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 MÉTODOS DE CÁLCULO PARA DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA DO SOLO EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Gustavo Henrique Nunes (1); Guilherme Vilela Sanches (2); Rafaela Benan Zara (3); Thalita Gorban Ferreira Giglio (4)

(1) Especialista em Construção Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, nunes.gustavo@outlook.com
(2) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, guilhermevilelas@live.com,
(3) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, rafaelabzara@gmail.com,
(4) Doutora em Engenharia Civil, Professora do Departamento de Construção Civil, thalita@uel.br
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil, Cx Postal 6001, Londrina–PR, CEP 86051-990, Tel.: (43) 3371-4649

RESUMO

O contato do piso de edificações térreas com o solo promove trocas de calor relevantes para o desempenho do ambiente construído. Logo, a temperatura do solo é um fator importante em simulações computacionais e deve ser calculada sempre que o piso do ambiente estiver em contato com o solo. No entanto, em alguns casos, a definição desta variável é relegada no processo de análises de desempenho termoenergético. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo analisar metodologias de definição da temperatura do solo para simulações de desempenho termoenergético de edificações sob diferentes condições de envoltória e de clima. O método de pesquisa consistiu em simulações para o cálculo da temperatura do solo de uma habitação térrea através do pré-processador *Slab* e através do objeto *Ground Domain* (modelos *FiniteDifference* e *KusudaAchenbach*), ambos vinculados ao *EnergyPlus*. Foi considerado três sistemas construtivos (blocos cerâmicos, concreto maciço e *wood frame*) e três climas brasileiros (Curitiba, São Paulo e Belém). Adicionalmente, analisou-se o desempenho de um dos dormitórios da edificação objeto de estudo para cada método de cálculo da temperatura do solo. Os resultados mostraram algumas diferenças entre a temperatura do solo gerada pelo pré-processador *Slab* e pelo objeto *Ground Domain*. Observou-se que, diante de temperaturas do ar mais baixas, ocorre uma relativa similaridade nos resultados, todavia, diante de temperaturas do ar mais elevadas, a diferença entre as duas ferramentas é significativa. Comparando o *Slab* e o *Ground Domain*, obteve-se diferenças na temperatura média mensal do solo de até 1,78 °C, 2,14 °C e 2,94 °C para Curitiba, São Paulo e Belém, respectivamente. Por outro lado, quando comparados somente os resultados pelos modelos de cálculo do *Ground Domain*, observou-se pouca diferença em todos os casos: variação média anual de até 0,14 °C, 0,10 °C e 0,25 °C para Curitiba, São Paulo e Belém. Além disso, não se observou grandes variações na temperatura do solo quando alternado somente os sistemas construtivos. Com relação à influência no desempenho da edificação, observou-se que ocorrem diferenças significativas da resposta do ambiente construído na maioria dos casos, conforme se altera o método de definição da temperatura do solo. Obteve-se diferenças de até 49,71%, 33,92% e 27,91% no indicador GHR para Curitiba, São Paulo e Belém, respectivamente. Isto posto, de modo geral, conclui-se a relevância da correta definição da temperatura da interface solo e piso em processos de simulações computacionais
Palavras-chave: Troca de calor, *EnergyPlus*, pré-processador *Slab*, objeto *Ground Domain*.

ABSTRACT

The floor contact of one-story buildings with the ground promotes heat exchanges that are relevant to the performance of the built environment. Therefore, ground temperature is an important factor in computational simulations and should be calculated whenever the floor of the environment is in contact with the ground. However, in some cases, setting this variable is relegated in the process of thermoenergetic performance

analysis. In this context, the present article aims to analyze methods of defition of ground temperature for simulations of thermoenergetic performance of buildings under different envelope and climate conditions. The research method consisted of simulations for the calculation of the ground temperature of a single-family detached house through the Slab preprocessor and through the Ground Domain object (FiniteDifference and KusudaAchenbach models), both linked to EnergyPlus. It was considerated three construction systems (ceramic bricks, concrete wall and wood frame) and three Brazilian climates (Curitiba, São Paulo and Belém). Additionally, the performance of one of the bedrooms of the building for each method of calculating ground temperature was analyzed. The results showed some differences between the ground temperature generated by the Slab preprocessor and the Ground Domain object. It was observed that, in comparison with lower air temperatures, there is a relative similarity in the results, however, in the face of higher air temperatures, the difference between the two tools is significant. Comparing Slab and Ground Domain, differences in the average monthly ground temperature of up to 1.78 °C, 2.14 °C and 2.94 °C were obtained for Curitiba, São Paulo and Belém respectively. On the other hand, when comparing only the results by the calculation models of the Ground Domain, there was minimum difference in all cases: mean annual variation of up to 0.14 °C, 0.10 °C and 0.25 °C for Curitiba, São Paulo and Belém. In addition, no major variations in soil temperature were observed when only the construction systems were switched. In relation to the influence on the performance of the building, it was observed that there are significant differences in the response of the built environment in most cases, as the method of defining the ground temperature changes. There were differences of up to 49.71%, 33.92% and 27.91% in the CDH indicator for Curitiba, São Paulo and Belém, respectively. Finally, in general, it was concluded the relevance of the correct definition of the ground temperature in computational simulations.
Keywords: Heat exchange, EnergyPlus, Slab preprocessor, Ground Domain object.

1. INTRODUÇÃO

A preocupação com o desempenho energético das edificações residenciais é fundamental para se ter um uso racional da energia elétrica no setor da construção civil. De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia, em 2017 o consumo residencial de eletricidade foi de 133.932 GWh (BRASIL, 2018). Além do mais, as previsões mostram que o consumo no setor deve aumentar significativamente nos próximos anos (BRASIL, 2016). Neste contexto, a construção civil nacional apresenta interesse em garantir desempenho termoenergético às edificações.

Dentre as diretrizes de avaliação termoenergética de habitações, têm-se a NBR 15575 (ABNT, 2013) e o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (BRASIL, 2012). Um dos métodos de avaliação propostos por estes documentos consiste em simulações computacionais, em que se avalia a resposta global da edificação modelada sob determinadas condições. No método de simulação, devem ser inseridas diversas variáveis independentes, que são os parâmetros termofísicos da edificação e as condições locais, dentre as quais se destaca a temperatura do solo, no caso de edificações térreas que possuem o piso em contato direto com o solo. Esta variável é complexa e representa as trocas dinâmicas de calor entre o piso dos ambientes e o solo (CHVTAL; MARQUES, 2016). Costa (2017) ressalta a importância dessas trocas de calor em edificações de pequeno porte e residências no Brasil, devido à inexistência de elementos de isolação térmica na composição do piso nestes tipos de construção, e à grande influência que exercem no balanço térmico do edifício.

A temperatura do solo para simulações computacionais pode ser obtida de distintas maneiras. Na ausência dos dados, pesquisas apontam o uso da temperatura do solo igual à temperatura do ar externo (SANTOS; MENDES, 2005; CHVTAL; MARQUES, 2016). Por outro lado, de acordo com o RTQ-R (BRASIL, 2012), a temperatura do solo deve ser calculada com a geometria da edificação, com as propriedades térmicas dos elementos construtivos, os padrões de uso e com o tipo de ventilação à qual a edificação está submetida. Costa e Chvatal (2017) desenvolveram um manual de uso do pré-processador *Slab*. Por sua vez, Mazzaferro et al. (2015) demonstraram como simular uma edificação em contato com o solo através do objeto *Ground Domain*, contido no programa de simulação *EnergyPlus*.

Estudos de desempenho energético de edificações de Pereira (2009), Sorgato (2009), Oliveira et al. (2012), Mazzaferro (2013), e Sorgato et al. (2014) indicam a importância da definição da temperatura do solo. Costa et al. (2017) apontam que, ao se utilizar diferentes métodos de cálculo para obter a temperatura do solo, pode-se chegar a uma diferença de 55,2% no número de horas de desconforto. No entanto, requer-se mais pesquisas que abordem diferentes condições e apontem técnicas eficazes na definição da temperatura do solo em edificações brasileiras (CHVTAL; MARQUES, 2016). Sendo assim, faz-se oportuna uma análise acerca dos métodos de cálculo desse parâmetro.

Nesse sentido, esta pesquisa contribui para tomadas de decisões e compreensão do processo de definição da temperatura do solo empregada em simulações de desempenho termoenergético de habitações no Brasil.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é analisar metodologias de definição da temperatura do solo (*Slab* e *Ground Domain*) para simulações de desempenho termoenergético de edificações sob diferentes condições de envoltória e de clima.

3. MÉTODO

Para atender ao objetivo, obteve-se as temperaturas médias mensais do solo de uma habitação unifamiliar, através do pré-processador *Slab* e através do objeto *Ground Domain*, ambos vinculados ao *EnergyPlus*, considerando três sistemas construtivos e três climas brasileiros. Posteriormente avaliou-se o desempenho da edificação conforme o método de definição da temperatura do solo. Nesta seção são apresentados o objeto de estudo, os climas considerados e os procedimentos para obtenção da temperatura do solo, bem como o desempenho da edificação estudada.

3.1. Objeto de estudo

A edificação objeto de estudo compreende uma residência unifamiliar isolada com tipologia baseada nos padrões do Programa Minha Casa Minha Vida, conforme mostrado na Figura 1. A moradia é composta por uma sala integrada com a cozinha, dois dormitórios e um banheiro, com uma área total de 40,75 m² e pé direito de 2,55 m.

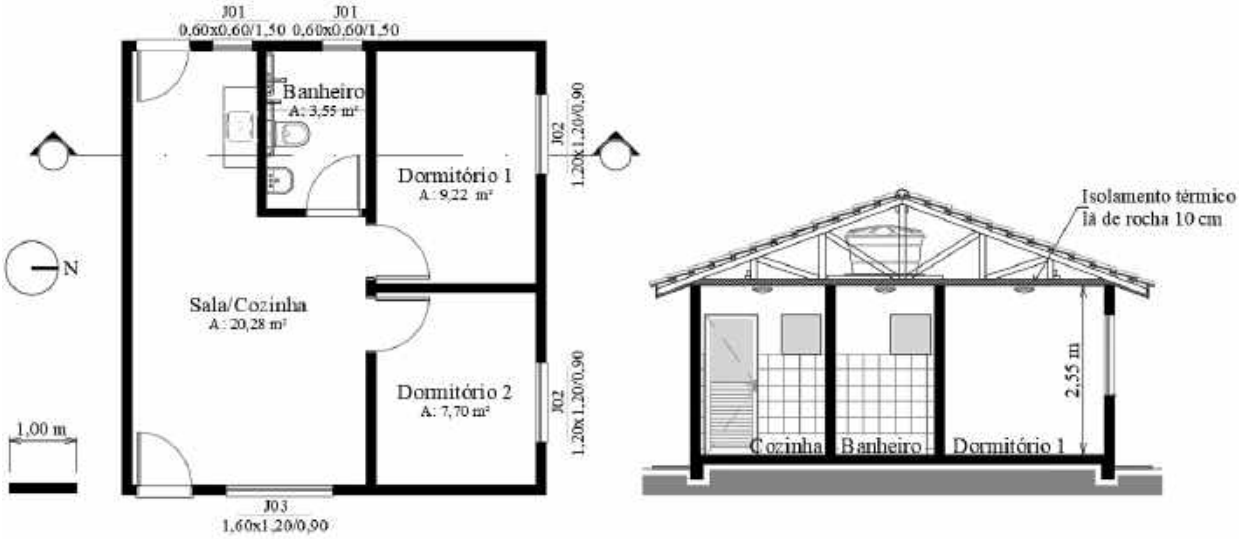


Figura 1 – Planta baixa e corte da edificação (todas as dimensões são dadas em metros)

Para a envoltória da edificação considerou-se três opções de sistemas construtivos de paredes: blocos cerâmicos 6 furos (9x14x24 cm); concreto maciço 10 cm; e *wood frame* – DATec 020-C (BRASIL, 2017). O piso consiste em um radier de 15 cm de espessura coberto com cerâmica. A cobertura é feita de uma estrutura de madeira (ático não ventilado) com uma superfície de telhas cerâmicas. O teto é uma estrutura suspensa de folhas de PVC com uma camada de lã de rocha de 10 cm. As janelas são compostas por caixilhos de alumínio com duas folhas deslizantes e vidro simples incolor de 3 mm de espessura, sem elementos de sombreamento. A absortância solar da cobertura é 0,75 e a absortância solar das paredes é 0,46.

Na Figura 2 ilustra-se a composição das vedações verticais, do piso e da cobertura considerados, bem como seus respectivos valores de transmitância e capacidade térmica conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). Na Tabela apresenta-se as propriedades termofísicas dos materiais utilizados nas composições das vedações verticais, da cobertura e do piso. Destaca-se que, para a aplicação no *EnergyPlus*, as camadas heterogêneas das paredes (blocos cerâmicos e *wood frame*) foram transformadas em homogêneas equivalentes em resistência, conforme Weber et al. (2017).

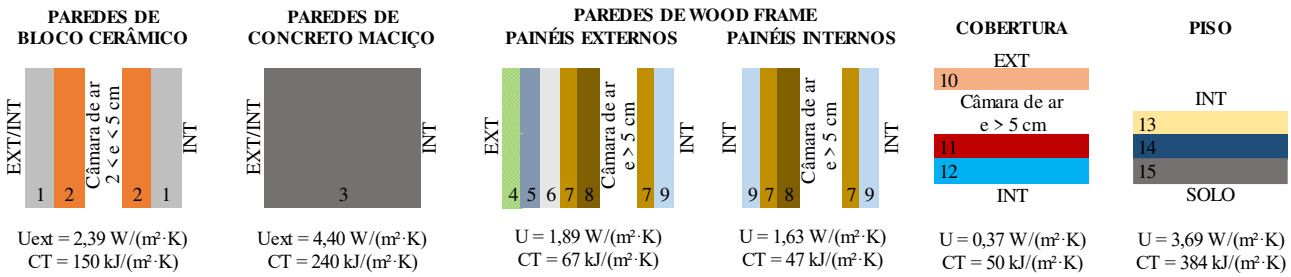


Figura 2 – Representação das paredes, da cobertura e do piso

Tabela 1 – Propriedades dos componentes das paredes, da cobertura e do piso

Material		Espessura [m]	Condutividade térmica [W/(m·K)]	Calor específico [kJ/(kg·K)]	Densidade [kg/m³]
1	Argamassa de reboco das paredes	0,025	1,15	1,00	2.000
2	Bloco cerâmico (equivalente)	0,0134	0,90	0,92	1.600
3	Concreto das paredes	0,10	1,75	1,00	2.400
4	Acabamento em textura acrílica	0,003	1,15	1,00	2.000
5	Argamassa polimérica *base coat*	0,005	1,15	1,00	1.840
6	Placa cimentícia	0,008	0,35	1,00	1.700
7	Placa OSB	0,0095	0,17	2,30	681
8	Madeira Pinus (equivalente)	0,0015	0,15	1,34	494
9	Gesso acartonado	0,0125	0,35	0,84	750
10	Telha cerâmica	0,02	1,05	0,92	2.000
11	Lã de rocha	0,10	0,045	0,70	10,53
12	Forro PVC	0,01	0,20	0,96	1.300
13	Piso cerâmico	0,01	0,90	0,92	1.600
14	Argamassa de assentamento do piso	0,005	1,15	1,00	2.000
15	Concreto do radier	0,15	1,75	1,00	2.400

3.2. Condições climáticas analisadas

Analisou-se o comportamento da temperatura do solo da edificação, conforme o sistema construtivo de paredes e as ferramentas *Slab* e *Ground Domain*, em três localidades com características distintas, segundo o zoneamento bioclimático brasileiro disposto na NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). As análises foram realizadas para as zonas bioclimáticas 1, 3 e 8, representadas por Curitiba (25° 31′ S, 49° 10′ O, 910 m), São Paulo (23° 37′ S, 46° 39′ O, 802 m) e Belém (1° 22′ S, 48° 28′ O, 16 m), respectivamente. A zona bioclimática 1 abrange 0,8% do território brasileiro e é caracterizada por apresentar baixas temperaturas durante o ano todo. A zona bioclimática 3 abrange 6,5% do território brasileiro e possui um clima ameno, com verões quentes e úmidos, e invernos pouco secos e frios. Já a zona bioclimática 8, abrange 53,7% do Brasil e tem um clima quente e úmido, com altas temperaturas e precipitações ao longo de todo o ano.

3.3. Obtenção da temperatura do solo pelo *Slab* e pelo *Ground Domain*

Para todos os sistemas construtivos (item 3.1) e climas considerados (item 3.2) nesta pesquisa, obteve-se a temperatura do solo da edificação pelo *Slab* e pelo *Ground Domain*. Para isto, utilizou-se a versão 8.9 do *EnergyPlus*. A edificação objeto de estudo foi modelada previamente no *SketchUp* auxiliado pelo *plug-in Euclid*.

Com relação ao processo de definição da temperatura do solo através do *Slab*, seguiu-se as instruções estabelecidas no manual do pré-processador (COSTA; CHVATAL, 2017). A utilização do *Slab* se dá por um processo iterativo, a partir das médias mensais das temperaturas externa e interna. O processo de extração e inserção de resultados é realizado várias vezes até que as temperaturas do solo se estabilizem. Ressalta-se que o pré-processador teve seu acionamento diretamente no arquivo de entrada de dados do *EnergyPlus* (acionamento internamente).

Por sua vez, a utilização do objeto *Ground Domain* seguiu o manual desenvolvido por Mazzaferro et al. (2015). O procedimento por meio do *Ground Domain* foi realizado através de dois modelos de cálculo disponíveis para o objeto: *FiniteDifference* e *KusudaAchenbach*. O modelo *FinitteDifference* utiliza diferenças finitas para a transferência de calor entre o piso e o solo, a partir das condições de contorno do arquivo climático. Uma vez alcançado um comportamento periódico constante no processo, tem-se as temperaturas do solo ao longo do ano. O modelo requer a condutividade térmica, a densidade, o calor específico, o teor de umidade natural e saturado e o parâmetro de evapotranspiração do solo. Já o modelo *KusudaAchenbach* utiliza a correlação desenvolvida por Kusuda e Achenbach (1965) para fornecer as temperaturas do solo não alteradas pela presença da edificação (*undisturbed ground temperature*). Neste caso, o objeto requer a condutividade térmica, a densidade e o calor específico do solo para definir uma correlação das temperaturas do solo em função da profundidade e do tempo. O outro modelo disponível para o objeto, *Xing*, utiliza a correlação desenvolvida por Xing (2014) para fornecer as temperaturas do solo não alteradas pela presença da edificação. Todavia, o objeto requer um conjunto de dados mais complexo, não aplicado neste estudo. Dentre as informações requeridas, além dos parâmetros termofísicos do solo, cita-se a média e a amplitude da temperatura superficial, bem como o período de mudança de fase da amplitude da temperatura de dois modelos paramétricos harmônicos do solo.

Na Tabela 2 apresenta-se os dados das simulações com os parâmetros das condições de entorno e do solo que foram considerados no desenvolvimento deste estudo.

Tabela 2 – Informações consideradas no processo de cálculo da temperatura do solo

Parâmetros de entrada	Dados considerados
Arquivo climático	EPW com os dados TRY de cada cidade
Condição de ventilação	Edificação ventilada de acordo com a temperatura de *setpoint* (20 °C)
Definições e configurações de uso, ocupação e cargas internas	Conforme RTQ-R (BRASIL, 2012)
Superfície do entorno da edificação	Gramado baixo – 2 cm
Coeficiente de transferência de calor por convecção e por radiação	Fluxo vertical descendente de 6,13 W/(m²·K) e fluxo vertical ascendente de 9,26 W/(m²·K)
Dados do solo	Solo argiloso [Peso específico: 1.700 kg/m³; Calor específico: 0,84 kJ/(kg·K); Condutividade térmica: 0,52 W/(m·K); Teor de umidade natural: 30%; Teor de umidade saturado: 50%]
Dados do piso simplificado (ver nota)	Radier de 16,5 cm [Peso específico: 2.400 kN/m³; Calor específico: 1,00 kJ/(kg·K); Condutividade térmica: 1,75 W/(m·K)]
Localização do piso em relação ao solo	Superfície inferior do piso no mesmo nível da superfície do solo (*OnGrade*)
Condição de isolamento térmico do piso	Sem isolamento térmico
Condição da evapotranspiração	Ativada no modelo simulado
Considerações para cálculo do domínio vertical e transferência de calor	Ativado o cálculo do perfil de temperaturas não alteradas pela presença da edificação a ser usado na condição limite inferior do domínio vertical; Ativado o cálculo do coeficiente de transferência de calor baseando-se nas condições meteorológicas disponíveis no arquivo climático
Período considerado nos processos iterativos	10 anos
Dimensões dos domínios horizontal e vertical do modelo elaborado	15 metros

Nota: o *Slab* considera apenas dois materiais (solo e piso) para a modelagem no pré-processador. Dessa forma, o piso – constituído por radier de concreto, argamassa e cerâmica – foi simplificado em um único material.

3.4. Influência de variações da temperatura do solo no desempenho do ambiente construído

Com intuito de se exemplificar a influência de possíveis variações da temperatura do solo no desempenho do ambiente construído, avaliou-se o comportamento do Dormitório 1 (Figura 1) com a aplicação das temperaturas encontradas a partir de cada método de cálculo. Como parâmetro de desempenho, a partir do método de simulação do RTQ-R (BRASIL, 2012), utilizou-se a quantidade de graus-hora para resfriamento (GHR) e o consumo relativo para aquecimento (CA) da habitação. Com relação às definições e configurações de uso e ocupação, cargas internas, sistema de ventilação natural e condicionamento artificial de ar, seguiu-se as configurações estabelecidas no RTQ-R (BRASIL, 2012).

4. RESULTADOS

A seguir apresenta-se os resultados e as análises para Curitiba (ZB 1), São Paulo (ZB 3) e Belém (ZB 8). Para cada cidade representativa, mostram-se as médias mensais das temperaturas do solo, conforme o sistema construtivo, obtidas através do pré-processador *Slab* e através do objeto *Ground Domain* pelos modelos *FinitteDifference* e *KusudaAchenbach*. Após os resultados para cada cidade, apresenta-se o desempenho do Dormitório 1 com a aplicação das temperaturas encontradas.

4.1. Análise dos dados para Curitiba (ZB 1)

Na Figura 3 mostram-se as temperaturas do solo obtidas para edificação no clima de Curitiba, considerando os três sistemas construtivos, de acordo com o método de cálculo.

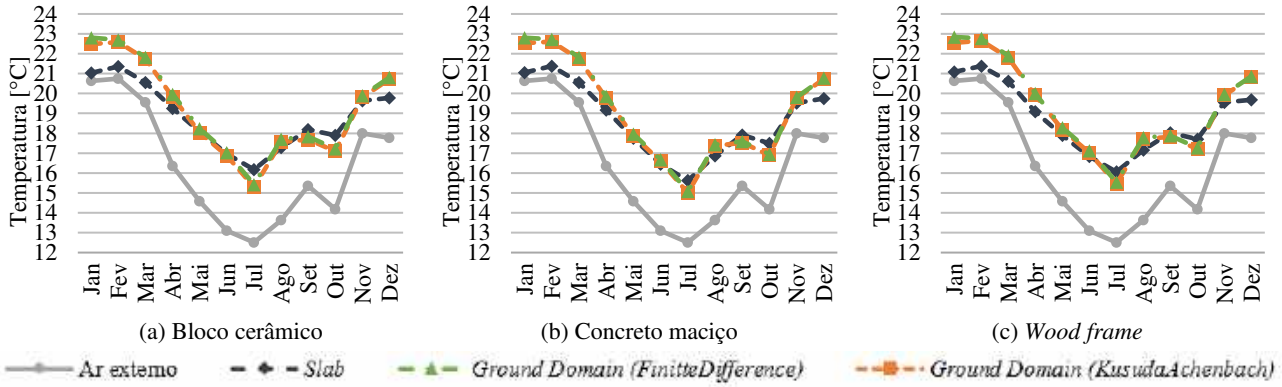


Figura 3 – Temperaturas do ar externo e temperaturas do solo da edificação para Curitiba

Pode-se observar que os valores de temperatura do solo obtidos através dos métodos de cálculo analisados apresentam diferenças em alguns meses do ano. Em geral, as temperaturas obtidas pelo *Ground Domain* são mais elevadas do que as obtidas pelo *Slab*, com exceção dos meses de Julho, Setembro e Outubro. As maiores diferenças de temperatura do solo foram encontradas comparando-se os valores obtidos pelo *Slab* e pelo método *FinitteDifference* do *Ground Domain*, no mês de Janeiro: 1,78 °C para o sistema construtivo bloco cerâmico, 1,76 °C para o concreto maciço e 1,76 °C para o *wood frame*. Ao se comparar a diferença média anual da temperatura do solo obtida pelos dois métodos do *Ground Domain*, observa-se valores bastante próximos entre o *FinitteDifference* e o *KusudaAchenbach*: 0,14 °C, 0,09 °C e 0,1 °C para o bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*, respectivamente.

Para o clima de Curitiba, não foram observadas diferenças significativas na temperatura do solo quando se alterna o sistema construtivo das paredes. O comportamento das temperaturas do solo observado na Figura é semelhante para os casos (a), (b) e (c), apresentando valores muito próximos.

4.2. Análise dos dados para São Paulo (ZB 3)

Na Figura 4 mostram-se as temperaturas do solo obtidas para edificação no clima de São Paulo, considerando os três sistemas construtivos, de acordo com o método de cálculo.

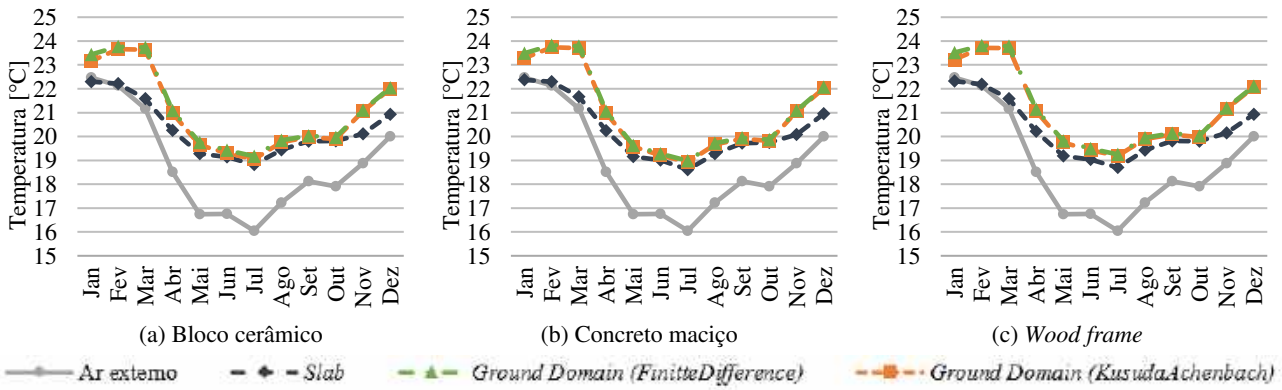


Figura 4 – Temperaturas do ar externo e temperaturas do solo da edificação para São Paulo

Observa-se, para o caso da zona bioclimática 3, que a variação entre as temperaturas do solo obtidas pelo *Slab* e pelo *Ground Domain* são maiores do que as observadas para a zona bioclimática 1. As

temperaturas obtidas pelo *Slab* apresentam valores inferiores às obtidas pelo *Ground Domain* em todos os meses do ano. As maiores diferenças de temperatura do solo foram encontradas no mês de Março, comparando-se os valores obtidos pelo *Slab* e pelo método *FinitteDifference* do *Ground Domain*: 2,14 °C para o sistema construtivo bloco cerâmico, 2,12 °C para o concreto maciço e 2,19 °C para o *wood frame*.

Novamente, ficou constatado que os métodos do *Ground Domain* proporcionam temperaturas do solo semelhantes, sendo observada diferença média anual entre os valores obtidos pelo *FinitteDifference* e *KusudaAchenbach* de 0,10 °C, 0,07 °C e 0,08 °C, para o bloco cerâmico, para o concreto maciço e para o *wood frame*, respectivamente.

Para o clima de São Paulo, também não se observou diferenças significativas na temperatura do solo ao se alternar o sistema construtivo das paredes.

4.3. Análise dos dados para Belém (ZB 8)

Na Figura 5 mostram-se as temperaturas do solo obtidas para edificação no clima de Belém, considerando os três sistemas construtivos, de acordo com o método de cálculo.

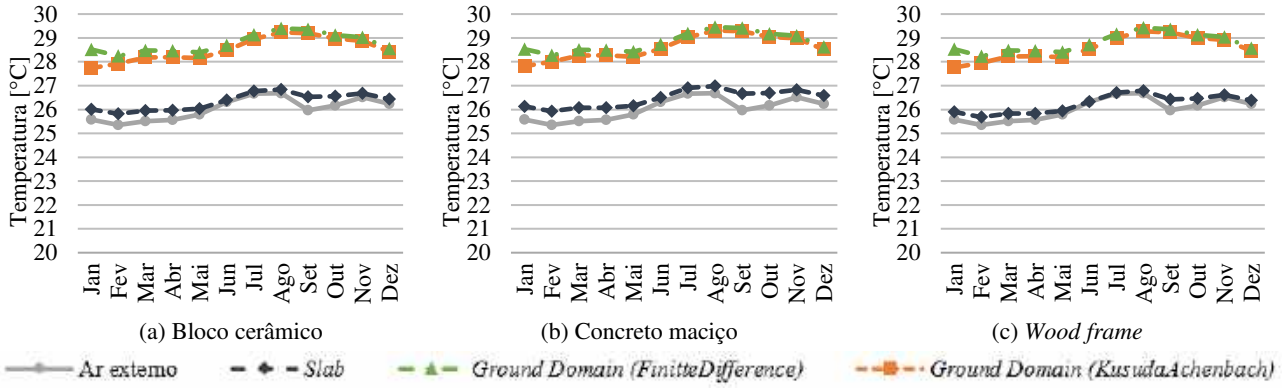


Figura 5 – Temperaturas do ar externo e temperaturas do solo da edificação para Belém

É possível observar que, diferentemente dos resultados para os climas anteriores, ocorre uma considerável discrepância na temperatura do solo ao longo do ano todo, conforme os resultados do *Slab* e dos modelos do *Ground Domain*. As maiores diferenças ocorrem em Setembro, comparando-se os valores pelo *Slab* e pelo modelo *FinitteDifference* do *Ground Domain*: 2,75 °C, 2,83 °C e 2,94 °C para o bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*, respectivamente. Já a diferença entre os dois modelos do objeto *Ground Domain*, com exceção ao mês de Janeiro, que chegou a 0,78 °C, foi mínima. A média anual da diferença da temperatura do solo pelos dois modelos foi de: 0,23 °C, 0,25 °C e 0,22 °C para o bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*.

Para o clima de Belém, mais uma vez não se observa grandes diferenças na temperatura do solo quando se alterna o sistema construtivo das paredes. As diferenças mais notáveis, quando há mudanças na envoltória, acontecem quando se utiliza do método do *Slab*. Além do mais, através dos resultados do *Slab* é possível notar, sobretudo para o *wood frame* (Figura .c), que a temperatura da interface solo e piso é muito próxima à temperatura do ar externo em locais quentes e com baixa amplitude térmica, como sugerem algumas pesquisas.

4.4. Análise da influência de variações da temperatura do solo no desempenho do ambiente construído

Neste item são apresentados os resultados das simulações para as condições de verão e inverno, com a aplicação das diferentes temperaturas de solo encontradas de acordo com o sistema construtivo, o clima e método de cálculo (*Slab* e *Ground Domain*).

4.4.1. Desempenho para verão

Na Figura 6 apresenta-se o desempenho do Dormitório 1 para o verão, através do indicador GHR conforme o RTQ-R (BRASIL, 2012).

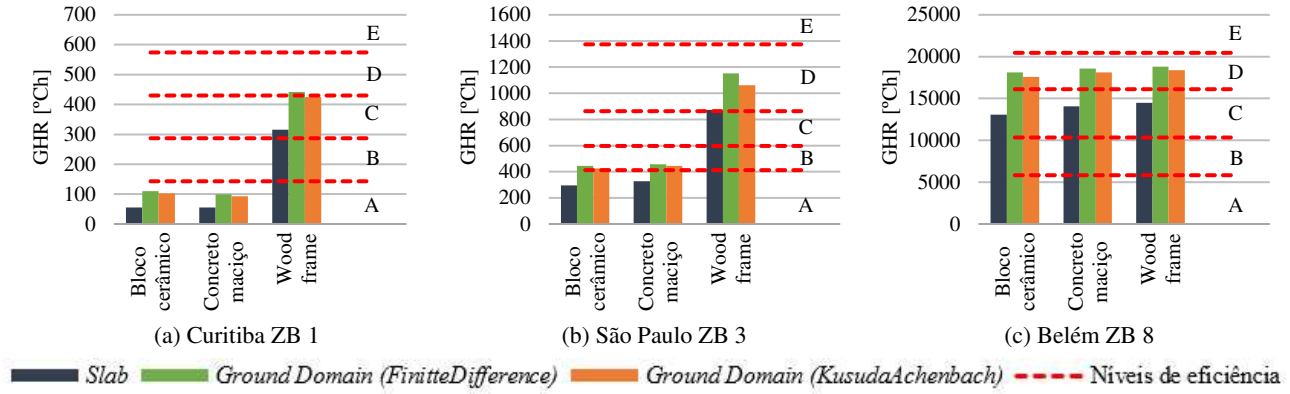


Figura 6 – Desempenho para verão (GHR) do Dormitório 1 em cada localidade, com aplicação da temperatura do solo conforme cada sistema construtivo e cada método de cálculo estudado

Em uma análise geral, observa-se que a diferença de temperaturas do solo pelo *Slab* e pelo *Ground Domain* (*FinitteDifference* e *KusudaAchencach*) resulta em uma considerável disparidade no indicador GHR. Por outro lado, comparando apenas os dois modelos de cálculo do *Ground Domain*, constata-se que a diferença mínima nos resultados da temperatura do solo não interfere tão significativamente na avaliação de desempenho do ambiente construído na maioria dos casos. Em outra análise, ressalta-se a diferença no desempenho do ambiente em *wood frame*. As zonas bioclimáticas 1 e 3 possuem climas mais amenos e com maiores amplitudes térmicas. Assim, a baixa capacidade térmica do sistema leve e a ausência de estratégias que melhorem seu comportamento justificam o baixo desempenho nos climas citados. Na zona bioclimática 8 as respostas dos três sistemas construtivos são semelhantes.

Através da Figura .a, situação de Curitiba, nota-se que a diferença de temperaturas pelo *Slab* e pelo *Ground Domain* foi mais significativa para o desempenho dos sistemas construtivos em bloco cerâmico e em concreto maciço. Para o método de cálculo *FinitteDifference* do *Ground Domain*, que resulta em temperaturas do solo mais distantes em relação aos valores pelo *Slab*, obteve-se uma diferença no GHR de 49,71% para o bloco cerâmico, 43,75% para o concreto maciço e 28,53% para o *wood frame*. Já a diferença de desempenho quando se compara somente os modelos de cálculo do objeto *Ground Domain*, é de 7,46% para o bloco cerâmico, 5,72% para o concreto maciço e 3,92% para o *wood frame*. Apesar das diferenças de desempenho, o nível de eficiência alcançado foi o mesmo (nível A) para a construção em blocos cerâmicos ou concreto maciço. Porém, para o *wood frame*, o método *FinitteDifference* do *Ground Domain*, acarretou nível D, enquanto os outros métodos resultaram em nível C.

No clima de São Paulo, observa-se na Figura .b um comportamento similar à Curitiba (Figura .a) na maioria das situações. Contudo, destaca-se uma maior diferença de desempenho no ambiente em *wood frame* quando comparados os modelos *FinitteDifference* e *KusudaAchencach* do objeto *Ground Domain*. As diferenças entre o desempenho do ambiente quando empregados os métodos *FinitteDifference* e *Slab* foram de 33,92%, 28,17% e 24,25% para o bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*, respectivamente. Nessa mesma ordem, comparando os dois modelos de cálculo do *Ground Domain*, as diferenças foram de 4,41%, 2,77% e 7,83%. Com relação ao nível de eficiência, para os casos em bloco cerâmico e em concreto maciço obteve-se nível A quando considerado o *Slab*, e nível B quando considerados os modelos do *Ground Domain*. Para o *wood frame*, obteve-se nível D com todos os métodos de cálculo da temperatura do solo.

Para Belém, através da Figura .c, tem-se mais uma vez que a diferença de temperatura é mais significativa para o sistema construtivo em bloco cerâmico. Comparando o modelo *FinitteDifference* do *Ground Domain* com o *Slab*, obteve-se diferenças de 27,91%, 24,24% e 23,12% no para o bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*, respetivamente. Já as diferenças quando se compara somente os modelos de cálculo do *Ground Domain* são de 3,00%, 2,32% e 2,19% para a construção em bloco cerâmico, concreto maciço e *wood frame*. Para os três sistemas construtivos, considerando as temperaturas do *Slab*, obteve-se nível C no Dormitório 1. Em contrapartida, considerando as temperaturas pelos dois modelos do *Ground Domain*, o nível alcançado foi D.

4.4.2. Desempenho para inverno

Na Figura 7 apresenta-se o desempenho do Dormitório 1 para o inverno, através do consumo relativo para aquecimento (CA) conforme o RTQ-R (BRASIL, 2012). Ressalta-se que Belém (ZB 8) não foi avaliada nesta situação, por apresentar clima predominantemente quente o ano todo.

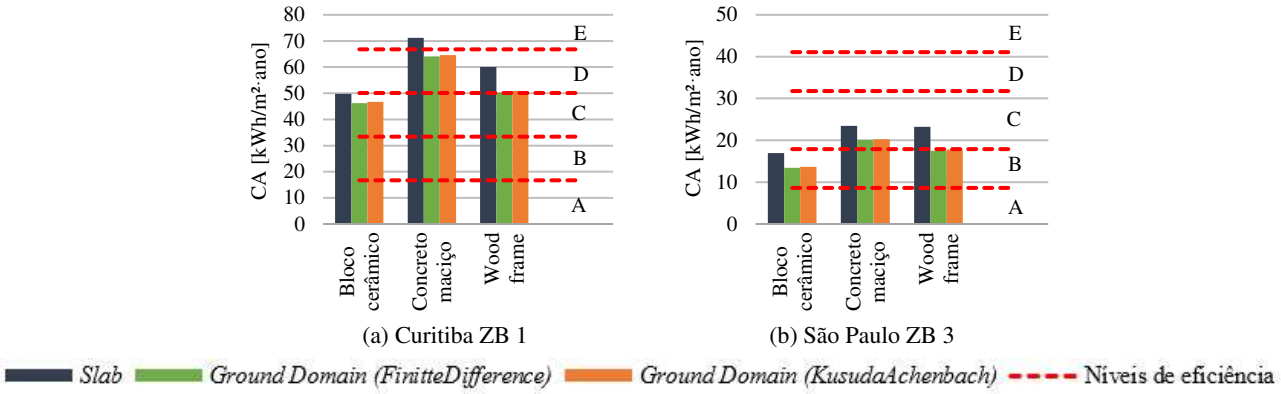


Figura 7 – Desempenho para inverno (CA) do Dormitório 1 em cada localidade, com aplicação da temperatura do solo conforme cada sistema construtivo e cada método de cálculo estudado

Analogamente à situação de verão, observa-se que a diferença de temperaturas do solo pelo *Slab* e pelo *Ground Domain* acarreta diferenças significativas no CA, o que não ocorre quando se observa somente as diferenças de acordo com o modelo de cálculo do *Ground Domain*.

Para Curitiba (Figura .a), a diferença no CA pelo *Slab* e pelo *Ground Domain (FinitteDifference)* foi de 7,62% para o bloco cerâmico, 11,22% para o concreto maciço e 19,30% para o *wood frame*. Quando comparados somente os modelos *FinnitteDifference* e *KusudaAchenbach*, a diferença foi de 1,07% para o bloco cerâmico, 0,81% para o concreto maciço e 1,10% para o *wood frame.* As diferenças no consumo não interferiram nas classificações do bloco cerâmico (nível C) ou *wood frame* (nível D). Contudo, para o concreto maciço, que gerou os maiores indicadores, as temperaturas do solo pelo *Ground Domain* acarretaram nível D, enquanto as temperaturas pelo *Slab* acarretaram nível E.

No clima de São Paulo (Figura .b), o comportamento foi similar ao clima de Curitiba, com consumos inferiores devido ao clima menos rigoroso. A diferença no CA, comparando-se o *Slab* com o *Ground Domain (FinitteDifference)*, foi de 25,77% para o bloco cerâmico, 16,81% para o concreto maciço e 32,74% para o *wood frame*. Já as diferenças entre os modelos de cálculo do *Ground Domain* foram de 1,26% para o bloco cerâmico, 0,86% para o concreto maciço e 1,65% para o *wood frame.* Outra vez, as diferenças nos indicadores não influenciaram nas classificações do bloco cerâmico (nível B) ou concreto maciço (nível C). Porém, para o *wood frame*, com o *Ground Domain* obteve-se nível B, enquanto com o *Slab* o nível alcançado foi C.

5. CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostraram que a escolha do método de cálculo da temperatura do solo é fundamental para a determinação do nível de desempenho da edificação. De um modo geral, observou-se nas três zonas bioclimáticas e nos três sistemas construtivos abordados diferenças entre temperaturas do solo obtidas através do *Slab* e através do *Ground Domain (FinitteDifference e KusudaAchenbac)*.

Para as zonas bioclimáticas 1 e 3, representadas por Curitiba e São Paulo respectivamente, as temperaturas de solo obtidas através dos dois modelos de cálculo do *Ground Domain* apresentaram valores semelhantes para os três sistemas construtivos. Para a zona bioclimática 8, representada por Belém, nos primeiros meses do ano as temperaturas obtidas pelo modelo *FinitteDifference* foram ligeiramente superiores às temperaturas obtidas pelo modelo *KusudaAchenbach*.

Por sua vez, as temperaturas de solo obtidas através do *Slab* apresentaram valores diferentes quando comparados aos outros métodos de cálculo, em todos os sistemas construtivos. De um modo geral, as temperaturas obtidas pelo *Slab* são menores nos meses cujas temperaturas médias são mais elevadas. Pelos resultados pode-se observar que, para as zonas bioclimáticas 1 e 3, as temperaturas obtidas pelo *Slab* se aproximam das encontradas através do *Ground Domain* nos meses em que as temperaturas médias são mais baixas, e são menores nos meses em que as temperaturas médias são mais elevadas. Este comportamento também é encontrado na zona bioclimática 8, onde as temperaturas médias são elevadas durante todo o ano. Nesta zona as temperaturas obtidas através do *Slab* se aproximam da temperatura do ar externo e são consideravelmente mais baixas que as calculadas pelo *Ground Domain* em todos os meses.

A análise da quantidade de graus-hora para resfriamento (GHR) mostrou que a temperatura do solo possui grande influência na determinação do desempenho da edificação nas três zonas bioclimáticas estudadas. Em todos os casos, a utilização das temperaturas do solo obtidas pelo *Slab* proporcionou valores de GHR menores do que os observados para os outros métodos de cálculo. Vale ressaltar que, para as zonas

bioclimáticas 1 e 3, os sistemas construtivos bloco cerâmico e concreto maciço apresentaram desempenhos térmicos semelhantes, enquanto o sistema *wood frame* apresentou desempenho inferior. Para a zona bioclimática 8, os três sistemas construtivos apresentaram desempenho semelhante. Por sua vez, a análise do consumo relativo para aquecimento (CA) mostrou que, para as duas zonas bioclimáticas analisadas, diferenças na temperatura do solo influenciam no desempenho da edificação na condição de inverno. Em todas as situações, o CA obtido com a utilização das temperaturas do solo calculadas pelo *Slab* foi maior do que o obtido com as temperaturas do solo calculadas pelo *Ground Domain*, sendo que em alguns casos essa diferença resultou em pior classificação de eficiência energética para o mesmo sistema construtivo.

Por fim, através dessa pesquisa conclui-se que, devido à relevância da variável temperatura do solo na análise de desempenho de edificações residenciais, é necessário que se defina qual o método de cálculo melhor representa a realidade, evitando assim que haja discrepância entre os níveis de desempenho obtidos através de simulações computacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Método de cálculo da transmitância térmica, 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, 2005b.

_____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais: desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades, Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade no Habitat – PBQP-H. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SiNAT. **Sistema estruturado em peças leves de madeira maciça serrada – TecVerde (tipo *light wood framing*), DATec Nº 020-C**. Brasília, 2017.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional**. Brasília, 2018.

_____. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Demanda de Energia 2050**. Brasília, 2016.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). Portaria nº18, de 16 de janeiro de 2012. **Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais (RTQ-R)**. Brasília, 2012.

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. **Revista Tecnológica**, v. 25, n. 1, p. 67-79, 2016.

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

COSTA, V. A. C.; CHVATAL, K. M. S. **Manual do Pré-Processador Slab.** Instituto de Arquitetura e Urbanismo (IAU/USP-SC). São Carlos, 2017.

COSTA, V. A. C.; 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. 117-135, 2017.

KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. **Earth Temperature and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States**. National Bureal of Standards Report. Washington, 1965.

MAZZAFERRO, L. **Influência dos elementos construtivos do envelope no desempenho térmico de edificações unifamiliares**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2013.

MAZZAFERRO, L.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios com o uso do objeto Ground Domain no programa EnergyPlus**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

OLIVEIRA, L. S.; CUNHA, EDUARDO G.; SILVA, A. C. S. B.; PINTO, M. M. 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

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

SANTOS, G. H.; MENDES, N. Moisture effects of unsaturated porus soils on ondoor air enthalpy. Ninth International IBSPA Conference. **Proceedings…** Canada, 2005.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SORGATO, M. J.; MELO, A.P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para a avaliação do desempenho térmico das edificações residenciais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 83-101, 2014.

WEBER, F. S.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; GUTHS, S.; LAMBERTS, R. **Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no EnergyPlus**. Florianópolis, 2017.

XING, L. **Estimations of Undisturbed Ground Temperatures using Numerical and Analytical Modeling**. Tese (Pós-doutorado) - Oklahoma State University. Stillwater, 2014.

AGRADECIMENTOS

À Capes, pela bolsa de estudo concedida à autora Rafaela Benan Zara.