

MODELAGEM DE PONTES TÉRMICAS NA ZONA BIOCLIMÁTICA 2: CINCO DIFERENTES ABORDAGENS

THERMAL BRIDGES MODELING IN BIOCLIMATIC ZONE 2: FIVE DIFFERENT APPROACHES

Julye Ramalho de Freitas¹

Rodrigo Karini Leitzke²

Eduardo Grala da Cunha³

Resumo

As pontes térmicas são pontos vulneráveis presentes no envelope das edificações e influenciam no desempenho termoenergético e ainda trazem consequências ao fechamento opaco, como o favorecimento na formação de fungos filamentosos. Os impactos das pontes térmicas e a sua consideração nos cálculos de transmitância térmica têm sido discutidos em diversos lugares do mundo e em regiões de climas frios no Brasil. Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de pontes térmicas de estrutura de concreto armado em uma edificação residencial na zona bioclimática 2, considerando cinco abordagens para modelagem de pontes térmicas no software de simulação computacional EnergyPlus. Os resultados mostram que o tipo de abordagem utilizada para modelagem na simulação computacional influencia nos valores de consumo energético da edificação. As diferentes modelagens testadas apresentaram variações no consumo energético quando comparadas às estratégias que consideraram os cálculos das pontes térmicas com a abordagem que desconsiderou este cálculo, sobretudo nos edifícios com maiores níveis de isolamento térmico, onde foi possível identificar diferenças de até 13% no consumo de energia. As conclusões observadas no trabalho mostram que o nível de isolamento do envelope é um dos fatores que interfere nas diferenças de consumo entre as abordagens avaliadas para as pontes térmicas.

Palavras-chave: Pontes térmicas lineares, Simulação Computacional, Desempenho energético.

Abstract

Thermal bridges are vulnerable points present in the envelope of buildings and influence the thermoenergetic performance and still bring consequences to the opaque surface such as the favoring in the formation of filamentous fungi. The impacts of thermal bridges and their consideration in calculations of thermal transmittance have been discussed in different parts of the world and in regions of cold climates in Brazil. This work aims to evaluate the impact of thermal bridges of reinforced concrete structure in a residential building in the bioclimatic zone 2, considering five approaches for modeling of thermal bridges in the EnergyPlus computational simulation software. The results show that the type of approach used for modeling in computational simulation influences the energy consumption values of the building. The different models tested showed variations in building energy consumption when comparing the strategies that considered the calculations of thermal bridges with the approach that disregarded this calculation, especially in high insulated buildings, where it was possible to identify differences of up to 13%. The conclusions observed show that the level of insulation of the envelope is one of the factors that interferes in the differences in building consumption between the approaches evaluated for thermal bridges.

Keywords: Linear Thermal Bridges, Computer Simulation, Energy Performance

¹ Universidade Federal de Pelotas, <https://orcid.org/0000-0003-2477-2307>, juramalhof@hotmail.com

² Universidade Federal de Pelotas, <https://orcid.org/0000-0002-6752-1025>, rodrigokarinileitzke@gmail.com

³ Universidade Federal de Pelotas, <https://orcid.org/0000-0002-6112-7561>, eduardogralacunha@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Com o grande consumo de energia elétrica no Brasil, as discussões sobre eficiência energética passaram a ganhar maior importância, e a busca por edificações que apresentem melhor desempenho térmico e menor consumo energético é cada vez maior. As edificações são responsáveis por 42,8% do consumo de energia elétrica no país, sendo o setor residencial responsável por 21,4% deste, seguido do setor comercial, que consome 14,4% de energia, e do setor público, com 7% de consumo (1). A avaliação do desempenho termoenergético é um importante passo para promover o uso de energia eficiente nas edificações, através dela pode-se verificar previamente o consumo energético e o nível de conforto térmico dos usuários de um edifício.

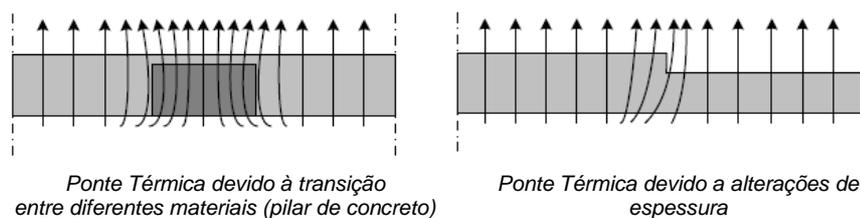
A primeira norma que trata de desempenho térmico de edificações no Brasil foi criada em 2005, a NBR 15.220 (2), que avalia o desempenho térmico de edificações de interesse social e ainda apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro, o qual divide o Brasil em oito zonas bioclimáticas diferentes e estabelece diretrizes bioclimáticas para cada diferente zona do país. Em 2008 foi publicada a primeira versão da NBR 15.575 (3), a qual avalia o desempenho de edificações residenciais e apresenta 13 aspectos a serem considerados durante a análise do edifício residencial. Nenhuma das normas brasileiras existentes até o momento aborda o tema pontes térmicas e nem as considera nos cálculos de transmitância térmica.

Segundo a norma EN ISO 10.211 (4), as pontes térmicas constituem uma parte da envoltória onde a transmitância térmica é modificada pela inclusão de materiais em parte da envoltória de condutividade térmica diferente; uma mudança na espessura da estrutura ou uma diferença entre as estruturas externas e internas, como, por exemplo, nas ligações parede/piso/teto. Em todos os casos citados o fluxo de calor busca o caminho no qual a resistência térmica seja menor. A envoltória de um edifício possui inúmeras zonas onde ocorrem alterações no nível da geometria dos elementos construtivos e das propriedades dos materiais, alterações na condutividade térmica, que afetam a direção do fluxo de calor e dão origem a fluxos de calor bidimensionais e tridimensionais. São essas zonas da envoltória que constituem as chamadas pontes térmicas (5).

O cálculo de pontes térmicas pode ser feito através dos métodos especificados nas normativas que tratam do tema ou, também, através de métodos numéricos com a ajuda de softwares especializados. Existem softwares de cálculo automático de pontes térmicas que se baseiam essencialmente na introdução dos dados geométricos 2D ou 3D das pontes térmicas através de interface gráfica (6). Alguns exemplos de softwares que funcionam através de dados 2D são o THERM®, BISCO® e o PSI-THERM 2D®, etc; e através de dados 3D são TRISCO® e o PSI-THERM 3D®.

A ponte térmica é caracterizada quando o fluxo térmico não é mais unidimensional (7). Ela é toda a parte do envelope de uma edificação onde não há unidirecionalidade do fluxo de calor e, portanto, não pode ser utilizado o cálculo convencionalmente empregado em análise de desempenho termoenergético de edifícios, que considera a resistência térmica dos elementos uniforme na sua área (8). As linhas de fluxo de calor deixam de ser retilíneas (Figura 1) e tomam as direções em que a resistência térmica do envelope à passagem do calor é menor.

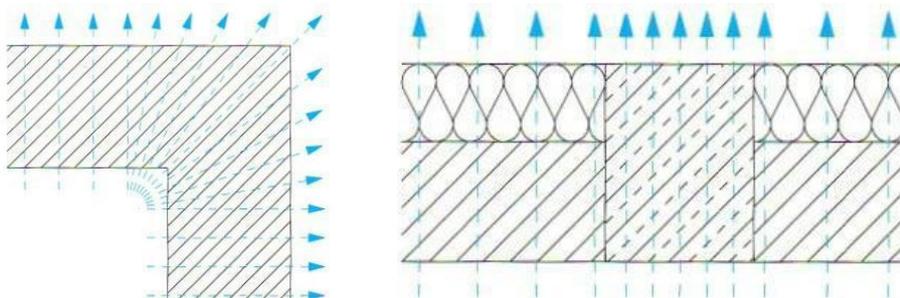
Figura 1. Exemplos de pontes térmicas no envelope construído (8).



Existem dois tipos de pontes térmicas: geométricas/lineares e condicionadas aos materiais (7). No caso das pontes térmicas geométricas, observa-se que o fluxo térmico de parte da superfície analisada é claramente diferenciado da maior parte do fechamento. Os cantos das paredes, por exemplo, são exemplos de pontes térmicas geométricas.

O segundo tipo de pontes térmicas são as condicionadas aos materiais, as quais ocorrem quando o fluxo térmico da superfície analisada é claramente diferente do fluxo térmico da superfície total. Um exemplo de ponte térmica condicionada ao material é uma estrutura de concreto armado numa parede dupla de alvenaria (duas diferentes transmitâncias térmicas). As Figuras 2 e 3 caracterizam as pontes térmicas geométricas/lineares e condicionadas aos materiais.

Figura 2 e 3. Ponte Térmica Geométrica, esquerda e Ponte Térmica Condicionada ao Material, direita (9).



As pontes térmicas geram impactos no envelope das edificações. O principal problema é o favorecimento da condensação superficial (10). A norma argentina IRAM 11.549 (11) caracteriza que a ponte térmica ocasiona maior fluxo de calor originando menores temperaturas superficiais e conseqüente condensação superficial.

A condensação devida também às pontes térmicas tem como consequência direta, na maioria das vezes, a formação de fungos filamentosos. A umidade nas edificações tem três diferentes fontes. A primeira é a umidade ascendente, a segunda é a umidade da chuva e a terceira é a difusão e convecção através de partes da construção (9). As pontes térmicas lineares de concreto armado são fontes de condensação da umidade do ar nas

superfícies internas de fechamentos opacos exteriores, em decorrência da baixa temperatura da superfície interna das estruturas de concreto no inverno.

Além da condensação superficial, a umidade relativa do ar elevada próxima das superfícies interiores de paredes exteriores também é uma possível causa de formação de bolor. A norma DIN 4108-2 define como condição de crescimento dos fungos filamentosos uma taxa de umidade relativa do ar de 80% junto a superfícies internas de paredes externas. A umidade é dada como a principal condição à formação de fungos filamentosos (12). Quando a superfície da parede apresentar uma taxa de umidade relativa do ar igual ou maior do que 80% por um período de 6 horas ou mais por dia, poderá ocorrer o surgimento de fungos filamentosos. A taxa de umidade relativa do ar ótima para o crescimento de fungos filamentosos fica entre 90% e 98%. Uma exceção é o fungo xerophile que pode desenvolver-se com uma taxa de umidade relativa do ar na faixa de 65%.

Além dos problemas de condensação e favorecimento ao surgimento de fungos filamentosos, as pontes térmicas são também responsáveis pelo aumento no consumo energético das edificações. Para o caso de Portugal, o peso das perdas por pontes térmicas pode atingir cerca de 20% das Perdas Térmicas Globais (PTG) (8). Isto demonstra que as pontes térmicas desempenham um papel relevante no comportamento e desempenho térmico dos edifícios, evidenciando a necessidade de tratamento destes pontos vulneráveis da edificação. Trabalhos ressaltam a importância do cálculo das pontes térmicas no estudo da transferência de calor nos edifícios, mas as informações sobre o tema ainda são limitadas e pouco esclarecedoras (13). A maioria dos países da União Europeia utiliza métodos simplificados para cálculo de pontes térmicas, apresentando apenas no regime estacionário, o que seria insuficiente devido à importância da inércia térmica do edifício no consumo energético.

Em uma análise em edifícios de classificação energética “A” , na Lituânia, os autores ressaltam a importância do cálculo das perdas de transmissão lineares através das pontes térmicas. Um projeto de um edifício geminado foi escolhido para analisar a influência das pontes térmicas. O cálculo das perdas de transmissão lineares pelas pontes térmicas foi analisado através do programa THERM. Foram analisadas duas variações diferentes, construções que se assemelham com as construções existentes hoje, uma sem o tratamento e isolamento de pontes térmicas e outra com soluções mais eficazes de isolamento e tratamento de pontes térmicas. Os resultados mostraram que as maiores perdas de calor no edifício se dão através das paredes e pontes térmicas. No prédio com maior eficiência energética e tratamento das pontes térmicas as perdas globais de calor reduziram 10kWh/(m².ano), cerca de 20%. Os autores concluíram que as perdas de calor de um prédio projetado sem tratamento de pontes térmicas podem ser revertidas aumentando as camadas de isolamento térmico e utilizando janelas e portas de maior eficiência. Quando um prédio é projetado utilizando soluções eficazes para pontes térmicas lineares, a eficiência energética do edifício pode ser alcançada com menos camadas de isolamento térmico e portas e janelas com comportamento térmico inferior (14).

A literatura também caracteriza que edifícios sujeitos a baixas temperaturas externas e com paredes com baixa resistência térmica resultam em baixas temperaturas nas superfícies internas (15). Quando esses fatores estão associados ao gerenciamento inadequado do usuário, principalmente no aspecto da ventilação, é inevitável o aumento da umidade absoluta dos espaços, o que gera altas taxas de umidade relativa nas regiões próximas às paredes, proporcionando áreas ideais para o crescimento de patologias, como fungos filamentosos.

Embora a qualidade das construções tenha melhorado nas últimas décadas, principalmente por meio de medidas destinadas a reduzir as perdas de calor por ventilação e transmissão, o número de relatos de danos à construção causados por microrganismos, principalmente por fungos, está aumentando. Uma das causas do aumento de fungos filamentosos em edifícios residenciais é a combinação dos ambientes fechados associado à ventilação insuficiente. A citação diz respeito ao contexto europeu. Assim, a umidade do ar nos ambientes aumenta, facilitando a formação de mofo não apenas na superfície interna das paredes em contato com o ar externo, mas também nas paredes internas. O cuidado com as características do envelope do edifício é essencial para uma habitação saudável (16).

O processo biodegenerativo, conhecido como mofo, é formado por fungos filamentosos e se caracteriza pela formação de manchas devido à liberação de pigmentos ou à presença do micélio. Sua criação é o resultado da formação de uma massa de esporos assexuais, chamados "conídios". Estes são dispersos pelo ar, pela água, pelos insetos e outros meios e, quando consolidados em algum substrato, podem germinar, gerando novas colônias (17).

Os fungos são principalmente organismos terrestres incapazes de produzir seus alimentos (heterotróficos), mas produzem enzimas digestivas que atacam o corpo do material para decompor a matéria orgânica. Eles são, na maioria das vezes, filamentosos, e esses filamentos são chamados de "hifas", e o conjunto de hifas do organismo é conhecido como "micélio" (18).

Processos físicos ou mecânicos (desintegração ou fratura) e processos químicos (decomposição) são os mecanismos que podem promover a biodegradação de materiais. Estes podem coincidir, e os agentes responsáveis pela degeneração, o tipo de substrato e as condições ambientais determinarão a predominância dos processos. A biodegradação pode ocorrer em vários tipos de materiais e depende de variáveis como a característica do substrato, o tipo de organismo envolvido e, principalmente, as condições ambientais (19).

Quando a superfície da parede interna de um edifício tem uma umidade relativa maior ou igual a 80% por 6 horas ou mais por dia, os fungos filamentosos podem se desenvolver (12). Já o microclima próximo à superfície das paredes internas refere-se à produção de calor, comportamento do usuário, ventilação e projeto do invólucro do edifício, principalmente em aspectos relacionados à formação de pontes térmicas e transporte de umidade (20).

Em um estudo por meio de simulação computacional referente ao impacto de pontes térmicas em edifícios típicos da arquitetura grega construídos com paredes de tijolo duplo, que geralmente utilizam um isolamento parcial do que é previsto nos regulamentos de desempenho, os autores comentam que apesar do isolamento térmico exigido pelos regulamentos, as pontes térmicas ainda continuam sendo um ponto fraco das edificações, e concluem que as paredes de tijolo duplo, amplamente utilizadas na Grécia, são suscetíveis a pontes térmicas. Levando em consideração que os edifícios construídos nos últimos 20 anos são parcialmente isolados e não consideram o cálculo das perdas térmicas reais ocasionadas pelas pontes térmicas, as perdas térmicas podem ser até 35% maiores do que o estimado pela metodologia utilizada, sem considerar as pontes térmicas. Mesmo quando utilizado um sistema melhor de isolamento nas edificações, os gastos com aquecimento, quando calculados pela metodologia que não leva em consideração cálculos de pontes térmicas, são 30% maiores, mostrando que o quadro legislativo é insuficiente e pode levar a uma subestimação significativa no consumo real de energia (21).

Em um estudo, através de simulação computacional, sobre o impacto de pontes térmicas em varandas no desempenho térmico global de edifícios com várias unidades em Toronto, no Canadá, foi comparado o desempenho de varandas sem tratamento de pontes térmicas e com tratamento de pontes térmicas através de uma ruptura térmica/separador de varanda. Os resultados mostram que através da introdução da ruptura térmica o valor da transmitância global da varanda é reduzido em 72-85% e a temperatura mínima da superfície do piso é aumentada de 6,1°C para 12,5°C, o que é importante no ponto de vista do conforto do usuário. A avaliação do consumo energético foi realizada através de simulações de um piso típico utilizando o programa eQuest. Todos os resultados mostram que, com a utilização da ruptura térmica em lajes de varanda, o consumo de energia para aquecimento pode ser reduzido de 5 a 13% e para refrigeração menos de 1% (22).

Quanto à investigação do impacto de pontes térmicas estruturais de concreto armado em clima quente, foi realizada uma análise em uma edificação unifamiliar em Dubai com a envoltória composta por blocos isolados e uma armação de concreto armado. Os autores utilizaram o software EnergyPlus por meio da modelagem da edificação com subsuperfícies para considerar as pontes térmicas e analisaram os efeitos no consumo de energia usando diferentes soluções de isolamento para minimizar o efeito das mesmas. Os resultados mostraram que, quando a estrutura de concreto não possui isolamento (caso base), as perdas por pontes térmicas podem representar um consumo de energia 24,5% maior quando comparada com a mesma edificação utilizando um isolamento de 50mm de EPS sobre a estrutura e o bloco de concreto. Os autores também concluíram que isolar apenas a moldura de concreto, que seria uma opção mais simples e econômica, já é suficiente para uma economia energética de 23% em relação ao caso base. E, ainda, se for feito um retrofit com 160mm de EPS a economia de energia pode chegar até 30% (23).

Cálculo das Pontes Térmicas

A norma internacional EN ISO 14.683 (24) apresenta métodos de cálculo simplificados para caracterizar as perdas de calor através das pontes térmicas lineares (5).

De acordo com a norma EN ISO 14.683 (24), a taxa de fluxo de calor que atravessa a envolvente do edifício entre os ambientes interior e exterior com temperaturas (θ_i e θ_e), respectivamente, é determinada usando a expressão seguinte (Equação 1):

$$Q = Ht \cdot (\theta_i - \theta_e) [W] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Ht - Coeficiente de transferência térmica global (W/K);

($\theta_i - \theta_e$) - Diferença entre as temperaturas do ambiente interior e do ambiente exterior (K)

O coeficiente de transmissão térmica global *Ht* é determinado através do seguinte somatório:

$$Ht = Hd + Hg + Hu [W/K] \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Hd - Coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente do edifício (W/K);

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

Hu - Coeficiente de transmissão térmica unitário de espaços não ventilados (W/K).

Para o cálculo do coeficiente de transmissão térmica unitário da envolvente, consideram-se as pontes térmicas, conforme a Equação 3.

$$Hd = \sum_i Ai \cdot Ui + \sum_k Ik \cdot \psi_k + \sum_j Xj [W/K] \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

Ai - Área do elemento *i* da envolvente do edifício (m^2);

Ui - é a transmitância térmica do elemento *i* da envolvente do edifício (W/($m^2 \cdot K$));

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

ψ_k - é a transmitância térmica linear da ponte térmica linear *k* (W/($m \cdot K$));

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

De acordo com a EN ISO 14683 (24), as transmitâncias térmicas lineares ocorrem nos seguintes locais das edificações: nas junções entre elementos externos (cantos de paredes, paredes com coberturas e paredes com pisos); nas junções de paredes internas com paredes externas e telhados; nas junções de pisos intermediários com paredes; nos pilares em paredes externas; em torno de portas e janelas. Na maior parte dos casos as pontes térmicas pontuais podem ser ignoradas e o termo envolvendo a ponte térmica pontual pode ser desconsiderado da equação (5). Deve-se observar que se houver um número significativo de pontes térmicas pontuais, os coeficientes de transmissão térmica pontuais devem ser calculados com base na norma EN ISO 10211 (24). A transmitância térmica linear ψ pode ser determinada com base em catálogos de pontes térmicas, cálculos numéricos, manuais e valores padrão.

A EN ISO 10211 (4) apresenta informações sobre os métodos de cálculos de pontes térmicas como também caracteriza como os três sistemas dimensionais são utilizados: - dimensões globais internas, medidas entre as faces internas dos elementos exteriores do edifício; - dimensões internas, medidas entre as faces internas de cada compartimento do edifício; - dimensões externas, medidas entre as faces externas dos elementos do edifício. A EN ISO 14683 (24) caracteriza a precisão dos métodos para determinação das pontes térmicas, caracterizada na Tabela 1.

Tabela 1: Precisão dos métodos para determinação de pontes térmicas de acordo com a EN ISO 14683 (24)

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

De acordo com a EN ISO 14683 (24), o método numérico deve ser determinado acordando com a EN ISO 10211 (4).

Outra forma de obter o valor da transmitância térmica linear é recorrendo a catálogos de pontes térmicas (5). Esses catálogos são feitos com base em cálculos numéricos realizados em conformidade com a norma EN ISO 10211 (4), e devem fornecer as seguintes informações:

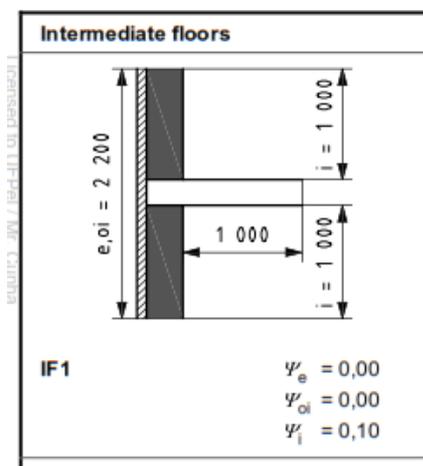
- Orientação clara de como os valores de ψ são derivados dos valores indicados no catálogo;
- Dimensões do detalhe construtivo e transmitâncias térmicas lineares das secções homogêneas do detalhe;
- Resistências térmicas superficiais interna e externa utilizadas para a definição dos valores presentes no catálogo.

O método de cálculo manual deve apresentar as informações caracterizadas a seguir (5): tipos de detalhes construtivos presentes no edifício; valores limite de dimensões vinculados à validade do método; valores de resistências térmicas superficiais para serem utilizadas; valores limite de condutibilidades térmicas para os materiais aplicados; uma estimativa de precisão.

A quarta forma de determinação das pontes térmicas são as tabelas de valores padrão de ψ presentes na tabela A.2 da EN ISO 14683 (24),

caracterizado na Figura 4. A tabela A.2 contém exemplos de detalhes construtivos, associados a parâmetros fixos (dimensões fixas e materiais).

Figura 4. Determinação de ponte térmica – Tabela de valor padrão – Anexo A EN ISO 14683 (24).



Com base nas metodologias de cálculo existentes e considerando que os softwares de simulação termodinâmica não consideram as pontes térmicas no balanço térmico da edificação, foram definidas as 5 abordagens para a realização das simulações computacionais. Na primeira, os materiais são modelados buscando caracterizar a heterogeneidade das paredes quanto à sua composição (modelo real com estrutura de concreto armado e paredes de alvenaria cerâmica, mas que não consideram as pontes térmicas lineares). Nas abordagens 2, 3, 4 e 5, a partir da consideração do incremento da transmitância térmica (abordagens 3, 4 e 5) observado nos métodos simplificados da ISO 10211 e 14683, foram criadas paredes equivalentes no software Energy Plus, diferenciando-se pela ponderação das transmitâncias térmicas dos diferentes fechamentos (estrutura de concreto armado e parede de alvenaria cerâmica), como também da capacidade térmica dos supracitados materiais.

OBJETIVO

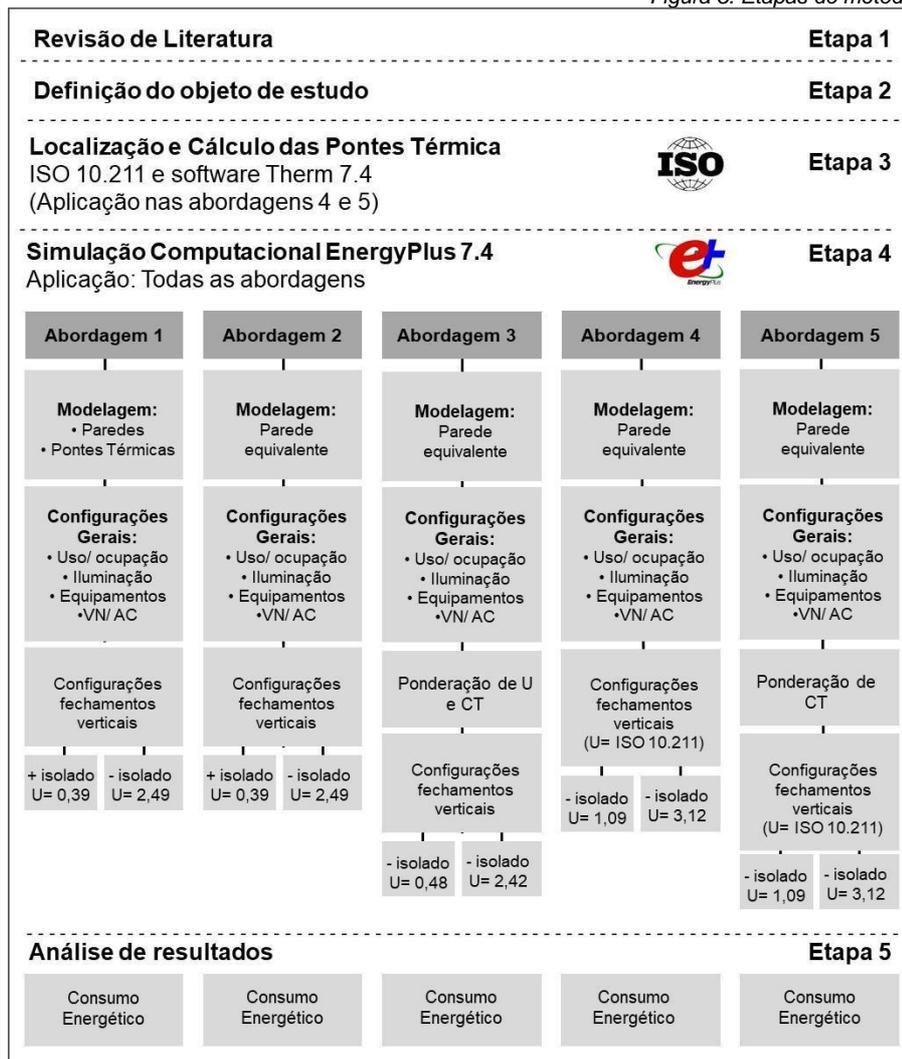
O objetivo deste trabalho é analisar a influência das pontes térmicas em estruturas de concreto armado no desempenho energético de edificação residencial na Zona Bioclimática 2, do Brasil, segundo cinco diferentes abordagens de modelagem para simulação computacional. A abordagem 1 está relacionada à configuração do modelo base, chamado de modelo real, com a modelagem da estrutura de concreto armado e da alvenaria das paredes. A abordagem 2 é chamada de simplificada, utilizando estratégias de equivalência para definir a composição dos fechamentos e realizar as simulações. Cria-se uma parede com camadas homogêneas com a mesma transmitância e capacidade térmica da parede real (desconsiderando o sistema estrutural). A abordagem 3 também é simplificada, porém fazendo a ponderação da transmitância térmica (U) e da capacidade térmica (CT) dos fechamentos. A abordagem 4, também simplificada, propõe um aumento no nível de isolamento dos fechamentos (U), observando o incremento da ISO

14683. E, por fim, a abordagem 5 realiza um aumento no nível de isolamento dos fechamentos associado à ponderação da capacidade térmica dos componentes de alvenaria e concreto armado.

METODOLOGIA

O trabalho utiliza a simulação computacional como estratégia de pesquisa. O método foi dividido em cinco etapas, conforme a Figura 5.

Figura 5. Etapas do método.



Na primeira etapa foi realizada uma revisão de literatura sobre o tema pontes térmicas e metodologias de cálculo de pontes térmicas. Na segunda etapa foi definida a edificação a ser estudada. Na terceira etapa foram localizadas as pontes térmicas da edificação e calculadas de acordo com a metodologia de cálculo da normativa ISO 10.211, com o auxílio do software Therm 7.4. Na quarta etapa foram realizadas as simulações computacionais das 5 diferentes

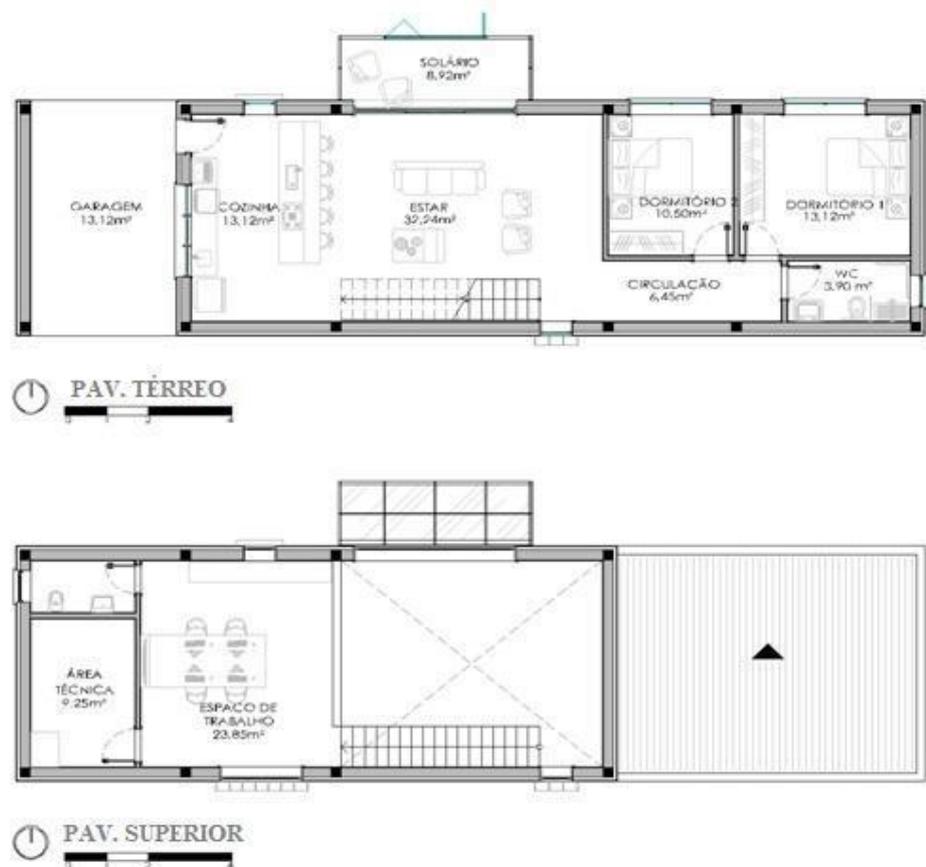
abordagens, com o software EnergyPlus 8.4, e na quinta e última etapa foram analisados os resultados.

Definição do objeto de estudo

O projeto, Figura 6, trata-se de uma edificação residencial (25), projetada para atender aos critérios de uma Passive House, embora neste trabalho as transmitâncias térmicas de paredes externas tenham sido alteradas.

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

Figura 6. Plantas baixas.



Localização e cálculo das pontes térmicas

Na edificação residencial em análise, foram encontrados 8 diferentes tipos de pontes térmicas na estrutura. As pontes térmicas são lineares, caracterizadas no encontro entre as vigas e pilares e as lajes de piso, entrepiso e cobertura. As Tabelas 2 e 3 ilustram os diferentes tipos de pontes térmicas, a localização na edificação, a área total e o comprimento total de cada tipo, para quando a transmitância térmica das paredes externas foi considerada $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, prédio mais isolado e mais denso (Tabela 2) e para quando a transmitância térmica for considerada $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, prédio menos isolado e mais leve (Tabela 3). A Tabela 4 caracteriza a área de paredes em cada fachada da edificação, e a Tabela 5 apresenta a composição das paredes com as transmitâncias térmicas base $0,39 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ e $2,49 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

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

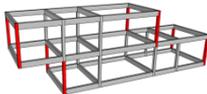
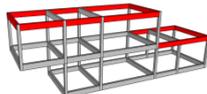
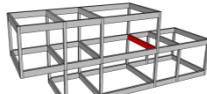
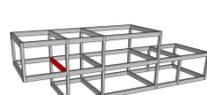
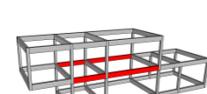
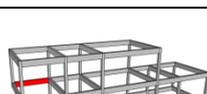
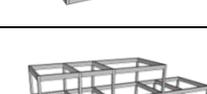
Nome	Imagem	Localização	Área Total (m^2)	Comprimento Total (m)
PT1		Pilares	7,22	25,80
PT2		Fachada com cobertura	22,10	51,66
PT3		1º pav. Com cobertura pav. Térreo	2,04	5,11
PT4		Fachada com garagem	2,04	5,11
PT5		Fachada (garagem) com laje de primeiro pav.	2,04	5,11
PT6		Fachada com pav. Intermediário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

Tabela 3: Dados pontes térmicas $U = 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

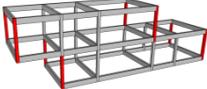
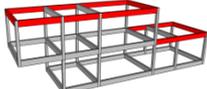
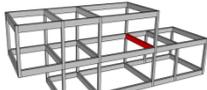
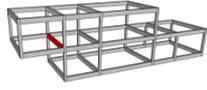
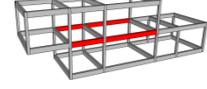
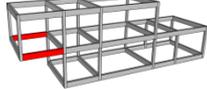
Nome	Imagem	Localização	Área Total (m^2)	Comprimento Total (m)
PT1		Pilares	3,35	25,80
PT2		Fachada com cobertura	23,17	57,94
PT3		1º pav. Com cobertura pav. Térreo	2,16	5,41
PT4		Fachada com garagem	2,16	5,41
PT5		Fachada (garagem) com laje de primeiro pav.	2,16	5,41
PT6		Fachada com pav. Intermediário	7,99	19,96
PT7		Fachada com exterior	2,98	4,46
PT8		Fachada em contato com solo	11,23	45,07

Tabela 4: Área de paredes

Fachada	Área das paredes (m^2)	
	$U = 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$	$U = 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Sul	76,65	80,19
Norte	64,84	68,15
Leste	26,56	28,12
Oeste	26,56	28,12
Total	194,61	204,66

Tabela 5: Composição das paredes

Transmitância Térmica (U) W/(m²K)	Composição Parede	Espessura (m)	Composição Ponte Térmica	Espessura (m)
0,39	Reboco externo	0,02	Concreto armado	0,28
	EPS	0,03		
	Tijo Cer. 6 furos	0,10		
	Câmara de ar	0,05		
	Tijolo Cer. 6 furos	0,10		
	Reboco interno	0,02		
2,49	Reboco externo	0,025	Concreto armado	0,13
	Tijolo Cer. 4 furos	0,095		
	Reboco Interno	0,25		

Todas as pontes térmicas foram modeladas no software THERM a fim de encontrar o fluxo de calor (ϕ) em cada ponte térmica. Esse valor é necessário para que as pontes térmicas possam ser calculadas através das equações da norma ISO 10.211. O software THERM faz o cálculo da distribuição de fluxos de calor e temperaturas em regime estacionário do detalhe em análise, além do valor do fluxo de calor. O programa pode fornecer resultados gráficos em linhas isotérmicas, vetores de fluxo de calor, linhas de fluxo constantes e perfis de temperatura. Após a modelagem das pontes térmicas no software THERM., nos dois casos de isolamento diferentes, a Equação 4, da ISO 10.211 (4), pode ser aplicada para a obtenção do valor do coeficiente de transmissão linear (Ψ). Neste trabalho foram adotadas medidas exteriores para L_i .

$$\psi = L_{2D} - \sum_{i=1}^{N_i} (U_i \cdot l_i) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

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

N_i é a necessidade nominal de energia útil de aquecimento para as condições de referência (kWh/(m².ano));

U_i é a transmitância térmica superficial segundo uma dimensão do elemento i que separa dois meios (W/(m².K));

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

O parâmetro L_{2D} também pode ser representado pela Equação 5:

$$L_{2D} = \frac{\phi_g}{\Delta T} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

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

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

A Tabela 6 apresenta o resumo de todos os coeficientes encontrados. As pontes térmicas que obtiveram o valor de coeficiente de transmissão linear negativos foram desconsideradas.

Tabela 6: Valores de coeficiente de transmissão linear

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

A partir da definição dos valores de coeficiente de transmissão linear, foram definidas novas transmitâncias térmicas dos casos bases, acrescido do fluxo de calor linear que passa pelas paredes através das pontes térmicas. Tendo os valores do coeficiente de transmissão linear (Ψ) de cada ponte térmica, as Equações 4 e 5 foram aplicadas para definir as novas transmitâncias térmicas com a consideração das pontes térmicas na Equação 6.

$$(UxA)_{parede\ alvenaria} + (UxA)_{PT\ plana} + (\Psi x l)_{PT\ linear} = X \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

U = transmitância térmica (w.m²/K);

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

l = comprimento ponte térmica (m).

O resultado da Equação 7 dividido pela área total de paredes de alvenaria e pontes térmicas irá resultar em um novo valor de transmitância térmica (Equação 6) com a consideração das pontes térmicas. Os resultados de transmitância encontrados estão especificados na Tabela 7, abaixo.

$$U = \frac{X}{AT} \quad \text{Equação 7}$$

Tabela 7: Transmitâncias térmicas incrementadas pelo cálculo ISO 10.211

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

Modelagem da edificação

A modelagem da edificação simulada foi feita no programa SketchUp 2015 Make com o plugin Legacy Open Studio 1.14. Cada compartimento da edificação foi modelado como uma zona térmica, conforme Figura 7. As dimensões das zonas térmicas foram caracterizadas pelas dimensões externas das paredes externas até o eixo das paredes internas. Cabe ressaltar que o programa Energy Plus não considera nos cálculos as pontes térmicas lineares/geométricas. Nesse sentido, nas abordagens 4 e 5 a consideração das pontes térmicas é caracterizada pelo incremento na transmitância térmica do envelope calculado conforme ilustrado na introdução. As diferenças entre as abordagens caracterizam-se pela consideração da transmitância térmica e capacidade térmica observando ou não a ponderação pelas respectivas áreas do sistema estrutural e das paredes de alvenaria. Nas três abordagens as paredes são compostas por camadas homogêneas. As cinco diferentes abordagens utilizadas para modelagem foram determinadas como:

Abordagem 1: Construção real

Nessa abordagem, o edifício foi modelado com a marcação da estrutura onde ocorrem as pontes térmicas (Figura 7). Através do comando "New Construction Stub", a estrutura de concreto armado pode ser definida como ponte térmica durante a modelagem da edificação no SketchUp + Legacy Open Studio. Logo após, no IDF Editor do programa EnergyPlus, a estrutura de concreto pode receber uma configuração de transmitância térmica e capacidade térmica diferente do restante das paredes que compõem os fechamentos verticais da edificação. Apesar da simulação computacional, o software EnergyPlus não calcula efetivamente o efeito de pontes térmicas, pois o programa não consegue calcular o coeficiente de transmissão linear (ψ) pela ponte térmica linear. Essa abordagem é mais rígida quanto às configurações de materiais e consegue simular o efeito da ponte térmica plana através da área. As transmitâncias térmicas e capacidades térmicas utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 8.

Figura 7. Modelagem Abordagem 1



Tabela 8: Transmitâncias térmicas e Capacidades Térmicas Abordagem 1

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

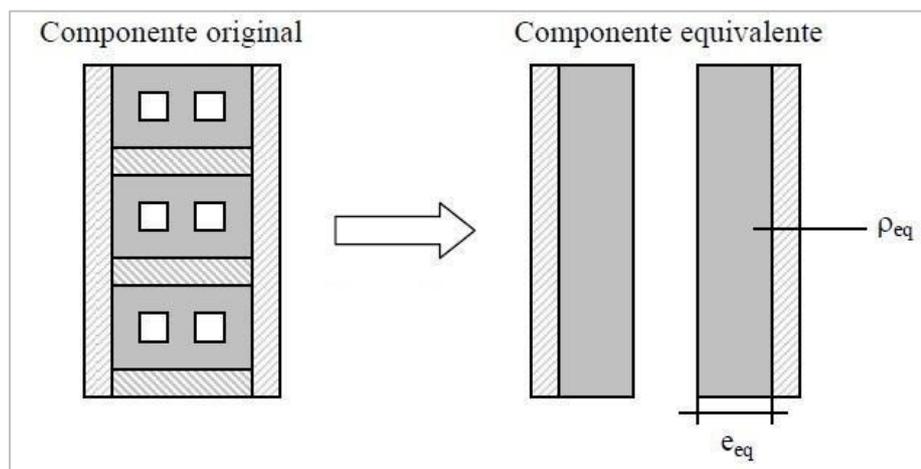
Abordagem 2: Simplificada

A abordagem 2, considerada como abordagem simplificada, é a mais utilizada em simulações computacionais (Figura 8). A edificação foi modelada com uma parede equivalente com camadas homogêneas, a qual apresenta os mesmos dados de transmitância e capacidade térmica da parede real da edificação, ou seja, desconsiderando o sistema estrutural de concreto armado. No mundo real, a maioria dos fechamentos, principalmente os de alvenaria cerâmica, é composta por camadas heterogêneas. Considerando que o software EnergyPlus entende os fechamentos como compostos por camadas homogêneas, uma parede equivalente deve ser criada com as mesmas propriedades de transmitância térmica e capacidade térmica da parede real. A Figura 9 exemplifica a transformação de uma parede real para uma parede equivalente (26).

Figura 8. Modelagem Abordagem 2, 3, 4 e 5.



Figura 9. Parede equivalente (25)



A resistência térmica (R) da parede equivalente será dada pela Equação 8, a transmitância térmica (U) da parede equivalente será dada pela Equação 9 e a capacidade térmica (CT) equivalente pela Equação 10, especificadas abaixo.

$$R_{orig} = R_{eqv} \quad \text{Equação 8}$$

$$U_{orig} = U_{eqv} \quad \text{Equação 9}$$

$$CT_{orig} = CT_{eqv} \quad \text{Equação 10}$$

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

Tabela 9: Transmitância térmica e Capacidade Térmica Abordagem 2

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

Abordagem 3: Simplificada com ponderação de U e CT

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

Tabela 10: Transmitância térmica e Capacidade Térmica Abordagem 3

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

Abordagem 4: Simplificada com aumento de transmitância térmica

A quarta abordagem também utiliza o método de parede equivalente, porém com a transmitância térmica dos fechamentos verticais incrementada em função da consideração da diminuição da resistência da envoltória pelas pontes térmicas. Para chegar à transmitância térmica incrementada em função das pontes térmicas, foi utilizada a metodologia de cálculo detalhada pela normativa ISO 10.211, com o auxílio do programa THERM 7.4. A modelagem no programa SketchUp + Legacy Open Studio é idêntica à modelagem simplificada (Figura 8), porém no IDF Editor recebe configurações diferentes quanto aos materiais e composição das camadas que caracterizam as paredes. Ou seja, a partir do incremento da transmitância térmica no fechamento vertical, fruto do cálculo da ISO 10.211, a espessura do material equivalente da parede foi recalculada. Nesta abordagem, a capacidade térmica considerada foi a da parede de alvenaria

sem a consideração da capacidade térmica da estrutura de concreto armado presente na estrutura. A transmitância térmica e capacidade térmica utilizadas nessa abordagem estão especificadas na Tabela 11, abaixo.

Tabela 11: Transmitância térmica e Capacidade Térmica Abordagem 4

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

Abordagem 5: Simplificada com aumento de transmitância térmica e ponderação da capacidade térmica

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

Tabela 12: Transmitância térmica e Capacidade Térmica Abordagem 5

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

Configurações das simulações

Uso, ocupação e equipamentos

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

Tabela 13: Tipologia e Uso (27).

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

Materiais e composição dos fechamentos

As abordagens 1 e 2 foram simuladas em dois casos diferentes, utilizando duas transmitâncias térmicas para os fechamentos verticais. No caso 1, a edificação foi simulada com as paredes externas com transmitância térmica (U) de 2,49 W/(m²K), próximo do valor limite para atender a NBR 15.575 em zonas mais frias (2,50 W/(m²K)). No caso 2, a edificação foi simulada com paredes externas com transmitância térmica (U) de 0,39 W/(m²K), com o intuito de fazer a análise em prédios mais isolados. Em todos os casos simulados foi adotada a absorvância solar de 0,25, equivalente a cores claras como condição de contorno.

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

Em ambas as abordagens o fechamento de tijolo cerâmico furado foi configurado no software EnergyPlus por meio de uma parede equivalente, já que o programa compreende os fechamentos como homogêneos, conforme o ilustrado na Figura 9 (26). Após o cálculo, as configurações e espessuras adotadas para as paredes equivalentes das transmitâncias 0,39 W/(m².K) e 2,49 W/(m².K) e os valores de densidade de massa aparente equivalente da cerâmica estão especificadas na Tabela 14, abaixo.

Tabela 14: Composição das paredes abordagem 1 e 2

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

Tabela 15: Paredes equivalentes $U = 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ e $U = 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Parede Eq. $U = 0,39 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,02	1,15			
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,66	1,05	412,90	0,39	272,2
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,66	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			

Parede Eq. $U = 2,49 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,025	1,15			
Cerâmica	0,2	1,05			
Câmara de Ar	0,05	-	186	2,49	2.608,69
Cerâmica	0,2	1,05			
Reboco interno	0,025	1,15			

Nas abordagens 3, 4 e 5, que sofreram alterações nos valores de transmitância térmica e capacidade térmica, foram feitos ajustes na espessura dos materiais na parede equivalente até que se obtivesse uma parede com a transmitância desejada, o mesmo foi feito para a capacidade térmica. As composições das paredes equivalentes das abordagens 3, 4 e 5 estão especificadas na Tabela 16, 17 e 18, abaixo.

Tabela 16: Configurações dos materiais parede equivalente abordagens 3

Parede $U = 0,48 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,02	1,15			
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,44	0,90	460	0,48	467,26
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,44	0,90			
Reboco interno	0,02	1,15			

Parede $U = 2,42 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,025	1,15			
Cerâmica	0,03	0,90			
Câmara de Ar	0,05	-	211,26	2,42	2.196
Cerâmica	0,03	0,90			
Reboco interno	0,03	1,15			

Tabela 17: Configurações dos materiais parede equivalente abordagens 4

Parede U = 0,95 W/(m ² K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,02	1,15			
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,35	1,05	412,90	0,95	516,92
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,35	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			

Parede U = 3,29 W/(m ² K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,025	1,15			
Cerâmica	0,05	0,90			
Câmara de Ar	0,05	-	186	3,29	1.043,47
Cerâmica	0,05	0,90			
Reboco interno	0,03	1,15			

Tabela 18: Configurações dos materiais parede equivalente abordagens 5.

Parede U = 0,95 W/(m ² K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,02	1,15			
EPS	0,03	0,035			
Cerâmica	0,35	1,05	460	0,95	281,44
Câmara de Ar	0,05	-			
Cerâmica	0,35	1,05			
Reboco interno	0,02	1,15			

U = 3,29 W/(m ² K)					
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)	Densidade equiv. Cerâmica (kg/m ³)
Reboco externo	0,025	1,15			
Cerâmica	0,05	1,05			
Cerâmica	0,05	1,05	211,26	3,29	1.318,04
Reboco interno	0,03	1,15			

A cobertura foi configurada de maneira diferente para a edificação mais isolada e menos isolada. O edifício mais isolado, em todas as abordagens, recebeu uma cobertura com transmitância 0,43 W/(m².K). O prédio menos isolado, em todas as abordagens, foi configurado com uma cobertura de 1,92 W/(m².K), de modo que atendesse os valores de transmitância propostos pela NBR 15.575 para zonas frias. Entendendo o edifício como um sistema no qual todos os componentes do envelope interferem-se entre si, foram trabalhadas duas situações iniciais: edifício isolado (paredes e cobertura isoladas) e edifício não isolado (paredes e cobertura não isoladas). A composição da cobertura está detalhada na Tabela 19, abaixo.

Tabela 19: Composição da cobertura

COBERTURA PRÉDIO MAIS ISOLADO				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)
Laje concreto	0,10	1,15		
Câmara de ar	<0,05	R=0,17		
Lã de rocha	0,08	0,045	236,75	0,43
Telha de fibrocimento	0,008	0,65		
COBERTURA PRÉDIO MENOS ISOLADO				
Camadas	e (m)	λ (W/(mK))	CT (kJ/m ² K)	U (W/m ² K)
Laje concreto	0,10	1,15		
Câmara de ar	<0,05	R=0,17		
Telha de fibrocimento	0,008	0,65	230,75	1,92

Materiais e composição dos fechamentos Sistema de condicionamento artificial

Para análise de consumo energético da edificação, o sistema de ar condicionado adotado foi um sistema de expansão direta, Split. As configurações do sistema foram realizadas no objeto HVAC: TemplateZone: PTHP do software EnergyPlus. O setpoint de temperatura adotado foi de 22° para aquecimento e 24° para resfriamento em consonância com a NBR 16.401 (27). O horário de funcionamento do sistema de condicionamento artificial foi considerado das 21h às 9h. O sistema de aquecimento tem coeficiente de performance (COP) 2,75 W/W e o sistema de refrigeração 3,00 W/W. Ambos os parâmetros foram configurados conforme o sugerido pelo RTQ-R (28).

Arquivo climático

Na ausência de um arquivo climático da cidade de Pelotas no início da pesquisa, a cidade de Camaquã foi escolhida para representar a zona bioclimática 2, por ser próxima à cidade de Pelotas e possuir características semelhantes (Tabelas 20 e 21). O arquivo climático de Camaquã foi desenvolvido por Maurício Roriz (ANTAC- GT Conforto e Energia) mediante dados registrados pelo Instituto Nacional de Meteorologia no período de 2001 a 2010 (29).

Tabela 20: Dados climáticos de Camaquã (29)

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

Tabela 21: Dados climáticos de Pelotas.

Médias	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
TBS média (°C)	23,2	23,0	21,7	18,5	15,1	12,4	12,3	13,4	14,9	17,5	19,6	22,0
UR média (%)	77,4	79,9	80,5	82,3	83,6	84,0	84,9	83,2	81,8	79,5	76,0	75,5
Velocidade média do vento (m/s)	3,9	3,6	3,2	3,0	2,7	2,8	3,0	3,2	4,0	4,2	4,2	4,0

Método de análise de resultados

A intensidade de uso de energia em kWh.ano foi a variável utilizada para a análise comparativa entre os dois casos analisados em cada uma das cinco abordagens.

ANÁLISE DE RESULTADOS

As Figuras 10 e 11, abaixo, ilustram os gráficos de consumo de energia por usos para aquecimento, resfriamento, iluminação e equipamentos do prédio mais isolado e menos isolado nas cinco diferentes abordagens em estudo.

Em ambos os casos, a abordagem 1 é a que apresenta um maior consumo energético, tanto para aquecimento como para refrigeração. Sendo essa edificação simulada para a zona bioclimática 2, a maior parte do consumo de energia é destinada para o aquecimento. O consumo de iluminação e equipamentos é o mesmo em ambos os casos, pois as configurações são exatamente iguais para todos eles. Por ser simulado para a zona bioclimática 2, o prédio mais isolado apresenta menor consumo para aquecimento, pois no inverno o maior isolamento faz com que seja mais difícil a perda do calor de dentro para fora da edificação. No prédio menos isolado, o calor é perdido com mais facilidade, fazendo com que seja usada mais energia para aquecimento. Tratando-se do consumo para refrigeração, o prédio menos isolado é o que apresenta menor consumo, pois com a diferença de temperatura entre interior e exterior no verão e o baixo isolamento faz com que o calor saia da edificação com maior facilidade.

Figura 10. Consumo energético por usos do prédio mais isolado.

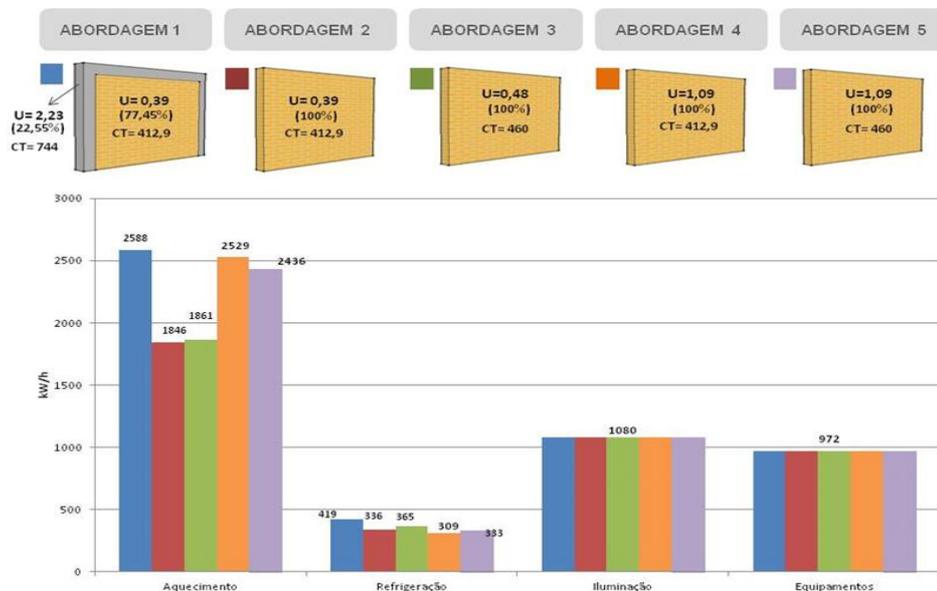
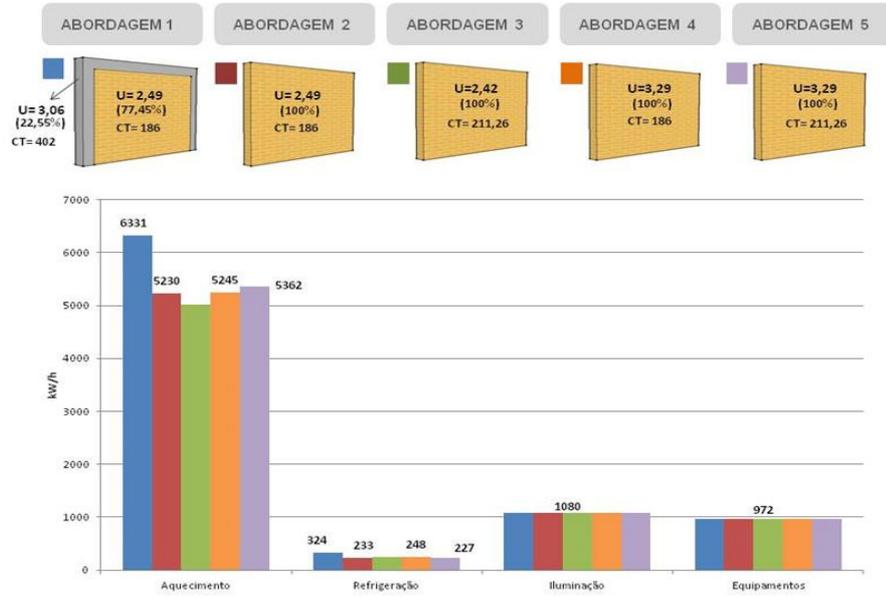


Figura 11. Consumo energético por usos do prédio menos isolado



As Figuras 12 e 13, abaixo, ilustram o consumo energético total do prédio com maior e menor transmitância térmica.

Figura 12. Consumo de energia total do prédio mais isolado

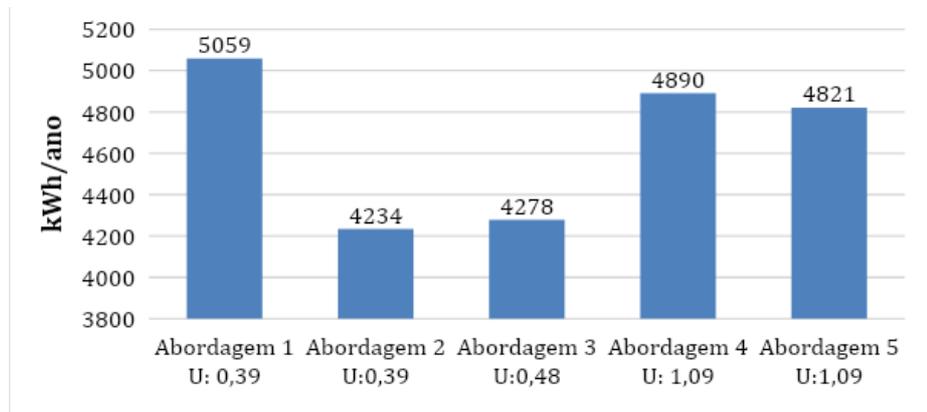
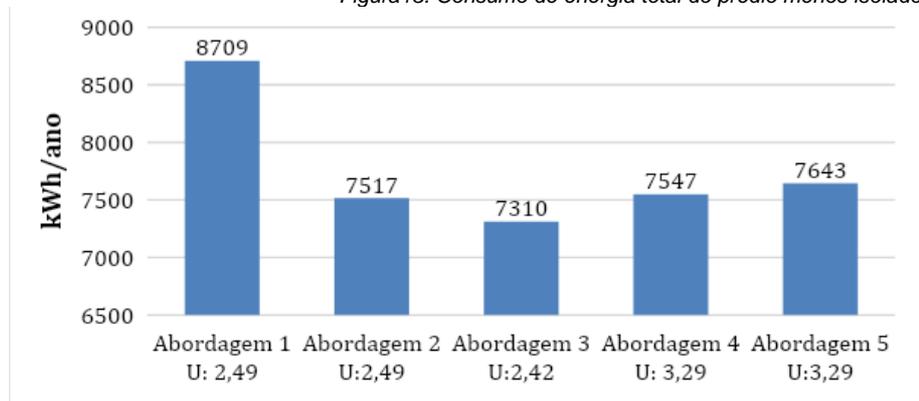


Figura 13. Consumo de energia total do prédio menos isolado



Os consumos energéticos totais mostram que existe diferença no consumo entre as cinco diferentes abordagens de modelagem que estão sendo analisadas. A abordagem 1, que considera uma separação do concreto da estrutura e das paredes de alvenaria da edificação na modelagem para a simulação computacional é a que apresenta um consumo de energia mais elevado. Se a abordagem 1 for comparada com as abordagens 4 e 5, que são as que consideram o cálculo de pontes térmicas pela normativa ISO 10.211, a utilização da abordagem 1 pode estar superestimando o consumo de energia na edificação, considerando que o software EnergyPlus não consegue calcular por si só o efeito das pontes térmicas em uma edificação. Para o prédio mais isolado, a diferença entre a abordagem 1 e entre as abordagens que consideram o cálculo de pontes térmicas pode chegar a 4%. Para o prédio menos isolado, essa diferença pode ser de até 13%. A abordagem 2, que considera o método tradicional utilizado para a simulação computacional, sem diferenciação de materiais nos fechamentos verticais e sem cálculo de pontes térmicas, apresenta menor consumo energético quando comparada às demais abordagens. Comparando a abordagem 2 com a abordagem 3, que não considera as pontes térmicas, mas faz uma ponderação entre as áreas de estrutura de concreto e paredes de alvenaria, é possível observar uma diferença de 3% no consumo energético quando o prédio é mais isolado e 1% quando o prédio é menos isolado. Neste caso a ponderação das áreas de estrutura e concreto não apresentou grandes diferenças nos resultados, porém se a abordagem 2 for comparada com as abordagens 4 e 5, que consideram o cálculo de pontes térmicas, as diferenças de consumo são de até 13% quando o prédio for mais isolado e de até 3% quando o prédio é menos isolado. Portanto, tanto a utilização da abordagem 2 quanto a da abordagem 3 podem subestimar o consumo energético de uma edificação.

As abordagens 4 e 5 são as que consideram os cálculos de pontes térmicas pela ISO 10.211 e somente diferem na consideração da capacidade térmica apenas da cerâmica (abordagem 4) e na ponderação da capacidade térmica entre cerâmica e concreto (abordagem 5). Tanto para o prédio mais isolado como para o menos isolado, as duas abordagens apresentaram pequenas diferenças quando comparadas entre si. No prédio mais isolado, a abordagem 4 sem ponderação de capacidade térmica é a que apresenta maior consumo, com uma diferença de 1% para abordagem 5. No prédio menos isolado, a abordagem 5, que pondera a capacidade térmica, apresentou o maior consumo, também com uma diferença de 1% quando comparada com a abordagem 4.

CONCLUSÃO

O estudo apresentou a influência de cinco tipos diferentes de modelagem para simulação computacional com a consideração ou não de pontes térmicas no consumo energético de uma edificação. Observa-se, portanto, a importância do cálculo de pontes térmicas e a importância da consideração na modelagem para simulação computacional, visto que os resultados mostraram que o tipo de modelagem utilizado na simulação computacional pode significar uma diferença de consumo energético de até 13% na edificação analisada. Ressalta-se também que, no âmbito do projeto de arquitetura, as pontes térmicas são tratadas, principalmente, com base no cuidado e no detalhamento dos encontros entre superfícies da edificação (paredes, lajes e sistema estrutural). Neste sentido é importante o cuidado com o detalhamento do projeto de arquitetura para que as pontes térmicas possam ser tratadas e resolvidas da melhor forma possível.

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

Ficou evidenciado também no estudo que as abordagens 4 e 5, que consideram as pontes térmicas por meio de cálculo da ISO 10211, são as que mais se aproximam da realidade, levando em consideração que a maior parte das edificações possui pontes térmicas nos seus fechamentos verticais, principalmente edificações mais isoladas onde foram observadas as maiores diferenças de consumo.

REFERÊNCIAS

1. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2017. 2018. [Accessed 08 April 2020]. Available from: <https://ben.epe.gov.br/>.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.220-3: desempenho térmico de edificações - Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. 2005. [Accessed 08 April 2020]. Available from: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=635>
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.575: Desempenho: Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos. parte 1: requisitos gerais. 2013. [Accessed 08 April 2020]. Available from: <https://www.abntcatalogo.com.br/curs.aspx?ID=157>
4. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10.211 - Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations. 2007. [Accessed 08 April 2020]. Available from: <https://www.iso.org/standard/65710.html>
5. PESSOA, João Henrique Marques. *Análise da influência das pontes térmicas nos edifícios residenciais*. [online]. Mestrado. UNL, 2011. Available from: <https://run.unl.pt/handle/10362/7037>
6. OLIVEIRA, Rui Felipe Pereira. *Construir segundo requisitos Passivhaus: Modelação de Pontes Térmicas*. [online]. Mestrado. UA, 2013. Available from: <https://ria.ua.pt/handle/10773/12904>
7. HAUPT, Wolfram. *Skript Feuchsteschutz*. Doutorado. KU, 2007.
8. CORREIA, Tiago Miguel Carrilho. *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. [online]. Mestrado. UNL, 2007. Available from: https://run.unl.pt/bitstream/10362/6722/1/Correia_2011.pdf
9. THICHELMANN, Karsten and OHL, Rudolf Müller. *Wärmebrücken Atlas*. Bauen im Bestand (German) Hardcover, 2005. ISBN 978-3-481-03230-2.
10. EVANS, John and DE SCHILLER, Silvia. Verificación de puentes térmicos normas para definir soluciones admisibles. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. 2010. Vol.14, no. 1, p. 51-58. Available from: <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/78060>
11. INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN. IRAM 11549: Aislamiento térmico de edificios. 2002. [Accessed 24 May 2020]. Available from:

- https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_calculo_transmitancia_termica.pdf
12. KIEßL, Kurt and SEDLBAUER, Klaus. Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung. *Weimarer Bauphysiktage*. 2002. Vol. 2, p. 13-16. Available from: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-69224.html>
 13. MARTIN, Koldobika, ERKOREKA, Aitor, FLORES, Ivan, ODRIOZOLA, Moises and SALA, Lizarraga. Problems in the calculation of thermal bridges in dynamic conditions. *Energy and Buildings* [online]. 2011. Vol. 43, no. 2-3, p. 529–535. [Accessed 24 May 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.10.018>
 14. LEVINSKYTĖ, Aurelija, BANIONIS, Karolis and GELEŽIŪNAS, Valdemaras. The Influence of Thermal Bridges for Buildings Energy Consumption of “A” Energy Efficiency Class. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering* [online]. 2016. Vol. 15, no. 2. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.15.2.15351>
 15. CUNHA, Eduardo Grala, VAUPEL, Karin and LÜKING, Rolf-Michael. Verificação da Formação de Mofo e Bolor em Superfícies Interiores de Paredes Exteriores Situadas na Zona Bioclimática 3 de Acordo com a NBR 15220 e PNBR 02.136.01. *7º Seminário Internacional Espaço Sustentável "Inovações em Edifícios e Cidades"*. 2008. [Accessed 24 May 2020]. Available from: <http://www.usp.br/nutau/CD/51.pdf>
 16. SEDLBAUER, Klaus. *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. [online]. Mestrado. IBP, 2001. [Accessed 08 April 2020]. Available from: https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/en/documents/ks_dissertation_etcm1021-30729.pdf
 17. GUERRA, Fernando Lamego, CUNHA, Eduardo Grala, SILVA, Antonio César S. B. and KNOP, Stífany. Análise das condições favoráveis à formação de bolor em edificação histórica de Pelotas, RS, Brasil. *Revista Ambiente Construído* [online]. 2012. Vol. 12, no. 4, p. 7-23. <http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212012000400002>
 18. RAVEN, Peter, EVERT, Ray and EICHHORN, Susan. *Biologia Vegetal*. 8. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan Ltda. Rio de Janeiro, 2014. ISBN 8527710455.
 19. CANEVA, Milena, NUGARI, Maria Pia and SALVADORI, Ornella. *La biología en la restauración*. Editorial Nerea, 2000. ISBN 9788489569485.
 20. GRUNEWALD, John, NICOLAI, Andreas. and ZHANG, Jianshun. On prediction of the mold fungus formation probability on critical building components in residential dwellings. *Proceedings of Clima 2007 Well Being Indoors - FINVAC, 2007*. [Accessed 28 April 2020]. Available from: https://www.researchgate.net/publication/228872423_On_prediction_of_the_mold_fungus_formation_probability_on_critical_building_components_in_residential_dwellings
 21. THEODOSIOU, Theodore and PAPADOPOULOS, Agis. The impact of thermal bridges on the energy demand of buildings with double brick wall constructions. *Energy and Buildings* [online]. 2008. Vol. 40, no. 11, p. 2083-2089. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.006>
 22. GE, Hua, MCKLUNG, Victoria and ZHANG, Shenshu. Impact of balcony thermal bridges on the overall thermal performance of multi-unit residential buildings: A case study. *Energy and Buildings* [online]. 2013. Vol. 60, p. 163-173. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.004>
 23. FRIESS, Wilhelm, RAKHSHAN, Kambiz, HENDAWI, Tamer and TAJERZADEH, Sahand. Wall insulation measures for residential villas in Dubai: A case study in energy efficiency. *Energy and Buildings* [online]. 2012. Vol. 44, p. 26-32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.005>
 24. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 14.683 - Thermal bridges in building construction — Linear thermal transmittance — simplified methods and default values. [online]. 2007. [Accessed 11 April 2020]. Available from: <https://www.iso.org/standard/65706.html>

25. DALBEM, Renata; KNOP, Stifany; CUNHA, Eduardo Grala, OLIVEIRA, R. F. P., Rodrigues, M. F. and VICENTE, R. Verification of the Passive House Concept to the South of Brazil Climate. *Journal of Civil Engineering and Architecture* [online]. 2016. Vol. 10, p. 937-945. <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2016.08.010>
26. ORDENES, Martín, PEDRINI, Aldomar, GHISI, EneDir and LAMBERTS, Roberto. Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulação no visual doe- 3.1. *Relatório de Pesquisa – LABEE, UFSC, Florianópolis*. 2013. [Accessed 24 May 2020]. Available from: <http://labeee.ufsc.br/node/266>
27. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16.401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. 2008. [Accessed 08 April 2020]. Available from: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=572>
28. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. RTQ-R. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais. 2010. [Accessed 24 May 2020]. Available from: <http://www.pbeedifica.com.br/etiquetagem/residencial/regulamentos>
29. RORIZ, Maurício. Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros com arquivos em formato de EPW (Energyplus Weather Data). 2012. [Accessed 24 May 2020]. Available from: http://www.roriz.eng.br/epw_9.html

Submetido: 21/10/2019
Aceito: 22/04/2020