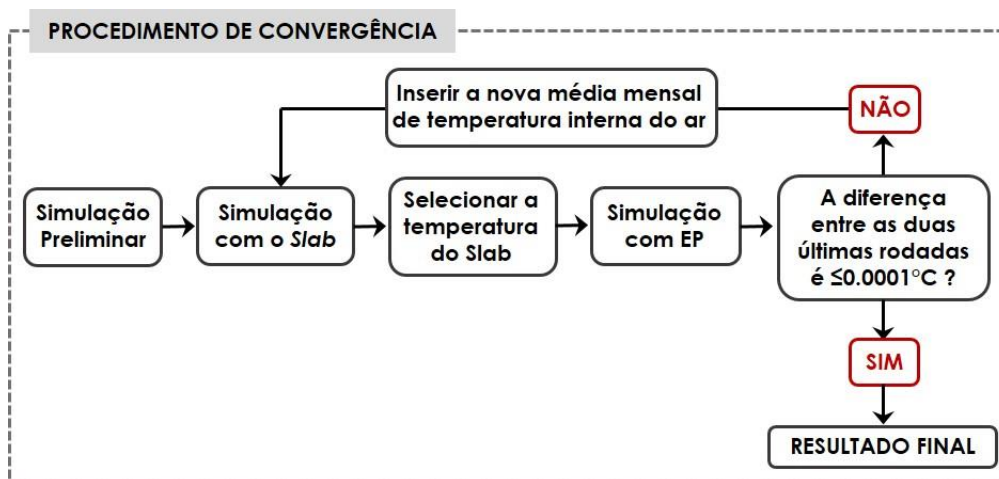
Figura G.7 - Procedimento da simulação preliminar



Fonte: Autor

Em seguida à simulação preliminar e à primeira execução dos programas *Slab* e EP, pode-se ainda obter como resultado do EP uma temperatura interior do ar da edificação muito distinta daquela inserida como dado de entrada do *Slab*. Segundo Andolsun et al (2012), para o ajuste desse dado, é necessário adotar um procedimento de convergência em que são necessárias simulações consecutivas com a iteração entre os resultados gerados pelo *Slab* e pelo EP (Figura G.8). Eles consideram que a convergência é obtida quando a diferença nos valores médios mensais entre as duas últimas simulações da temperatura interna do ar da edificação for inferior à 0,0001°C.

Figura G.8 - Simulação com o procedimento de convergência



Fonte: Autor

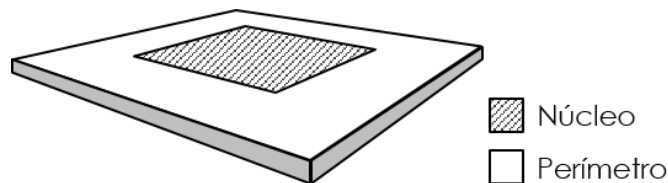
Em relação às formas de modelagem, o *Slab* permite diferentes modelagens do piso da edificação e do domínio virtual. Com o objetivo de representar as trocas de calor mais próximas do real, a estrutura do piso pode ser modelada

dividindo-a em duas superfícies, "núcleo" e de "perímetro" (Figura G.9). O maior fluxo de calor no piso pode ser esperado de uma tira larga de 1,5 metros em torno do perímetro. Porém apesar da maior contribuição nas trocas de calor pelo perímetro, a participação do núcleo também pode influenciar significativamente no fluxo de calor. A transferência de calor na área do núcleo varia em proporção direta com a condutividade térmica do solo, aumentando a contribuição do fluxo de calor com o aumento da condutividade térmica do solo (BAHNFLETH, 1989; BAHNFLETH; PEDERSEN, 1990; CLEMENTS, 2004).

Para as diferentes formas de modelagem do piso, o *Slab* fornece três séries de dados de temperaturas mensais: a temperatura média (média ponderada da área da superfície), da área do núcleo e do perímetro. Segundo Clements (2004) a principal dificuldade com a utilização deste tipo de interface entre modelos uni e tridimensional é a questão de qual temperatura usar. As temperaturas podem variar bastante, dependendo da presença e/ou do nível de isolamento da superfície de fundação, dessa forma ao adotar a temperatura média da superfície pode-se mensurar a transferência de calor da laje erroneamente. Além disso, em situações reais as trocas de calor entre o piso e o solo não se distribui de forma uniforme por toda superfície em contato com o solo. Em um estudo no qual são comparados resultados de simulação do *Slab*, variando a escolha da temperatura, com os resultados obtidos pelo método de diferenças finitas (FDM) tido como caso base, o uso das temperaturas do núcleo e do perímetro mitigaram os erros associados à utilização de uma temperatura única, apresentando melhores resultados de transferência de calor comparados ao caso base (CLEMENTS, 2004). É importante destacar que para definir temperaturas distintas no piso se faz necessário descrever as superfícies do núcleo e do perímetro separadamente durante a modelagem da geometria do modelo como apresenta a Figura 9. A temperatura a ser adotada na simulação é definida no campo de entrada que caracteriza a condição limite exterior da superfície ou superfícies do piso ("*Outside Boundary Condition*"), com as opções: *GroundSlabPreprocessorAverage* (adota a temperatura média),

GroundSlabPreprocessorCore (adota a temperatura do núcleo) ou *GroundSlabPreprocessorPerimeter* (adota a temperatura do perímetro). Destaca-se que o *Slab* permite a modelagem de apenas um piso, ou seja, ele considera o piso de toda a edificação como um elemento único, mesmo quando esta é multizona.

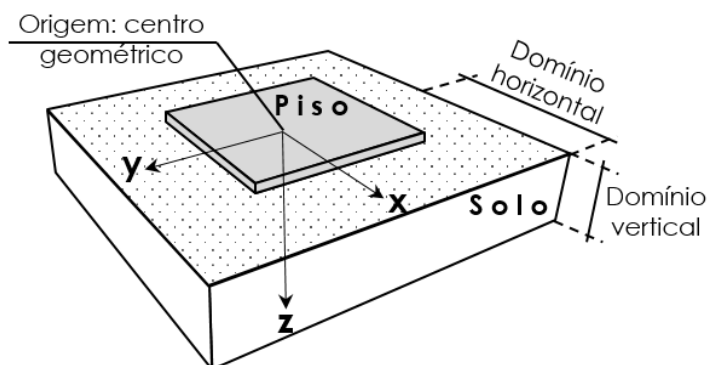
Figura G.9 - Divisão da superfície do piso sobre solo



Fonte: Autor

Além da forma de modelagem do piso, também é possível definir qual a dimensão do domínio virtual considerado nos cálculos do *Slab*. Os domínios se referem à extensão horizontal e vertical do solo (da superfície inferior do piso em sentido à profundidade do solo) que é considerada para os cálculos de troca de calor, Figura G.10. A delimitação da extensão dos domínios é essencial para a definição do volume de solo considerado nos cálculos das suas trocas de calor e para a determinação das propriedades do solo (composição e cobertura) e da sua temperatura para esses domínios, pois estas variam com o tempo, localização, tipo de cobertura e composição.

Figura G.10 - Definição dos domínios vertical e horizontal do modelo virtual



Fonte: Autor

