XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E INCERTEZAS DOS PARÂMETROS RELACIONADOS À MODELAGEM DO CONTATO DO PISO COM O SOLO NO PROGRAMA ENERGYPLUS

Letícia G. Eli (1); Amanda F. Krelling (2); Rayner M. S. Machado (3); Leonardo Mazzaferro (4); Lorrany S. Mendes (5); Ana Paula Melo (6); Roberto Lamberts (7)

(1) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, leticia.eli@posgrad.ufsc.br
(2) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, krellingamanda@gmail.com
(3) Msc, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, rayner.mauricio@posgrad.ufsc.br
(4) Msc, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Eng. Civil, leonardo.mazzaferro@gmail.com
(5) Bolsista de Iniciação Científica, lorrany.s.m@hotmail.com
(6) Drª., Professora do Departamento de Eng. Civil, a.p.melo@ufsc.br
(7) PhD, Professor do Departamento de Eng. Civil, roberto.lamberts@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Eng. Civil, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Cx. Postal 476, Florianópolis-SC, 88040-900, Tel: (48) 3721 5184.

RESUMO

Devido à importância da modelagem do contato do piso dos ambientes com o solo, sobretudo em edificações térreas, este artigo buscou analisar a sensibilidade e incertezas dos parâmetros relacionados ao objeto *Site:GroundDomain:Slab*, presente no programa EnergyPlus, para edificações localizadas na cidade de São Paulo. Esse método de modelagem do contato do piso com o solo abrange parâmetros de entrada relacionados, principalmente, ao tipo de solo e à geometria da edificação, sendo que, devido à grande variabilidade dos valores a serem inseridos, se faz necessária uma análise mais aprofundada do impacto de cada variável no resultado da simulação. Dessa forma, por meio da análise de sensibilidade, este trabalho demonstrou que, dentre os parâmetros de entrada do objeto *Ground Domain* estudados neste trabalho, a evapotranspiração da cobertura do solo, a condutividade térmica do solo e a profundidade do solo apresentaram maior impacto na variável de saída relacionada ao fluxo de calor que ocorre entre o piso e o solo. Para a análise de incertezas, foi utilizada uma edificação comercial térrea, com área de piso exposto ao solo de 2.500 m². Nesta análise, as variações nos parâmetros mais sensíveis do objeto resultaram em diferenças na carga térmica de refrigeração de 0,1 até 8,9 kWh/m².ano, com relação ao obtido quando adotado os valores padrão do EnergyPlus.
Palavras-chave: modelagem do solo, programa EnergyPlus, simulação computacional.

ABSTRACT

Due to the importance of modeling building floors in contact with the ground, especially in ground-coupled buildings, this paper aimed to analyze the sensitivity and uncertainties of input parameters related to the object Site:GroundDomain:Slab, part of the EnergyPlus software, for buildings located in the city of Sao Paulo. This approach for modeling ground-to-floor contact comprises input parameters related mainly to the type of soil and the building geometry. Considering the great variability of values to be inserted, a more in-depth analysis is required in order to evaluate the impact of each input to the simulation output. Therefore, through the sensitivity analysis this work demonstrated that, among the input parameters of the Ground Domain object studied in this paper, evapotranspiration ground cover, soil thermal conductivity and ground domain depth had a greater impact on the output related to the heat flow that occurs between the floor and the ground. For the uncertainties analysis it was adopted a commercial building with 2,500 m² of floor area exposed to the ground. Variations in the most sensitive parameters resulted in differences in cooling load of 0.1 to 8.9 kWh/m².year in relation to that obtained when adopting the EnergyPlus default values.
Keywords: ground modelling, EnergyPlus software, computational simulation.

1. INTRODUÇÃO

Simulações computacionais representam uma importante ferramenta na análise termoenergética de edificações, onde um conjunto de equações matemáticas e códigos de programação encarregam-se de representar, da melhor maneira possível, a complexidade do mundo real. Enquanto muitos elementos da envoltória já são descritos de forma satisfatória no modelo computacional, Krarti, Chuangchid e Ihm (2001) observam que as trocas térmicas entre o edifício e o solo ainda são tratadas de forma simplificada e com pouco entendimento da influência desse contato sobre o desempenho de uma edificação. Quando analisados edifícios com alta proporção de área de piso em relação ao volume, tal influência deve ser ponderada com cautela, visto que o fluxo de calor no contato do solo com a superfície edificada passa a representar uma significativa parcela dentro do balanço térmico dos ambientes (DAVIES, 2001, NEYMARK et al., 2009).

Diversos modelos foram desenvolvidos buscando representar a transferência de calor em estruturas acopladas ao solo, cada um deles com suas próprias vantagens e limitações. Zoras (2009) revisou algumas dessas soluções, as quais foram divididas entre analíticas e semianalíticas, numéricas e manuais. O autor observou que os modelos diferem na forma com que os resultados são obtidos, a rapidez e o custo computacional. Chen (2014) observa, no entanto, que mesmo após décadas de esforços em pesquisa e avanços nas tecnologias de computação, o contato da edificação com o solo ainda é considerado um dos aspectos mais complexos a ser detalhado na análise térmica de edifícios.

Entre as ferramentas de simulação computacional, que incluem a modelagem do solo e são voltadas ao cálculo do desempenho térmico e energético de edificações, está o programa EnergyPlus. Dentro da sua interface, é possível escolher diferentes formas de modelagem do contato do piso da edificação com o solo. A forma mais simplificada é o *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, cujos valores de entrada são as temperaturas médias mensais na superfície externa do piso em contato com o solo, usualmente retiradas do arquivo climático do local estudado. A segunda forma é o *Site:GroundDomain:Slab*, onde existem três métodos distintos de cálculo: *Finite Difference* (XING, 2014); *Kusuda Achenbach* (KUSUDA; ACHENBACH, 1965); e *Xing* (ALLEN et al., 1998, HERB et al., 2008, LEE, 2013, XING, 2014). Nos três métodos de cálculo, os parâmetros de entrada utilizados no *Site:GroundDomain:Slab* são relacionados à geometria da edificação e ao solo. Porém, quando utilizado o cálculo por Kusuda Achenbach ou Xing, devem ser inseridos também valores relacionados ao clima. Por fim, a última forma de modelagem do contato do piso com o solo no programa EnergyPlus é o pré-processador *Slab*. Nessa modelagem, são inseridos parâmetros de entrada relacionados ao solo, com certas considerações a respeito da geometria da edificação, semelhantes ao objeto *Site:GroundDomain:Slab*. Entretanto, é necessária uma simulação prévia, para obtenção de temperaturas do ar internas à zona em contato com o solo que têm inserção no próprio pré-processador. O Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), publicou manuais referentes à modelagem por meio do objeto *Site:GroundDomain:Slab* e do pré-processador *Slab*, que servem como ponto de partida para a compreensão da forma como esses objetos devem ser inseridos no programa EnergyPlus (MAZZAFERRO et al., 2013; MAZZAFERRO; MELO; LAMBERTS, 2015). É importante ressaltar que o EnergyPlus considera valores padrão (default) para todas as formas de modelagem do contato do piso com o solo, porém, esses valores podem não representar fielmente a realidade das características das edificações, do solo e dos climas brasileiros.

Para o Brasil, diferentes estudos analisaram a modelagem do contato do solo com a envoltória de edificações no programa EnergyPlus. Silva, Almeida e Ghisi (2016), analisaram a sensibilidade e as incertezas relacionadas à simulação computacional de uma residência unifamiliar térrea, localizada na cidade de Florianópolis (SC), utilizando o método de Efeitos Elementares, para a sensibilidade, e do Hipercubo Latino, para a análise de incertezas. Os autores verificaram que, dentre os diversos parâmetros de entrada inseridos na simulação, a temperatura do solo foi um dos que obtiveram maior impacto sobre o desconforto por frio ou calor. Costa, Roriz e Chvatal (2017) analisaram a modelagem do solo no EnergyPlus de maneira mais detalhada, por meio dos objetos *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, *Site:GroundDomain:Slab* (métodos *Finite Difference* e *Kusuda Achenbach*) e do pré-processador *Slab*. A cidade considerada nas simulações foi São Carlos (SP). Segundo os autores, o objeto *Site:GroundTemperature:BuildingSurface*, que apresenta a forma de modelagem mais simplificada, reduziu as horas de desconforto por calor, em comparação com os demais métodos. Quando analisados os parâmetros referentes ao solo para a modelagem pelo objeto *Site:GroundDomain:Slab*, a condutividade térmica foi o parâmetro de entrada de maior impacto. Além da modelagem do contato do piso da edificação com o solo no EnergyPlus, outros estudos semelhantes abordaram o contato de paredes com o solo, com a modelagem utilizando os objetos relacionados ao subsolo (*Basement*) (SOUZA; AMPARO; GOMES, 2011; RESENDE; SOUZA; GOMES, 2018). Cabe ressaltar que, embora os autores tenham estudado diferentes formas de modelagem do contato da edificação com o solo e

seus parâmetros de entrada, não foram realizadas variações que pudessem indicar a sensibilidade dos parâmetros nos modelos, como também as incertezas relacionadas a esses dados.

A modelagem do contato do piso com o solo dentro do programa EnergyPlus, com exceção da forma mais simplificada (*Site:GroundTemperature:BuildingSurface*), considera parâmetros como a condutividade térmica, calor específico e teor de umidade do solo, que variam conforme região e condições climáticas. Dessa maneira, definir um valor específico para esses dados de entrada é muitas vezes inviável, sobretudo na fase de projeto. Além disso, a forma de inserção de dados referentes ao solo no EnergyPlus, que permite a adoção de valores dentro de amplos limites, como também a inexistência de um controle entre os diferentes parâmetros de solo, faz com que seja possível a criação de solos irreais. Nesse sentido, diante da alta variabilidade do solo e a escassez de informações que englobem as variáveis solicitadas pelo programa EnergyPlus, é importante a verificação dos parâmetros de maior influência na modelagem do solo e seu impacto no resultado da simulação de desempenho termoenergético. A partir dessa informação, o simulador pode adotar maior rigor sobre a inserção de valores de grande influência sobre a modelagem do contato com o solo.

Tendo em vista a problemática exposta, como também a importância da modelagem do contato do piso da edificação com o solo, este trabalho busca demonstrar a sensibilidade e as incertezas dos parâmetros de entrada relacionados à modelagem por meio do objeto *Site:GroundDomain:Slab*, presente no programa EnergyPlus, versão 9.0.1 (ENERGYPLUS, 2019). Este objeto foi mencionado ao longo do texto deste trabalho como *Ground Domain*.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar a sensibilidade e incertezas dos parâmetros de entrada relacionados à modelagem do contato do piso da edificação com o solo, por meio do objeto Ground Domain, presente no programa EnergyPlus.

3. MÉTODO

Neste trabalho foram analisados os parâmetros de entrada referentes à modelagem *on-grade* do piso em contato com o solo, por meio do objeto *Ground Domain*, presente no programa EnergyPlus, versão 9.0.1. Este objeto possibilita a escolha entre três métodos de cálculo da transferência de calor entre o solo e o edifício, *Finite Difference*, *Kusuda Achenbach* e *Xing*, os quais foram individualmente abordados neste estudo.

O trabalho foi dividido em duas etapas principais, a análise de sensibilidade e a análise de incertezas, ambas considerando o clima da cidade de São Paulo, Brasil, que representa um grande polo habitacional e comercial.

3.1. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade tem por objetivo demonstrar o impacto de cada parâmetro de entrada no resultado da simulação. Neste trabalho, a análise de sensibilidade foi desenvolvida por meio do método de Efeitos Elementares, mais conhecido como método de Morris, cujo princípio baseia-se na adoção de planos experimentais compostos por parâmetros de entrada individualmente randomizados (*one-factor-at-a-time*) (MORRIS, 1991). A análise dos dados se dá a partir da observação dos efeitos elementares decorrentes da alteração da variável de saída em função de cada variável de entrada.

Como variável de saída, ou variável dependente, foi adotado o fluxo de calor que ocorre na condição de contorno do piso com o solo, sendo considerado por área de piso [W/m²]. Nos relatórios de saída dessa variável são gerados valores positivos e negativos, que indicam o sentido do fluxo de calor. O valor positivo indica a perda de calor pelo piso do edifício para o solo, enquanto o negativo indica o sentido inverso. Assim, dado o sentido variável ao longo do ano, optou-se por ser considerada a soma anual absoluta dos fluxos de calor na face externa do piso, uma vez que essa medida permite definir a intensidade do impacto promovido pelas variações paramétricas resultantes do método de Morris.

Como variáveis independentes, foram considerados os parâmetros de entrada relacionados ao modo *on-grade* do objeto *Ground Domain* do EnergyPlus, totalizando onze variáveis, conforme apresentado na Tabela 1. Além disso, nesta tabela são exibidos os intervalos analisados para cada variável, juntamente com o valor padrão indicado pelo programa e os limites inferiores e superiores, que deram origem a amostra utilizada na análise de sensibilidade.

A determinação do intervalo analisado, para a criação dos casos a serem simulados, buscou considerar valores que satisfatoriamente abrangessem a variabilidade possível para cada um dos parâmetros dentro do EnergyPlus, sem que houvesse um aumento do custo de processamento computacional que pudesse inviabilizar o estudo. Buscou-se também determinar um intervalo que englobasse o valor padrão do programa. Dessa forma, na definição da amostra para a análise de sensibilidade, algumas combinações de parâmetros resultaram em solos irreais. Pois, neste artigo o foco não é o estudo de tipos específicos de solos, mas sim o impacto da adoção de determinados valores para os parâmetros envolvendo o tipo de modelagem de solo aqui estudada. Além disso, o simulador pode não ter as informações do tipo de solo em que a edificação está sendo executada, assumindo valores aleatórios. Logo, o estudo da sensibilidade desses dados de entrada deve levar em consideração essas combinações irreais de solo.

- A definição e detalhamento de cada parâmetro de entrada do objeto *Ground Domain* podem ser consultados no documento *Input Output Reference* do programa EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2018). Dentre esses parâmetros, podem-se citar:
- A razão dimensional, chamada de *Aspect Ratio* no EnergyPlus, tem relação com a geometria do piso em contato com o solo;
- A evapotranspiração referente ao tipo de cobertura existente sobre o solo, variando de cobertura vegetal, com valor de 1,5, e impermeável, igual a 0,0. Cabe ressaltar que essa cobertura se refere ao solo que não está sob a edificação, mas sim ao seu redor;
- O *offset* do perímetro, que corresponde à extensão horizontal, a partir do perímetro da edificação, que será considerada a parcela de solo;
- A profundidade, que diz respeito à extensão vertical da parcela do solo a partir da superfície do piso. A combinação deste parâmetro com o offset do perímetro permite descrever para o modelo o volume de solo a ser considerado na condição de contorno do contato entre o solo e a edificação;
- O coeficiente da malha geométrica e densidade de malha, que correspondem à geometria e densidade das células na condição de contorno entre o solo e o edifício.

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do objeto *Ground Domain*.

Parâmetro de Entrada	**Padrão do EnergyPlus**	**Limites do EnergyPlus**	**Intervalo Analisado**
Razão dimensional	1,0	Sem limite	1,0 a 4,0
Condutividade térmica do solo [W/m.K]	1,5	0,0 < X, sem máximo	0,5 a 4,0
Densidade do solo [kg/m³]	2.800,0	0,0 < X, sem máximo	200,0 a 3.000,0
Calor específico do solo [J/kg.K]	850,0	0,0 < X, sem máximo	800,0 a 2.100,0
Teor de umidade do solo por fração de volume [%]	30,0	$0,0 \leq X \leq 100,0$	5,0 a 95,0
Teor de umidade do solo por fração de volume saturado [%]	50,0	$0,0 \leq X \leq 100,0$	5,0 a 95,0
Evapotranspiração da cobertura do solo	0,4	$0,0 \leq X \leq 1,5$	0,0 a 1,5
Offset do perímetro [m]	5,0	0,0 < X, sem máximo	1,0 a 20,0
Profundidade [m]	10,0	0,0 < X, sem máximo	2,0 a 25,0
Coeficiente da malha geométrica	1,6	$1,0 \leq X \leq 2,0$	1,0 a 2,0
Densidade da malha	6,0	$4,0 \leq X$, sem máximo	4,0 a 10,0

A partir da seleção das onze variáveis independentes, cujo número de parâmetros é tratado como k, foram adotados quatro níveis de variação (p) para cada uma, dentro dos limites da análise. Os efeitos elementares foram computados considerando um número de trajetórias (r), adotado como igual a 200. A partir dessas diretrizes, foi calculado o tamanho da amostra (n) por meio da Equação 1, com valor resultante igual a 2.400 casos a serem simulados.

$$n = r.(k + 1) \qquad \text{Equação 1}$$

Alguns dos indicadores de sensibilidade propostos por Morris (1991) são a média dos efeitos elementares (μ), obtida por meio da Equação 2, e o seu desvio padrão (σ), calculado por meio da Equação 3. Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007) propuseram uma medida complementar as de Morris (1991), equivalente à média dos valores absolutos dos efeitos elementares (μ^*) e calculada por meio da Equação 4.

O indicador de sensibilidade analisado neste trabalho corresponde ao μ* (Equação 4), média dos valores absolutos dos efeitos elementares, uma vez que esse indicador representa os parâmetros que são relevantes ou negligenciáveis dentro do modelo. O desvio padrão, também representado na análise, tem relação com a linearidade e a interação entre as variáveis de entrada, segundo Campolongo, Cariboni e Saltelli (2007).

$$\mu = \sum_{i=1}^{r} \frac{d_i}{r} \quad \text{Equação 2}$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^{r} \frac{(d_i - \mu)^2}{r}} \quad \text{Equação 3}$$

$$\mu^* = \sum_{i=1}^{r} \frac{|d_i|}{r} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:
d_i é o efeito elementar da iésima variável;
μ é a média dos efeitos elementares;
μ* é a média absoluta dos efeitos elementares;
r é o número de trajetórias.

Para a execução das simulações referentes à análise de sensibilidade, foi adotada uma célula teste que buscou tornar o solo o principal meio de troca de calor entre a zona interna e o ambiente externo. Dessa maneira, modelou-se uma zona térmica simplificada, onde não foram inseridas cargas internas ou aberturas na envoltória. As paredes e cobertura foram consideradas adiabáticas, mantendo o piso como única superfície com exposição para o ambiente externo, ou seja, em contato com o solo. Além disso, foi considerada uma infiltração constante, no valor de 0,3 trocas de ar por hora. Este valor de infiltração foi adotado como forma de simular uma entrada de ar por frestas e promover a eliminação de calor em situações de sobreaquecimento. O arquivo climático utilizado na análise de sensibilidade corresponde ao INMET de São Paulo (CRAWLEY; LAWRIE, 2019).

3.2. Análise de incertezas

Como forma de verificar as variações no resultado da simulação ao serem adotados diferentes valores para os parâmetros de entrada, foi realizada a análise de incertezas em um modelo de edificação real. Dentre as variáveis estudadas na análise de sensibilidade, foram selecionados os três parâmetros que apresentaram maior influência na modelagem do solo e foram analisadas as suas respectivas incertezas. O modelo de edificação escolhido para a análise de incertezas possui uso destinado à varejo/mercado, conforme a edificação de referência apresentada na Tabela A.6 da proposta de Instrução Normativa do Inmetro para Etiquetagem de Edificações Comerciais, INI-C, cujas características são expostas na Tabela 2 (CB3E, 2017). A adoção de uma edificação voltada ao varejo, com área de piso em contato com o solo de 2.500 m² e pé-direito de 2,5 m foi para potencializar a interação entre o solo e a edificação.

Os valores adotados para cada parâmetro, na análise de incertezas, correspondem aos limites máximos e mínimos dos intervalos considerados na análise de sensibilidade, conforme Tabela 1, juntamente com o valor médio de cada intervalo e o valor de entrada padrão do EnergyPlus.

As simulações foram executadas para cada um dos métodos de cálculo do *Ground Domain* (*Finite Difference*, *Kusuda Achenbach* e *Xing*). Primeiramente foi considerado um caso com os valores de entrada padrão do programa EnergyPlus e, a partir deste caso, variado, um por vez, os três parâmetros mais sensíveis encontrados na análise de sensibilidade, conforme o limite máximo, mínimo e o valor médio dos limites adotados na análise de sensibilidade Tabela 1.

Para a análise de incertezas, o indicador utilizado foi a carga térmica anual de refrigeração, cuja modelagem foi realizada por meio do uso do grupo de objetos chamado de *Ideal Loads Air System*. O cálculo da carga térmica foi adotado para todo o período de ocupação, considerando a temperatura de ativação da refrigeração igual a 24 ºC, conforme proposta de INI-C (CB3E, 2017). a qual solicita o cálculo da carga térmica voltado somente para refrigeração em edificações de varejo/mercado, esse foi o indicador utilizado na análise de incertezas. Esse indicador corresponde a quantidade de calor a ser extraída do ambiente para

manter a temperatura do ar a um valor estipulado, no caso 24ºC. Além disso, no Brasil as edificações comerciais, em especial as voltadas ao varejo, necessitam de sistema de climatização voltado à refrigeração, visto que o clima e as altas cargas internas não deixam que o ambiente necessite de aquecimento.

Tabela 2 – Características da edificação adotada na análise de incertezas.

Parâmetro de Entrada	**Valor**
Dimensões [m]	50,0 x 50,0, com 2,5 m de pé-direito
PAF – Percentual de abertura na fachada [%]	Fachada principal (orientação Norte): 60% Demais fachadas: 10%
Transmitância térmica da parede [W/m².K]	2,4
Capacidade térmica da parede [kJ/m².K]	150,0
Absortância térmica da parede	0,5
Transmitância térmica da cobertura [W/m².K]	2,1
Capacidade térmica da cobertura [kJ/m².K]	233,0
Absortância térmica da cobertura	0,8
Fator solar do vidro	0,8
Transmitância térmica do vidro [W/m².K]	5,7
Densidade de potência de iluminação [W/m²]	16,3
Densidade de ocupação [m²/pessoa]	5,0
Densidade de potência de equipamentos	40,0
Horas de ocupação	12,0
Dias de ocupação no ano	350

4. RESULTADOS

4.1. Resultados da análise de sensibilidade

Na Figura 1 são expostos os resultados obtidos para os três métodos de cálculo disponíveis no objeto *Ground Domain*: *Finite Difference*, *Kusuda Achenbach* e *Xing*. Nesta figura, a numeração dos parâmetros segue a sequência de maior a menor sensibilidade, tendo como referência as simulações que utilizaram o método *Finite Difference*.

Por meio da análise de sensibilidade foi possível verificar que a evapotranspiração da cobertura do solo representa o parâmetro mais influente em todos os métodos de cálculo analisados. Quando considerado o *Finite Difference*, tal parâmetro exibe ainda maior destaque, seguido pela condutividade térmica do solo e a profundidade. No método *Kusuda Achenbach*, a condutividade térmica do solo e a profundidade também aparecem como segundo e terceiro parâmetros de entrada influentes no resultado da simulação, porém, no método *Xing*, a profundidade possui um impacto ligeiramente superior à condutividade térmica do solo.

O método *Finite Difference* é descrito a partir de variáveis unicamente relacionadas às características do solo, o que tende a explicar o desempenho mais acentuado da evapotranspiração da cobertura do solo e da condutividade térmica do solo. Nos métodos *Kusuda Achenbach* e *Xing* os parâmetros de entrada referentes ao clima do local simulado podem exercer maior influência do que as variáveis do solo dentro destes métodos. Essa característica é indicada pela menor sensibilidade da evapotranspiração da cobertura do solo, juntamente com a condutividade térmica do solo e a profundidade, nos métodos *Kusuda Achenbach* e *Xing* quando comparado com o *Finite Difference*. Com exceção dos parâmetros de entrada citados, evapotranspiração da cobertura do solo, condutividade térmica do solo e profundidade, os demais apresentaram pouco impacto no resultado da simulação.

Quanto à linearidade dos parâmetros de entrada e à interação entre estas variáveis, há um indicativo de que o aumento da média dos valores absolutos dos efeitos elementares (μ^*) também implica num aumento do desvio-padrão (σ), apresentando que o nível de importância da variável está associado à falta de linearidade com o resultado da simulação, ou mesmo efeitos de ordem superior. Analisando os resultados para os diferentes métodos, é possível verificar que o menor nível de importância das variáveis que

compõem o método *Finite Difference*, promove o aumento da sensibilidade da condutividade térmica do solo e da evapotranspiração, a qual apresentou uma sutil linearização da sua função. Além disso, o desvio-padrão indica que o desenvolvimento de modelos de regressão linear simples para representar o comportamento térmico do solo deve ser evitado.

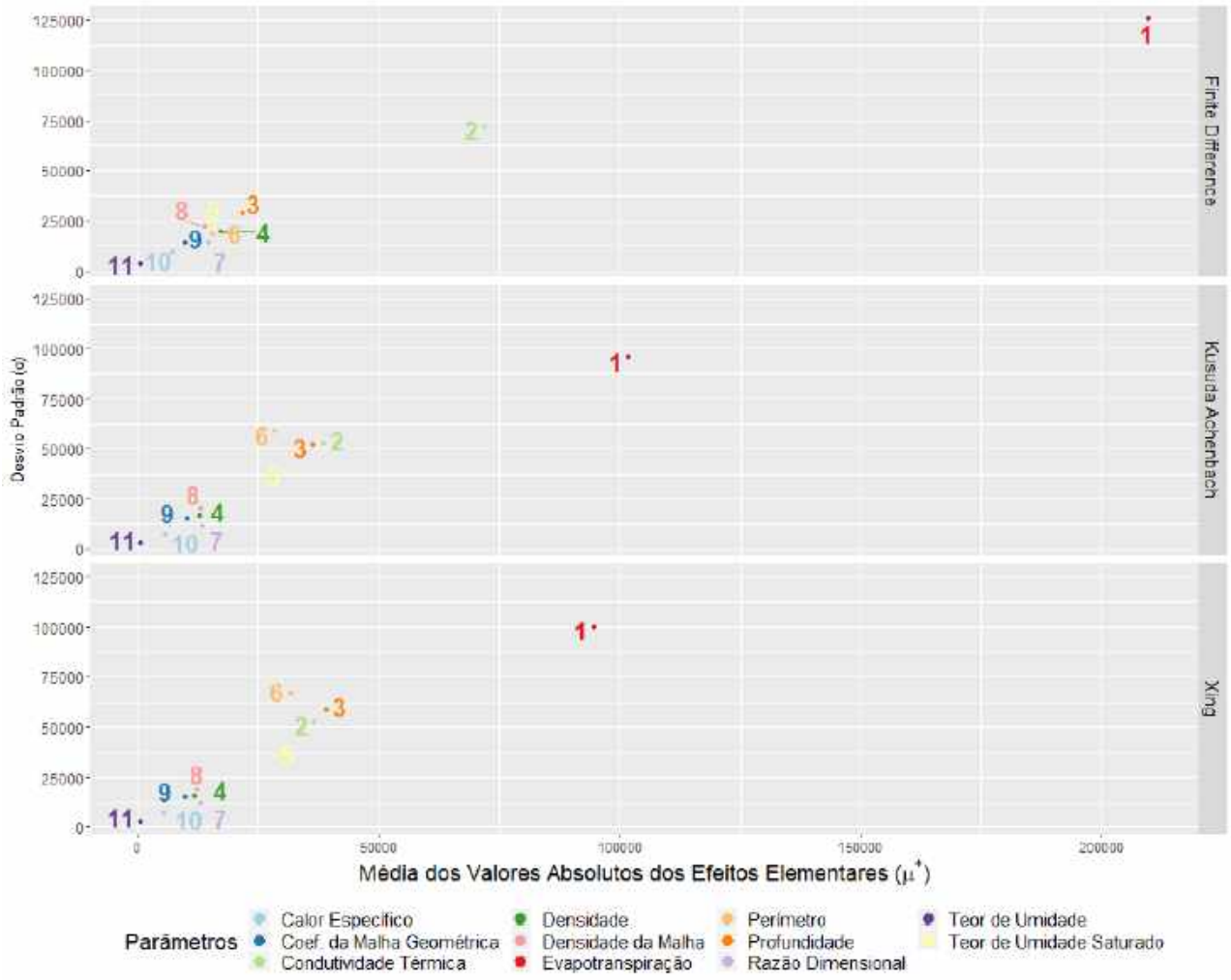

Figura 1 – Análise de sensibilidade do objeto *Ground Domain*.

4.2. Resultados da análise de incertezas

A análise de incertezas considerou os três parâmetros mais influentes, decorrentes da análise de sensibilidade. Os resultados obtidos para cada variação dos parâmetros foram comparados em relação ao padrão do programa EnergyPlus para o objeto *Ground Domain* e seus métodos de cálculo (*Finite Difference*, *Kusuda Achenbach* e *Xing*), conforme Tabela 3.

Na análise dos resultados, foi avaliada a diferença entre os valores obtidos na simulação considerando o padrão do EnergyPlus e a simulação com a variação do parâmetro de entrada. Dessa maneira, é possível verificar as incertezas, partindo do princípio de que, muitas vezes, pela falta do valor real do parâmetro de entrada, o padrão do programa EnergyPlus é adotado nas simulações.

Tabela 3 – Valores adotados para os parâmetros na análise de incertezas.

Parâmetro de Entrada	Padrão EnergyPlus	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
Condutividade térmica do solo [W/(m.K)]	1,5	0,5	1,75	4,0
Evapotranspiração da cobertura do solo	0,4	0,0	0,75	1,5
Profundidade (m)	10,0	2,0	11,5	25,0

O resultado da análise de incertezas, pode ser visualizado na Figura 2, sendo observado que os parâmetros mais influentes alteram a carga térmica de refrigeração entre 0,1 kWh/m².ano e 8,9 kWh/m².ano, quando comparado ao valor padrão do programa EnergyPlus. O método de cálculo *Finite Difference* é o mais sensível, sobretudo quando são utilizados um dos seguintes valores: a evapotranspiração da cobertura do solo no seu valor máximo (1,5); a profundidade do solo mínima (2,0 m); ou a condutividade térmica do solo máxima (4,0 W/m.K). Estas variações reduziram a carga térmica para refrigeração, emrelação ao padrão, em aproximadamente 8,9 kWh/m².ano, 6,7 kWh/m².ano e 5,5 kWh/m².ano, respectivamente.

Nos métodos de cálculo por *Kusuda Achenbach* e *Xing*, a profundidade mínima e a condutividade térmica do solo alteraram mais significativamente a carga térmica para refrigeração do que a evapotranspiração da cobertura do solo. Por *Kusuda Achenbach*, a utilização da profundidade do solo mínima, de 2,0 m, provocou a redução de 5,2 kWh/m².ano da carga obtida com a profundidade padrão, de 10,0 m, enquanto no método de *Xing* essa redução foi de 4,7 kWh/m².ano. Quando utilizada a condutividade térmica máxima para o solo, de 4,0 W/m.K, a redução da carga térmica anual de refrigeração foi de 4,3 e 5,0 kWh/m².ano para *Xing* e *Kusuda Achenbach*, respectivamente.

Enquanto os valores máximos para a condutividade térmica do solo e para a evapotranspiração da cobertura do solo tendem a reduzir a carga térmica para refrigeração, os valores mínimos levam ao acréscimo da carga com relação ao padrão. Este comportamento pode ser visualizado, por exemplo, no método *Finite Difference*, onde a condutividade térmica mínima aumentou o valor da carga térmica em 3,5 kWh/m².ano em relação ao padrão, enquanto a evapotranspiração mínima, para o mesmo método, aumentou 3,0 kWh/m².ano.

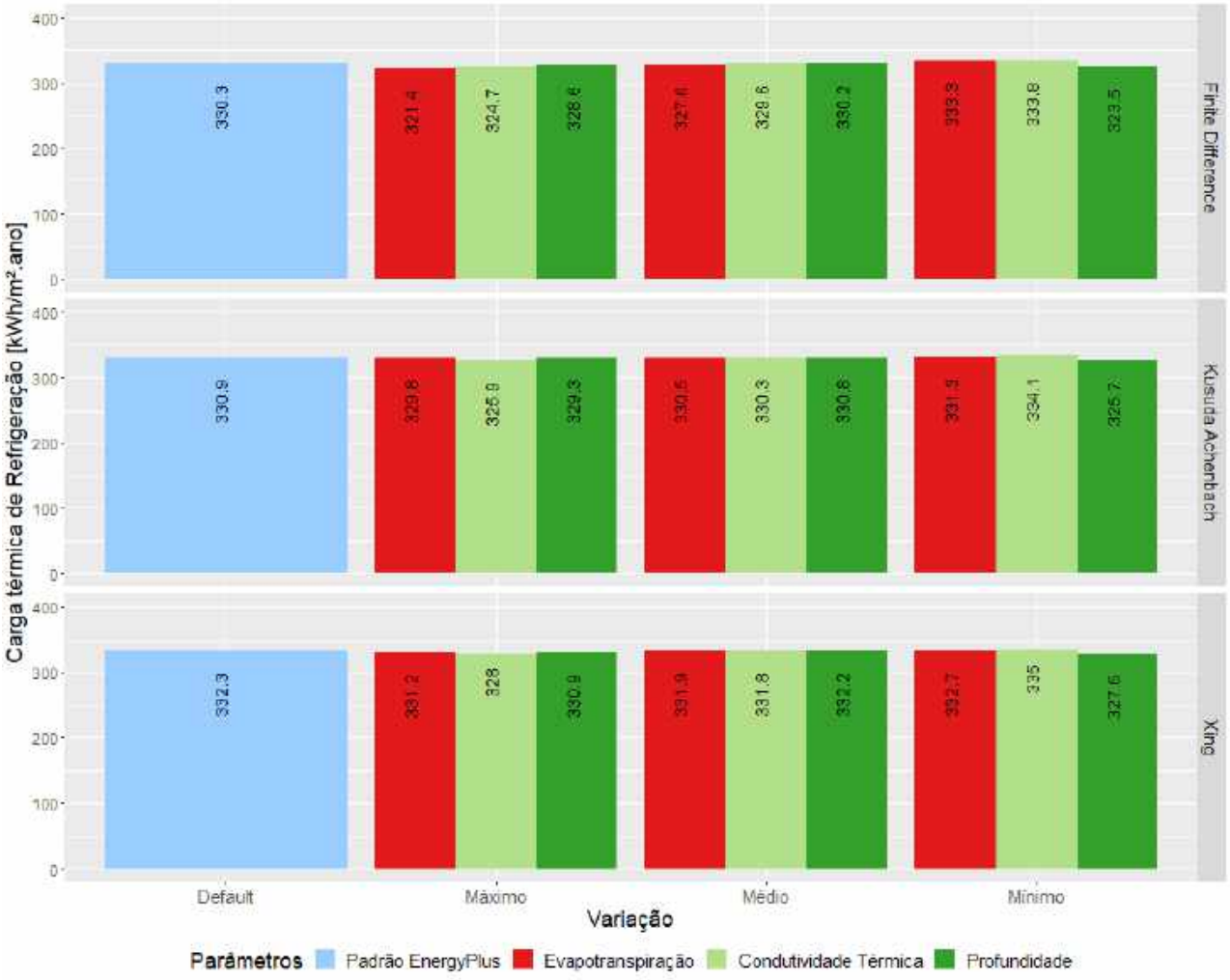

Figura 2 – Resultado da análise de incertezas.

Considerando os resultados apresentados neste trabalho, pode-se observar a necessidade de um estudo prévio dos parâmetros a serem inseridos na modelagem do solo, sobretudo os relacionados ao objeto *Ground Domain*, estudado neste trabalho. A diferença de carga térmica de refrigeração encontrada para uma única variação, quando comparado com a adoção dos valores padrão do programa EnergyPlus, é significativa,

especialmente quando considerada a área da edificação estudada. Cabe ressaltar também que se a edificação considerada na análise de incertezas tivesse menor densidade de carga interna (iluminação, equipamentos e pessoas), a variação da carga térmica para refrigeração, devido à alteração de um único parâmetro de entrada da modelagem do solo, seria mais significativa, uma vez que não ocorreria a interferência das altas cargas internas.

5. CONCLUSÕES

O presente estudo buscou demonstrar a importância da análise dos parâmetros a serem inseridos na modelagem do contato do piso da edificação com o solo, por meio do objeto *Site:GroundDomain:Slab*, presente no programa EnergyPlus, e seus três métodos de cálculo: *Finite Difference, Kusuda Achenbach* e *Xing*. A cidade considerada no estudo foi São Paulo.

Com base nos resultados da análise de sensibilidade, foi possível verificar que, dentre onze parâmetros de entrada, relacionados ao solo e à geometria do piso da edificação, solicitados na modelagem pelo objeto *Ground Domain*, os três mais influentes são: a evapotranspiração da cobertura do solo, condutividade térmica do solo e a profundidade do solo. Os demais parâmetros estudados neste trabalho não apresentaram grande sensibilidade nos métodos de cálculo do *Ground Domain*. A partir desse resultado, foi realizada a análise de incertezas, simulando uma edificação térrea, com área de piso de 2.500 m² e características de varejo/mercado. As variações nos valores de entrada da evapotranspiração da cobertura do solo, condutividade térmica do solo e profundidade do solo, resultaram em diferenças, com relação ao padrão do programa EnergyPlus, entre 0,1 kWh/m².ano e 8,9 kWh/m².ano na carga térmica para refrigeração, reduzindo ou aumentando entre 0,12% a 1,50% o valor final da simulação.

Por fim, pode-se concluir que a definição dos parâmetros de entrada na modelagem do contato da edificação com o solo deve ser realizada de forma criteriosa, especialmente para as variáveis de entrada mais sensíveis identificadas neste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G., L.S. PEREIRA, D. RAES, M. SMITH. **Crop Evapotranspiration:** guidelines for computing crop water requirements. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998.

CAMPOLONGO, F.; SALTELLI, A. Sensitivity analysis of an environmental model: an application of different analysis methods. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 57, p. 49-69, 1997.

CB3E (Florianópolis). **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas**. 2017. Disponível em: <http://cb3e.ufsc.br/etiquetagem/desenvolvimento/atividades-2012-2016/trabalho-1/pesquisas>. Acesso em: 10 mar. 2019.

CHEN, D. Unified solutions for steady-state ground-coupled heat transfer. **Energy and Buildings**, v. 68, p. 444-459, 2014.

CRAWLEY, D.; LAWRIE, L. ***Region 3 - South America (Climate One-Building)***. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html>. Acesso em: 10 mar. 2019.

COSTA, V. A. C.; RORIZ, V. F.; CHVATAL, K. M. S. Modeling of slab-on-grade heat transfer in EnergyPlus simulation program. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.17, n.3, p. 117-135, jul/set. 2017.

DAVIES, M.; ZORAS, S.; ADJALI, M.H. Improving the effIciency of the numerical modelling of built environment earth-contact heat transfers. **Applied Energy**, v. 68, p. 31-42, 2001.

ENERGYPLUS. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em: 10 mar. 2019.

ENERGYPLUS. *Documentation:* ***Input Output Reference*** *(version 9.0.1).* [s.i.]: Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), 2018.

HERB, W.R.; JANKE, B.; MOHSENI, O.; STEFAN, H.G. Ground Surface Temperature Simulation for Different Land Covers. **Journal of Hydrology**, v. 356: p. 327-343, 2008.

KRARTI, M.; CHUANGCHID, P.; IHM, P. Foundation heat transfer module for EnergyPlus program. In: Building Simulation, 2001, Rio de Janeiro. **Proceedings…** Rio de Janeiro: IBPSA, 2001. p. 931-938.

KUSUDA, T.; P.R. ACHENBACH. Earth temperatures and thermal diffusivity at selected stations in the United States. **ASHRAE Transactions**, v. 71, p. 61-74, 1965.

LEE, E.S. **An improved hydronic loop system solution algorithm with a zone-coupled horizontal ground heat exchanger model for whole building energy simulation**. 2013. Tese (Doutorado), Oklahoma State University, Stillwater, 2013.

MAZZAFERRO, Leonardo; MELO, Ana Paula; LAMBERTS, Roberto. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Objeto *Ground Domain* no Programa EnergyPlus.** Florianópolis: Labeee, 2015. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Manual_Ground_Domain.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

MAZZAFERRO, Leonardo et al. **Manual de Simulação Computacional de Edifícios com o Uso do Pré-Processador *Slab* no Programa EnergyPlus.** Florianópolis: Labeee, 2013. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Manual_Slab.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2019.

MORRIS, M.D. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments. **Technometrics**, v. 33, n. 2, p. 161-174, 1991.

NEYMARK, J.; JUDKOFF, R.; BEAUSOLEIL-MORRISON, I; BEN-NAKHI, A.; CROWLEY, M.; DERU, M.; HENNINGER, R.; RIBBERINK, H.; THORNTON, J.; WIJSMAN, A.; WITTE, M. IEA bestest in-depth diagnostic cases for ground coupled heat transfer related to slab-on-grade construction. In: Building Simulation, 2009, Glasgow. **Proceedings…** Glasgow: IBPSA, 2009, p. 1099-1106.