

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DAS PONTES TÉRMICAS NA SIMULAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS PAREDES DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS

Julye Moura Ramalho de Freitas

Arquiteta e Urbanista

Mestranda Prograu – Universidade Federal de Pelotas, UFPel,
Rua Benjamin Constant, nº 1359, CEP 96010-020, Pelotas, RS, Brasil
E-mail: <juramalhof@hotmail.com>.

Rodrigo Karini Leitzke

Graduação em Ciência da Computação

Universidade Federal de Pelotas, UFPel,

Rua Gomes Carneiro, nº 1, CEP 96010-610, Pelotas, RS, Brasil
E-mail: <rodrigokarinileitzke@gmail.com>.

Beatriz Ichenique Gioielli

Graduação em Arquitetura e Urbanista

Universidade Federal de Pelotas, UFPel,

Rua Benjamin Constant, nº 1359, CEP 96010-020, Pelotas, RS, Brasil
E-mail: <beagioielli@gmail.com>.

Eduardo Grala da Cunha

Arquiteto e Urbanista

Doutorado em Arquitetura UFRGS

Universidade Federal de Pelotas, UFPel,

Rua Benjamin Constant, nº 1359, CEP 96010-020, Pelotas, RS, Brasil
E-mail: <eduardogralacunha@yahoo.com.br>.

RESUMO

Com o aumento considerável no consumo de energia elétrica, a busca por construções com menor impacto energético passou a ser essencial para que se consiga controlar o consumo de energia e ao mesmo tempo projetar edificações com alto conforto térmico. Pontes térmicas são pontos frágeis das edificações, onde a resistência térmica varia consideravelmente entre dois pontos distintos. O objetivo deste trabalho é analisar o impacto das pontes térmicas em fechamentos verticais de concreto armado no consumo de energia para edificações residenciais nas oito zonas bioclimáticas brasileiras. O método utilizado é caracterizado por simulações computacionais de casos distintos configurados com a presença e com a ausência de pontes térmicas. Os resultados obtidos mostram que na maior parte das zonas bioclimáticas, a presença de pontes térmicas na composição da parede colabora com a redução do consumo energético para aquecimento e resfriamento, e independente do nível de isolamento da parede, a absorvância solar é o fator mais impactante nos níveis de consumo energético.

Palavras-chave: Pontes térmicas. Simulação computacional. Eficiência energética. Edificações residenciais. *EnergyPlus*.

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo de forma desenfreada. As edificações representam hoje 48,5% do consumo de energia elétrica, sendo o setor residencial o maior consumidor, responsável por 24,9% deste, seguido do setor comercial 17% e do setor público 8% (BEN, 2015). Em uma edificação residencial, considerando uma média entre as regiões do país, os equipamentos de refrigeração são responsáveis por 27% do consumo; 24% é atribuído ao aquecimento de água; 20% ao ar condicionado; 14% à iluminação e 15,5% representam outros equipamentos. (LAMBERTS, 2014).

O primeiro passo para promover o uso de energia eficiente nas edificações é a avaliação do desempenho termoenergético. Por meio dessa avaliação pode-se verificar se a edificação está atendendo sua principal tarefa que é garantir a satisfação das necessidades dos usuários e se isso está acontecendo de maneira eficiente. Uma boa parte das edificações desperdiça grande parcela de energia para obtenção de conforto ambiental, por não incorporar em seus projetos os avanços da arquitetura bioclimática, materiais e técnicas construtivas adequadas.

No Brasil, as discussões e preocupações com eficiência energética só começaram a ganhar importância depois de 2001, com a grande crise no setor energético que obrigou o país a buscar medidas mais eficientes, junto à racionalização do consumo de energia elétrica. Em outubro de 2001, publicou-se a Lei 10295 (BRASIL, Lei n. 10.295) que definiu as políticas nacionais sobre conservação e uso racional de energia no país. Em 19 de dezembro de 2001 o decreto 4059, entrou em vigor para regular a Lei 10.295, e estabeleceu os níveis máximos de consumo de energia ou de eficiência energética mínima das máquinas e equipamentos produzidos ou comercializados no país, bem como os edifícios.

Em 2005, surgiram as primeiras normas de avaliação do desempenho térmico no país. A primeira foi a NBR 15220, a qual avalia o desempenho térmico de edificações de interesse social. Nesta mesma norma encontra-se o zoneamento bioclimático brasileiro, o qual estabelece diretrizes e estratégias bioclimáticas para as diferentes oito zonas do país. Em seguida, em 2008 foi publicada a primeira versão da NBR 15575, que avalia o desempenho de edificações residenciais e define

13 aspectos a serem considerados durante a análise do edifício residencial. Essa norma foi atualizada em 2013 quando efetivamente passou a vigorar.

A NBR 15220 (2005) já foi bastante contestada em pesquisas e trabalhos acadêmicos como na dissertação de Matos (2007) que observou, através de um processo de simulação computacional em habitações com o uso de ventilação natural, que a limitação do atraso térmico previsto na norma não se justificaria, em função de que todas as paredes com transmitância térmica dentro dos limites estabelecidos apresentam semelhança nos resultados de graus-hora para zona bioclimática 3.

Oliveira (2012), em sua dissertação de mestrado analisa os valores recomendados pela NBR 15220 (2005) para edificações de habitação social e chega a conclusão que as recomendações da norma, principalmente as que limitam o valor do atraso térmico de paredes em 4,3 horas, para a zona bioclimática 2, impedem a obtenção de melhores índices de conforto térmico na edificação. Os resultados obtidos através do processo de simulação computacional apontam que o aumento do atraso térmico dos fechamentos opacos é benéfico para a elevação destes índices. E também chega a resultados que concluem que valores de absorvância solar mais elevados produzem um percentual maior de conforto térmico nas habitações. Assim sendo, a limitação do fator de calor solar prevista na norma também se mostra contrária à obtenção de melhores índices de conforto na habitação.

A NBR 15575 (2008), posterior a NBR 15220 (2005), já utiliza alguns parâmetros diferentes para avaliação simplificada das edificações. A NBR 15575 (2008) utiliza a capacidade térmica e não o atraso térmico como limitador, mesmo critério do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, o RTQ-R (2009), que o usa como pré-requisito.

Nenhuma das duas normas apresenta qualquer consideração sobre pontes térmicas nos cálculos de transmitância térmica. A existência de pontes térmicas nas edificações pode promover o aumento das trocas de calor na envoltória, por serem pontos fracos, onde o fluxo de calor passa de maneira diferente e com mais facilidade. Isso conduz diretamente ao aumento do consumo energético.

Na esfera internacional, as consequências das pontes térmicas em edificações já são consi-

deradas, e, já existem normas que tratam desse tema. As normas suíças EN ISO 14683 e EN ISO 10211 determinam métodos detalhados para cálculos de pontes térmicas. As normas argentinas IRAM 11630 e IRAM 11605 determinam respectivamente procedimentos para avaliação dos riscos de condensação superficial e valores máximos de transmitância térmica em fechamentos opacos. A norma alemã DIN 4108 aborda assuntos como proteção contra umidade e possibilidade de formação de bolor, métodos de cálculo e orientações para construção. Ainda existe a Regulamentação Térmica Portuguesa (RCCTE) que apresenta métodos de cálculo de pontes térmicas simplificados.

1.1 PONTES TÉRMICAS

Ponte térmica é um termo que designa toda e qualquer zona da envolvente dos edifícios em que a resistência térmica é significativamente alterada em relação a zona corrente.

Pessoa (2011) diz que a envolvente de um edifício possui inúmeras zonas onde existem alterações no nível da geometria dos elementos construtivos, das propriedades dos materiais, como por exemplo, condutividade térmica, que afetam a direção do fluxo de calor e originam flu-

xos de calor bidimensionais ou tridimensionais. São essas zonas da envolvente que constituem as chamadas pontes térmicas (Fig 1).

Segunda a norma EN ISO 10211-1 (1995), as pontes térmicas caracterizam uma parte envolvente dos edifícios onde a resistência térmica é modificada por:

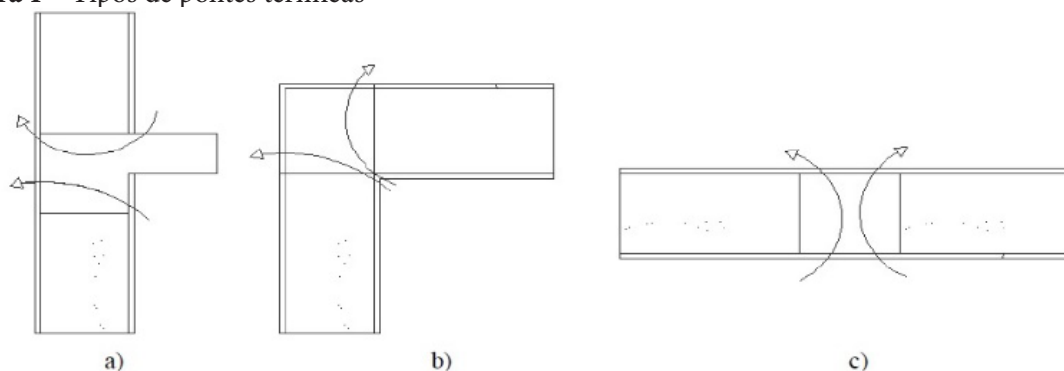
- ♦ Uma penetração total ou parcial da envolvente do edifício por materiais de condutividade térmica diferente;
- ♦ Uma mudança na espessura da estrutura;
- ♦ Uma diferença entre as estruturas externas e internas, como ocorre nas ligações parede/piso/teto.

Em todos esses casos o fluxo de calor procura o caminho no qual a resistência térmica seja menor. Sendo essa em função da distância entre pontos e da condutividade térmica do material.

Na figura 1 abaixo podemos observar três tipos diferentes de pontes térmicas que podem ocorrer nas edificações:

- a. Corte vertical de uma ponte térmica devido à ligação da fachada com a laje;
- b. E c) corte horizontal de uma ponte térmica devido a ligação entre duas paredes verticais com transmitâncias diferentes.

Figura 1 – Tipos de pontes térmicas

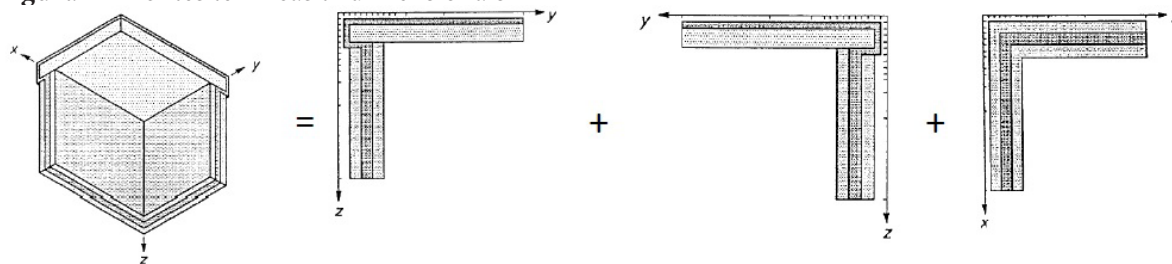


Fonte: Pessoa (2011).

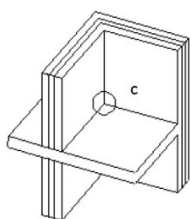
Se tratando do caminho percorrido pelo fluxo de calor, as pontes térmicas podem ser classificadas em três diferentes tipos: pontes térmicas tridimensionais, pontes térmicas bidimensionais e pontes térmicas pontuais.

As pontes térmicas bidimensionais são constituídas pela ligação de dois ou mais elementos construtivos e caracterizam-se por um coeficiente de transmissão térmica linear (W/m.K). As pontes térmicas tridimensionais (fig. 2) na maioria das vezes são resultado da união de duas pon-

tes térmicas bidimensionais, como por exemplo a zona dos vértices da envolvente (intersecção de dois elementos planos verticais e um horizontal). As pontes térmicas pontuais (fig.3) são aquelas cujo as três dimensões são da mesma ordem de grandeza, como por exemplo o vértice de união entre três elementos planos (duas paredes e um pavimento por exemplo).

Figura 2 – Pontes térmicas tridimensionais


Fonte: EN ISO 10211-2, 2001

Figura 3 – Ponte térmica Pontual


Fonte: EN ISO 10211-2, 2001

Em estudo realizado por Gioielli, Cunha e Ferrugem (2014), os quais analisaram o impacto de pontes térmicas em estruturas de concreto armado no desempenho energético de edifício hoteleiro para quatro zonas bioclimáticas brasileiras, foi comprovado que as pontes térmicas interferem no desempenho termoenergético dos edifícios. Os resultados mostram que para edificações de hotelaria com PAFT de 30% a 45% as pontes térmicas implicam em uma diminuição da estimativa de consumo, que dependendo da zona bioclimática pode chegar a 10%. No caso de 60% de PAFT a não consideração da ponte térmica pode representar um aumento de até 4% na estimativa de consumo dependendo da zona climática brasileira.

Gioielli, Cunha e Ferrugem (2014) afirmam que no âmbito internacional as consequências negativas das pontes térmicas são reconhecidas e já são utilizadas estratégias para sua correção. Além de servirem de caminho para as transmissões de calor e agravar as perdas térmicas as pontes térmicas também agravam a possibilidade de condensação superficial e a formação de fungos filamentosos. Segundo EVANS e SCHILLER (2010) as pontes térmicas favorecem a condensação superficial. A norma argentina IRAM 11.549 (2002) também ressalta que a ponte térmica ocasiona maior fluxo de calor originando condensação superficial. No mesmo contexto Haupt (2008) afirma que as pontes térmicas geram uma diminuição brusca da temperatura de superfícies podendo gerar condensação superficial.

A consequência direta da condensação superficial ocasionada pelas pontes térmicas é na maioria das vezes a formação de bolor. A umidade nas construções de acordo com Haupt (2008) tem três origens distintas: a umidade ascendente, a umidade da chuva e a difusão e convecção através de partes da construção. As pontes térmicas proporcionam a condensação da umidade nas superfícies dos fechamentos em decorrência da baixa temperatura da superfície estar menor do que a temperatura do ponto de orvalho.

De acordo com Kiessl e Sedlbauer (2001) a parte 2 da norma DIN 4108 contrariando a edição de 1981 aumentou os valores mínimos das resistências de paredes e telhados e conteve pela primeira vez exigências com relação a formação de bolor. A nova norma definiu como condição de crescimento do mofo a umidade relativa de 80% junto a superfícies interiores de paredes exteriores. Kiessl e Sedlbauer (2001) afirmam ainda que, a umidade é dada como a principal condição à formação de bolor. Quando a superfície da parede apresentar uma umidade superior ou igual a 80% por mais de 6 horas por dia poderá surgir mofo. A umidade relativa do ar ótima para o crescimento de mofo fica entre 90% e 98%. Ainda assim é comprovado que o fungo *xerophile* pode desenvolver-se com uma umidade relativa do ar na faixa de 65%. No que diz respeito às exigências com relação aos nutrientes foi comprovado que uma parede suja já é suficiente para o crescimento do bolor. Além do bolor a condensação superficial traz problemas patológicos nas superfícies contribuindo na degradação de revestimentos.

1.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Hensen e Lamberts (2011) afirmam que “simulação computacional é uma das mais poderosas ferramentas de análise no nosso mundo na atualidade – ela é utilizada para simular tudo,

desde jogos, crescimento econômico até problemas de engenharia” e que “... prever e analisar antecipadamente o comportamento futuro do edifício é muito mais eficiente e econômico do que resolver problemas quando o edifício está na fase de uso. “ Portanto, é possível dizer que a simulação que objetiva compreender e comprovar a eficácia de um sistema qualquer, para melhorar conforto térmico do ambiente existente, é a maneira mais barata e eficiente de determinar se o mesmo funciona. Isso ainda auxilia na escolha de determinada solução, considerando custos com energia, por exemplo.

A utilização de ferramentas computacionais pode ocorrer tanto na fase de projeto como durante a construção da edificação. A facilidade de manipulação das variáveis envolvidas na edificação, o baixo custo e a otimização do tempo, contribuem ainda mais para a utilização dos programas de simulação computacional. (MELO, 2007).

O Departamento de Energia (DOE) dos Estados Unidos da América possui o Diretório de Ferramentas de Programas Energéticos para Edificações, onde é possível acessar os 407 programas computacionais cadastrados e desenvolvidos em várias partes do mundo para avaliações de eficiência energética, energias renováveis e sustentabilidade nas edificações (Department Of Energy, 2012). Eles podem ser acessados através desse portal e apresentam uma descrição sucinta de cada um deles.

O programa DOE-2.1E, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos EUA para a ASHRAE, é uma ferramenta de apoio às normas por ela desenvolvidas. Tal software analisa o desempenho energético e as operações de custo de ciclo de vida de edificações. (Department Of Energy, 2012). Os criadores dos programas BLAST e DOE-2.1E desenvolveram um terceiro programa, o *EnergyPlus*, o qual une as potencialidades dos dois anteriores. Pereira (2015) diz que o *EnergyPlus* é um dos programas de simulação de edificações mais utilizados no mundo. Ele foi desenvolvido para estimar trocas térmicas, índices de iluminação e consumo energético de edifícios, a partir da modelagem física do edifício e seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento.

O programa *EnergyPlus* opera de acordo com as normas ASHRAE 90.1 (1999) e ASHRAE 140 (2004). Seu download pode ser feito gratuitamente pelo site do programa, junto com mais de dois mil arquivos climáticos de todo o mundo. Apesar de ser uma das ferramentas computacio-

nais de desempenho termoenergético com ampla aceitação pelos pesquisadores, ainda é considerada uma ferramenta pouco amigável.

O programa *DesignBuilder* surge como uma ferramenta gráfica para modelagem de edificações, que utiliza o programa *EnergyPlus* para a realização dos cálculos de simulações computacionais. Segundo Costa (2013), o programa *DesignBuilder* facilita a modelagem e configuração dos modelos, o que no *EnergyPlus* ocorre de maneira mais complexa.

Menezes (2005) afirma que o mais importante a ser considerado em programas de simulação são a precisão dos resultados e sua eficiência, já que nem sempre é possível conciliar a esses fatores uma redução de complexidade dos problemas. O autor faz uma descrição e análise de 8 diferentes softwares que avaliam desempenho térmico e uma exposição mais aprofundada do já mencionado *EnergyPlus*.

Os autores acima citados dão um apanhado geral no panorama brasileiro. É sabido que muitos outros recursos estão disponíveis no mercado, com desempenho superior, inferior e mesmo equivalente.

2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é verificar o impacto das pontes térmicas em paredes de edificações residenciais com estrutura de concreto armado nas 8 zonas bioclimáticas brasileiras, variando a transmitância térmica e a absorptância solar das paredes, comparando assim, o efeito das pontes térmicas em edificações com fechamentos mais e menos isolados e verificando também o impacto da cor da edificação neste contexto.

3 MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida em cinco etapas. Na primeira etapa foi definida a tipologia a ser estudada. Decidiu-se por uma edificação de quatro pavimentos e utilizou-se a configuração conforme recomenda o RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, observando as características de uso e ocupação, densidade de carga interna, indicadas na Tabela 1 - ar condicionado durante a noite e ventilação natural durante o dia.

Após a definição da tipologia, deu-se início a segunda etapa da pesquisa referente a modelagem e configuração da edificação e dos casos a serem simulados. Para tal foi utilizado o software *DesignBuilder* versão 3.1.0.036, considerando a presença e ausência de pontes térmicas na estrutura das paredes. Para modelagem com pontes térmicas, devido a limitação do programa utilizado, foi necessária uma adaptação do modelo utilizado, calculando paredes equivalentes conforme caracterizado a seguir.

Na terceira etapa, buscando otimizar o tempo necessário para as simulações e alterações dos parâmetros caso a caso, foi desenvolvido um trabalho de otimização das simulações, descrita no item 2.4.

Após a elaboração do modelo e a configuração dos casos através do programa *DesignBuilder*, deu-se início às simulações – quarta etapa da pesquisa. O edifício residencial foi simulado com distintas configurações. As alterações em cada caso foram: a espessura da parede (Tabela 4) - a fim de obter diferentes transmitâncias térmicas alcançadas a partir do cálculo da parede equivalente; e a absorvância solar, variando de uma cor clara a uma escura, fundamentado nos dados do RTQ-C (2010). Permaneceram inalteradas em todos os casos a densidade de iluminação e densidade de carga de equipamentos, referenciados pela norma NBR 16401 (ABNT, 2008) e pelo RTQ-C (2010).

Um total de 32 configurações foram simuladas para cada contexto climático das oito zonas bioclimáticas brasileiras, representadas pelas cidades: Curitiba, Santa Maria, Florianópolis, Brasília, Vitória da Conquista, Campo Grande, Cuiabá, Manaus.

A quinta e última etapa, foi a análise e discussão de resultados, visando entender o comportamento da edificação e a influência das pontes térmicas em edifícios residenciais.

3.1 DEFINIÇÕES DAS TIPOLOGIAS E CARACTERÍSTICAS DE USO E OCUPAÇÃO

Como citado anteriormente, a escolha da tipologia a ser estudada foi uma edificação de quatro pavimentos e de uso residencial, caracterizada nas tabelas a seguir. De modo a analisar a influência das pontes térmicas, para a simulação dos casos sem a presença das pontes térmicas escolheu-se um sistema autoportante de cerâmica e para o caso com a presença das pontes térmicas, um sistema de esqueleto estrutural de concreto armado. A fim de representar no primeiro caso a forma mais usual de modelagem computacional, desconsiderando o sistema estrutural, e no segundo caso, utilizar um sistema estrutural de maior impacto na composição dos fechamentos verticais.

Tabela 1 – Tipologia e uso

Dimensão		23m x 8,5m	
Número de pavimentos		4	
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 descansando	45	81
Sistema de ar condicionado (HVAC)		COP 3,00 (resfriamento) COP 2,75 (aquecimento)	

Fonte: RTQ-R

3.1.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Para que se pudesse avaliar o impacto da presença de pontes térmicas em edificações residenciais nas zonas bioclimáticas brasileiras, optou-se pela simulação computacional de um mes-

mo edifício com alterações de parâmetros nos materiais presentes nos fechamentos. Definiu-se diferentes valores de transmitância térmica e absorvância solar. Para transmitância foi utilizado um valor até o limite para zonas mais frias, estabelecido pela NBR 15575, as demais configura-

Tabela 2 – Ocupação do edifício

Horas	Dormitórios		Sala	
	Dia da Semana	Final de Semana	Dia da Semana	Final de Semana
1h - 7h	100%	100%	0%	0%
8h - 9h	0%	100%	0%	0%
10h	0%	50%	0%	0%
11h	0%	0%	0%	25%
12h	0%	0%	0%	75%
13h	0%	0%	0%	0%
14h	0%	0%	25%	75%
15h - 17h	0%	0%	25%	50%
18h	0%	0%	25%	25%
19h	0%	0%	100%	25%
20h	0%	0%	50%	50%
21h	50%	50%	50%	50%
22h-24h	100%	100%	0%	0%

Fonte: RTQ-R.

ções de transmitância buscaram resultados para prédios mais isolados. A variação de absorptância

solar também está nos valores estabelecidos pela norma. (Figura 4).

Figura 4 – Parâmetros para simulação

MODELOS DAS PAREDES SIMULADOS



Fonte: Autores.

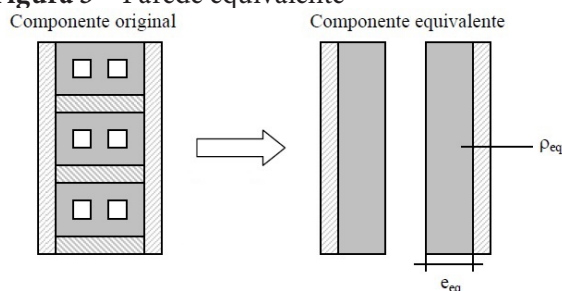
Como é possível observar na imagem acima, para paredes com pontes térmicas, existem diferentes valores de transmitância para a estrutura e para o fechamento. As normas NBR 152220 e NBR 15575 não especificam a necessidade de ponderação dessas transmitâncias para

simulação, portanto foram utilizados apenas as variações de transmitância dos fechamentos. Essa situação não ocorre nas paredes sem pontes térmicas, visto que é considerada, neste trabalho, uma parede homogênea.

3.1.2 DEFINIÇÃO DE PAREDE EQUIVALENTE

Para a definição das configurações da parede externa, é necessária a criação de uma parede equivalente com as mesmas propriedades de transmitâncias e capacidade térmica da parede real, considerando que o software *EnergyPlus* entende que os fechamentos são compostos por camadas homogêneas. No mundo real os fechamentos, principalmente de alvenaria cerâmica são formados por camadas heterogêneas. A transformação da parede real para a equivalente é exemplificada na imagem a baixo:

Figura 5 – Parede equivalente



Fonte: Ordenes, 2013.

$$R_{orig} = R_{eqv}$$

Equação 01: Resistência Parede equivalente

$$U_{orig} = U_{eqv}$$

Equação 02: Transmitância Parede equivalente

$$C_{orig} = C_{eqv}$$

$$C_{eqv} = (\rho \times e \times c)_{concreto} + (\rho \times e \times c)_{aglomerado}$$

Equação 03: Capacidade Térmica Parede equivalente

No modelo onde não há a presença de pontes térmicas, as paredes externas foram configuradas usando diretamente os valores de transmitância, resistência e capacidade térmica obtidos através do cálculo das paredes equivalentes. As propriedades desses materiais foram configuradas conforme a NBR 15220 e suas espessuras foram definidas com base no mesmo cálculo de equivalência, demonstrado na Figura 5. Para poder gerar a diferença de transmitância entre os casos, a espessura do tijolo cerâmico foi alterada para que o sistema parede tivesse a transmitância final desejada.

Nos modelos com pontes, houve uma maior complexidade em relação à modelagem compu-

tacional, já que o programa não reconhece fechamentos verticais heterogêneos ao utilizar os recursos básicos que esse oferece. No entanto, conseguiu-se simular o efeito do sistema estrutural de concreto armado e com isso, simular a presença de pontes que ocorrem nesse caso, quando a direção do fluxo térmico é alterada por condutividades térmicas diferentes presentes na envoltória. Para tanto, foi utilizado elementos nomeados *subsurfaces*, que permitem sobrepor elementos, no caso o concreto, às paredes externas, de modo a recriar o efeito de uma estrutura de concreto armado com fechamento em alvenaria. Por haver uma sobreposição de elementos, decidiu-se por configurar os fechamentos do modelo com base em um cálculo de equivalência (Equação 03) para que, apesar da sobreposição de materiais a transmitância térmica do sistema parede continuasse a mesma e a diferença de materiais fosse evidente para o programa. A parte que representa a alvenaria de fechamento aparece representada como uma *subsurface* de aglomerado sobreposta à parede de concreto. Foi escolhido um aglomerado de baixa transmitância externamente, a fim de evitar os efeitos do acúmulo de calor na estrutura externa do edifício.

3.2 OTIMIZAÇÃO E GERAÇÃO DOS CASOS

Para evitar a tarefa de configurar todos os casos manualmente a solução prática encontrada foi implementar um algoritmo, que dado um arquivo de entrada no formato idf – formato exportado pelo DesignBuilder – fosse possível gerar um total de 32 configurações para a análise, com suas respectivas modificações indicadas nas tabelas a seguir.

Tabela 3 – Configuração dos casos sem pontes térmicas

CASOS SEM PONTES TÉRMICAS					
	Transmitância Térmica	Espessura Total da Parede Equivalente	Espessura da Cerâmica	Densidade da Cerâmica	Absortância do Revestimento
Caso 01	2,49 W/m ² K	11 cm	0,026 m	457,31 Kg/m ³	0,2
Caso 02					0,4
Caso 03					0,6
Caso 04					0,8
Caso 05	2,26 W/m ² K	15 cm	0,03 m	396,34 Kg/m ³	0,2
Caso 06					0,4
Caso 07					0,6
Caso 08					0,8
Caso 09	2,08 W/m ² K	17 cm	0,04 m	297,25 Kg/m ³	0,2
Caso 10					0,4
Caso 11					0,6
Caso 12					0,8
Caso 13	1,92 W/m ² K	20 cm	0,06 m	198,17 Kg/m ³	0,2
Caso 14					0,4
Caso 15					0,6
Caso 16					0,8

Fonte: Autores

Tabela 4 – Configuração dos casos com pontes térmicas

CASOS COM PONTES TÉRMICAS				
	Transmitância	Espessura do Aglomerado	Densidade da Cerâmica	Absortância do Revestimento
Caso 17	2,49 W/m ² K	0,011 m	553,35 Kg/m ³	0,2
Caso 18				0,4
Caso 19				0,6
Caso 20				0,8
Caso 21	2,26 W/m ² K	0,015 m	405,79 Kg/m ³	0,2
Caso 22				0,4
Caso 23				0,6
Caso 24				0,8
Caso 25	2,08 W/m ² K	0,017 m	358,05 Kg/m ³	0,2
Caso 26				0,4
Caso 27				0,6
Caso 28				0,8
Caso 29	1,92 W/m ² K	0,020 m	304,34 Kg/m ³	0,2
Caso 30				0,4
Caso 31				0,6
Caso 32				0,8

Fonte: Autores.

3.2.1 IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO

Devido à dificuldade em criar casos para simulação modificando as propriedades propostas pelas definições do trabalho de forma manual, o uso de algoritmos foi a estratégia adotada para reduzir o tempo de trabalho e garantir com confiabilidade a mudança dos parâmetros necessários para simulação. Para realização das mudanças, a linguagem de programação Python foi adotada, linguagem essa que possui versatilidade, conceitos favoráveis a pequenas implementações e comportamento muito funcional em pesquisas científicas em um âmbito geral (COELHO, 2007).

Tendo conhecimento da localidade das informações que precisam ser alteradas, é acionado o método *replace* (PRZYWÓSKI, 2015), presente na biblioteca padrão da linguagem de programação Python. Inicializado dentro da execução, o método *replace* recebe como parâmetros os dados originais do material que precisam ser modificados, e os valores que serão atualizados, sua função é substituir o segundo parâmetro (dado novo) pelo valor original (dado original). Desta forma, é possível atualizar qualquer propriedade que proporcione uma alteração necessária para análise de maneira prática e em tempo reduzido se comparado a alterações manuais (sem auxílio computacional).

Para as demais mudanças envolvendo o algoritmo utilizado, a biblioteca Eppy proposta por SANTOSH (2013) busca facilitar o processo de edição do arquivo obtido como saída do DesignBuilder contendo métodos que diminuem o tempo de implementação, facilitando o processo de edição.

A complexidade computacional do algoritmo implementado é $O(n)$ conforme estudo de CORMEN (1990), visto que apenas uma busca é realizada pelo arquivo de entrada independentemente do tamanho da entrada em questão.

3.3 OTIMIZAÇÃO E PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Devido a necessidade de simular os 32 casos com e sem a presença de pontes térmicas na composição da parede, para as 8 zonas bioclimáticas, que totalizariam 256 simulações, foi otimizado o processo.

A primeira etapa dessa otimização se deu através da conversão do arquivo idf da versão 7.2, exportado pelo DesignBuilder (já alterado pelo algoritmo, em cada caso), para versão 8.3 do Ener-

gyPlus. Com isso, o tempo das simulações foi reduzido consideravelmente em virtude das melhorias encontradas na versão 8.3 do software, juntamente com a opção de simulação em grupo encontrada no EPLaunch – ferramenta gráfica de suporte ao EnergyPlus. Através desta ferramenta, foi possível simular um grupo de casos para as oito zonas bioclimáticas brasileiras, explorando paralelamente o melhor desempenho da máquina em questão, com a utilização de conceitos de OpenMP que busca aproveitar o melhor desempenho possível para um processador com diferentes núcleos conforme descrito por CHANDRA (2001).

4 ANÁLISES DE RESULTADOS

O processo de análise dos resultados obtidos foi desenvolvido através de comparações das edificações com e sem a presença de pontes térmicas na composição da parede. Para estas comparações foram considerados, segundo o RTQ-R (2010) – Regulamento Técnico de Qualidade para edificações residenciais – os mesmos valores para uso e ocupação, equipamentos, iluminação e densidade foram utilizados.

Em ambas as edificações simuladas, o valor encontrado para o consumo de energia em iluminação de todos os casos foi de 5487,1 kWh/ano e para equipamentos o valor consumido foi de 4198,2 kWh/ano. Embora os valores de consumo em iluminação e equipamento apresentados sejam expressivos dentro do consumo de energia da edificação, por apresentarem valores constantes em todos os casos simulados, esses dados não foram considerados nas comparações apresentadas a seguir.

4.1 ZONAS BIOCLIMÁTICAS 1 E 2

A análise envolvendo as zonas bioclimáticas brasileiras 1 e 2, zonas que possuem temperaturas mais baixas no inverno, apresenta um comportamento relacionado ao consumo de energia muito semelhante em ambos os casos, representados neste trabalho pela zona bioclimática 2 (Figura 1). Na maior parte dos casos, edificações sem a presença de pontes térmicas na composição da parede apresentam um consumo total de energia, considerando aquecimento e resfriamento, menor quando comparado as edificações com a presença de pontes térmicas. Consideran-

do o gasto de energia com aquecimento, os casos sem a presença das pontes térmicas seguem mais econômicos. No caso mais extremo há uma diferença de 58% no consumo de energia entre casos com e sem pontes na zona bioclimática 2. Para avaliação do resfriamento ocorre o contrário, a maior parte dos casos com a presença de pontes térmicas possuem um consumo menor, apresentando uma diferença de até 67% no caso mais extremo na zona bioclimática 2. Esse valor elevado é compensado pela grande diferença no consumo de aquecimento entre todos os casos.

Pode-se observar também que em todos os casos, independentemente do nível de isolamento, quando a absorvância solar é menor o consumo energético é menor e vai subindo gradativamente conforme o aumento da absorvância. Em uma média de todos os casos simulados na zona bioclimática 2, edificações sem a presença de pontes térmicas podem representar 13% de redução no consumo de energia total de uma edificação residencial nesta zona.

4.2 ZONA BIOCLIMÁTICA 3

A análise da zona bioclimática 3, apresenta um comportamento distinto, diferentemente das situações analisadas nas zonas bioclimáticas 1 e 2. Na maioria dos casos, edifícios com a presença de pontes térmicas na composição da parede apresentam um consumo menor de energia, considerando aquecimento e resfriamento, se comparado aos casos sem a presença de pontes térmicas, exceto para quando a absorvância solar apresenta o seu menor valor (figura 7). Para avaliação do consumo com aquecimento, o mesmo padrão discutido nas zonas bioclimáticas 1 e 2, onde os casos sem a presença das pontes consomem menos energia, proporcionando uma economia de até 75% no caso mais extremo. Com relação ao resfriamento, os casos com a presença de pontes são mais econômicos, apresentando 59% de economia no consumo de energia.

A absorvância solar continua sendo um parâmetro relevante no consumo de energia, em todos os casos com menor absorvância, independente de nível de isolamento, o consumo de energia é menor. Na média de todos os casos simulados para a zona 3, as edificações simuladas com a presença de pontes térmicas na composição da parede, apresentam 7% de redução no consumo de energia em relação aos casos sem a presença de pontes térmicas, nesta zona.

4.3 ZONA BIOCLIMÁTICA 4

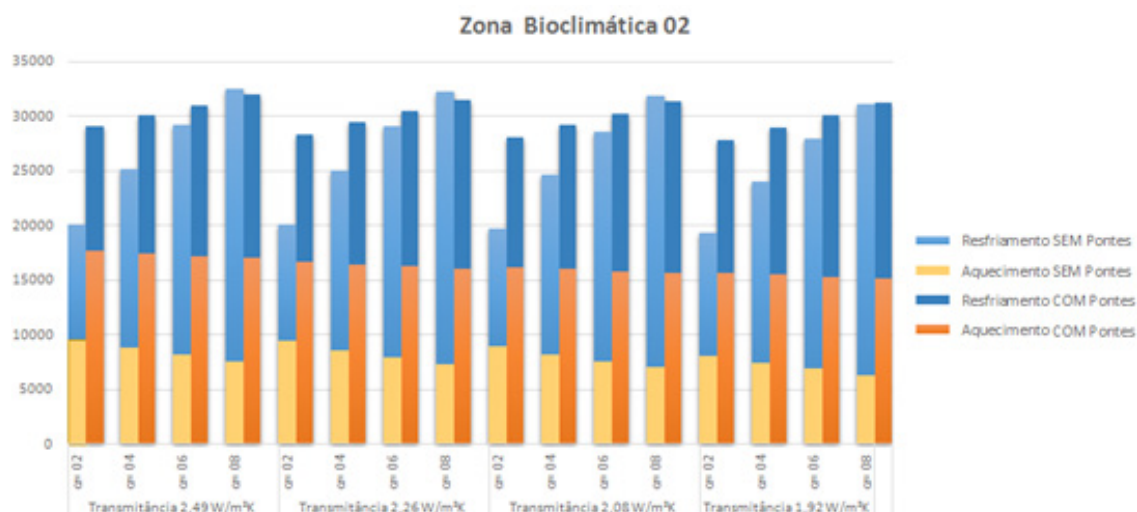
A análise da zona bioclimática 4 apresenta um comportamento único. Em todos os casos com a presença pontes térmicas, independentemente do valor de absorvância solar e isolamento, apresentam um consumo menor de energia, considerando aquecimento e resfriamento, quando comparados aos casos sem a presença de pontes térmicas (Figura 8). Para aquecimento os casos com a presença de pontes térmicas, apresentam um valor com pequena representação no consumo total de energia, já para resfriamento os casos com a presença de pontes térmicas apresentam um consumo menor de energia, resultando em uma diferença de até 49% de consumo no caso mais extremo.

Tanto para os casos com presença de pontes térmicas como para os casos sem presença de pontes térmicas, a absorvância com menor valor apresenta um consumo menor de energia, independente do isolamento configurado. Em uma média de todos os casos simulados edificações com a presença de pontes térmicas podem representar 25% de redução no consumo de energia.

4.4 ZONAS BIOCLIMÁTICAS 5 E 6

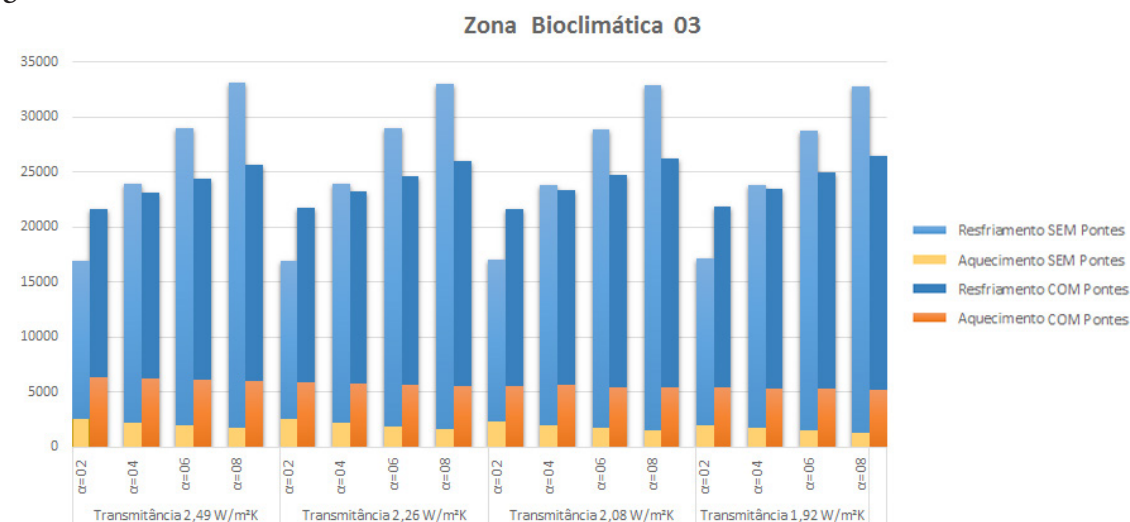
Como análise das zonas bioclimáticas 5 e 6, que apresentam temperaturas mais elevadas no ano inteiro, o comportamento encontrado é semelhante em ambos os casos, sendo representando neste trabalho pela zona bioclimática 5. De modo geral, considerando o consumo de energia para aquecimento e para resfriamento, os casos com a presença de pontes térmicas na composição da parede apresentam menor consumo, exceto nos casos em que a absorvância solar possui os menores valores (Figura 9). O consumo para aquecimento nos casos sem a presença de pontes térmicas é menor quando comparado aos casos com a presença das pontes. Em ambas as zonas os consumos de energia avaliando o aquecimento não apresentam valores significativos considerando o total de energia consumidos na edificação. Já o consumo de energia para resfriamento é menor nos casos com a presença de pontes térmicas, comparado com os casos sem a presença de pontes, apresentando uma diferença de até 59% de consumo de energia no caso com a diferença mais extrema.

Figura 6 – Zona Bioclimática 2



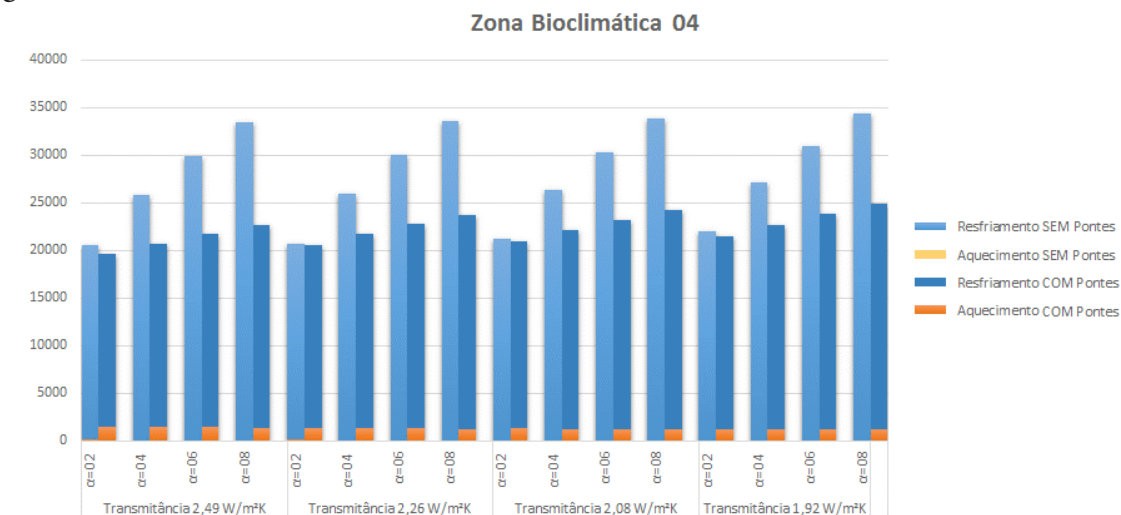
Fonte: Autores.

Figura 7 – Zona Bioclimática 3



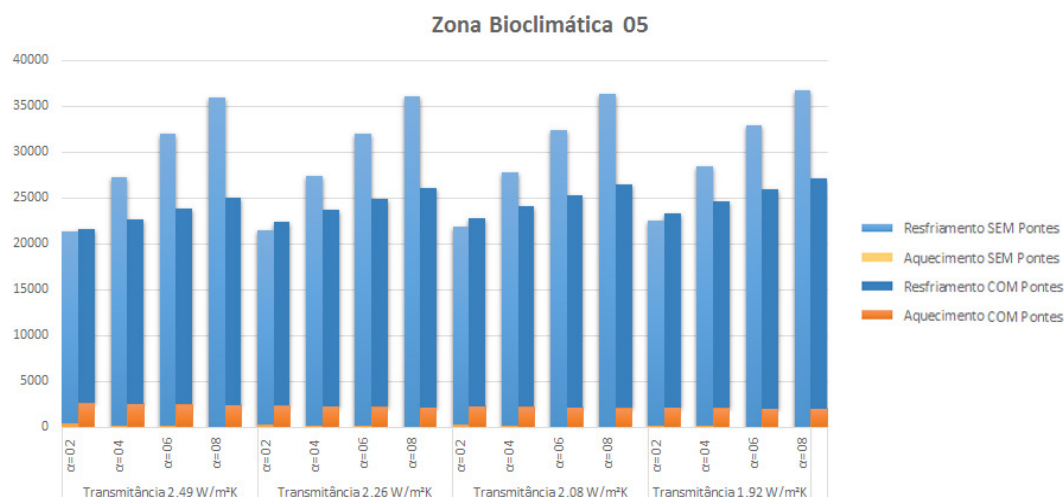
Fonte: Autores.

Figura 8 – Zona bioclimática 4



Fonte: Autores.

Figura 9 – Zona bioclimática 5



Fonte: Autores.

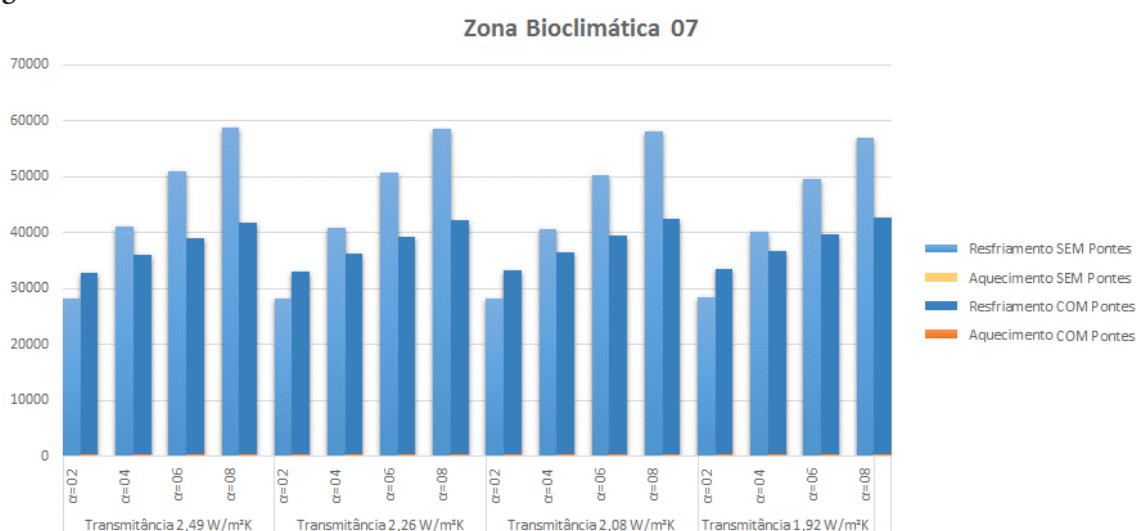
Para todos os níveis de isolamento, a menor absorptância solar apresenta um menor consumo de energia. Analisando apenas a zona bioclimática 5, em todos os casos simulados a presença de pontes térmicas representou 21% de redução no consumo total de energia.

4.5 ZONAS BIOCLIMÁTICAS 7 E 8

Para a análise das zonas bioclimáticas 7 e 8 – zonas bioclimáticas brasileiras que possuem temperaturas elevadas em todo ano – foi possível identificar um padrão no consumo de energia em todos os casos, sendo representado neste item pela zona bioclimática 7 (fig. 10). O consu-

mo de energia para aquecimento e resfriamento nos casos com a presença de pontes térmicas na composição da parede apresentou valores menores, se comparado com os casos sem a presença de pontes térmicas, exceto nos casos com a menor absorptância solar (como visto anteriormente nas zonas bioclimáticas 3, 5 e 6). O consumo de energia para aquecimento na zona bioclimática 7 é praticamente nulo, como é possível observar no gráfico abaixo. Já para zona bioclimática 8, o consumo com aquecimento não apresenta valores, sendo em ambos o consumo com resfriamento maior na maioria dos casos sem a presença de pontes térmicas, chegando a uma diferença de até 42% de diferença no caso mais extremo.

Figura 10 – Zona bioclimática 7



Fonte: Autores.

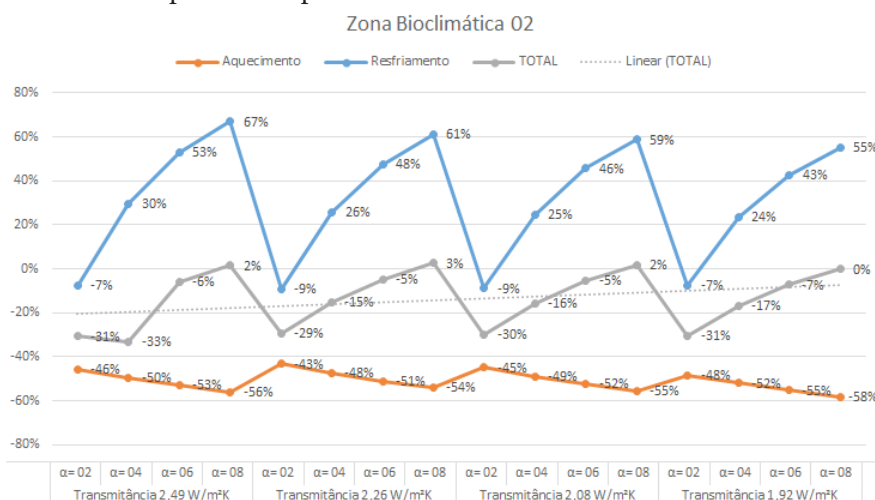
Como em todas as outras zonas a edificação com a absorção solar mais baixa é a que menos consome energia. Considerando a média de todos os casos simulados para zona 7, edificações com a presença de pontes térmicas podem representar 17% de redução de consumo.

4.6 PERCENTUAL DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS OITO ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

Para concluir a análise, este item busca apresentar uma relação geral em percentual das informações discutidas anteriormente.

4.6.1 ZONAS BIOCLIMÁTICAS 1 E 2

Figura 11 – Resultados em percentual para zona bioclimática 2

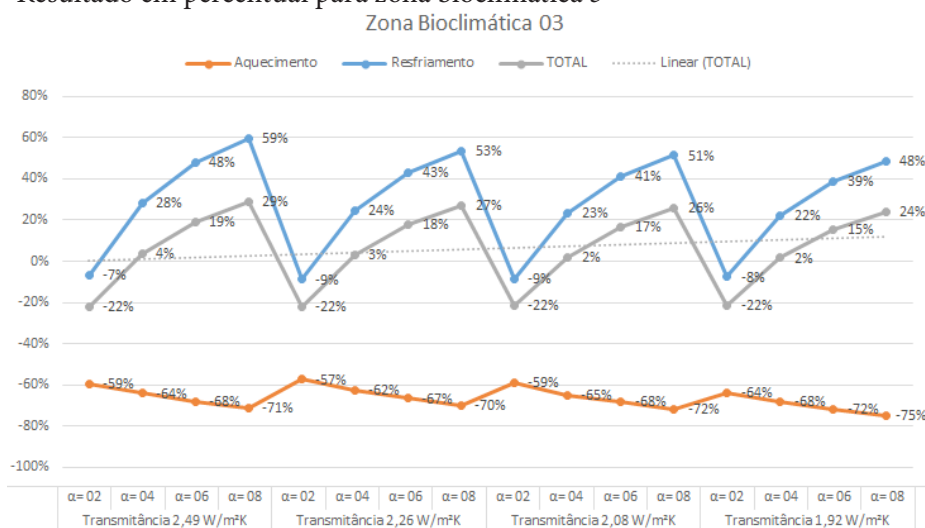


Fonte: Autores.

De acordo com a figura 11, é possível perceber o comportamento percentual das zonas bioclimáticas 1 e 2 discutidas no item 4.1 deste trabalho.

4.6.2 ZONA BIOCLIMÁTICA 3

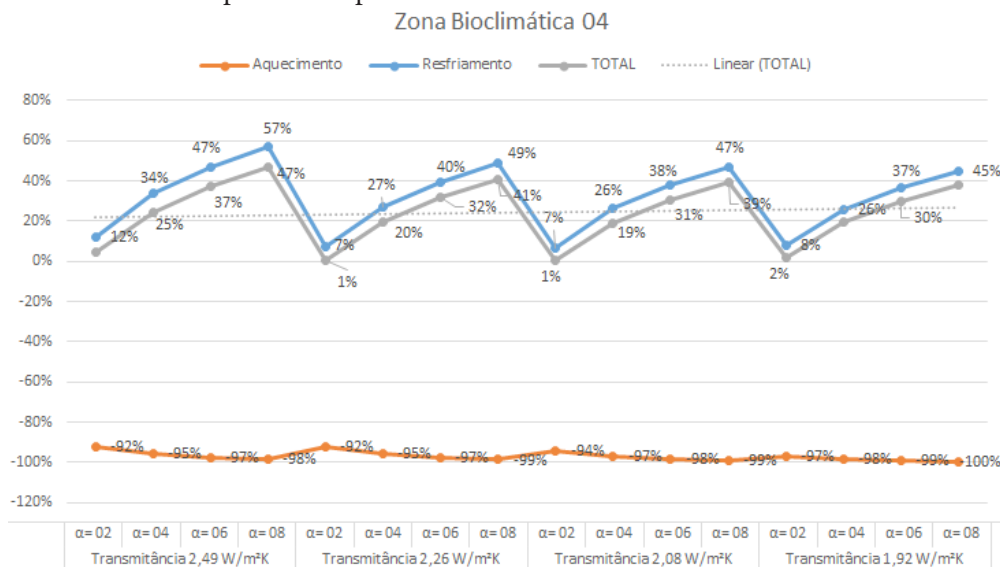
Figura 12 – Resultado em percentual para zona bioclimática 3



Fonte: Autores.

4.6.3 ZONA BIOCLIMÁTICA 4

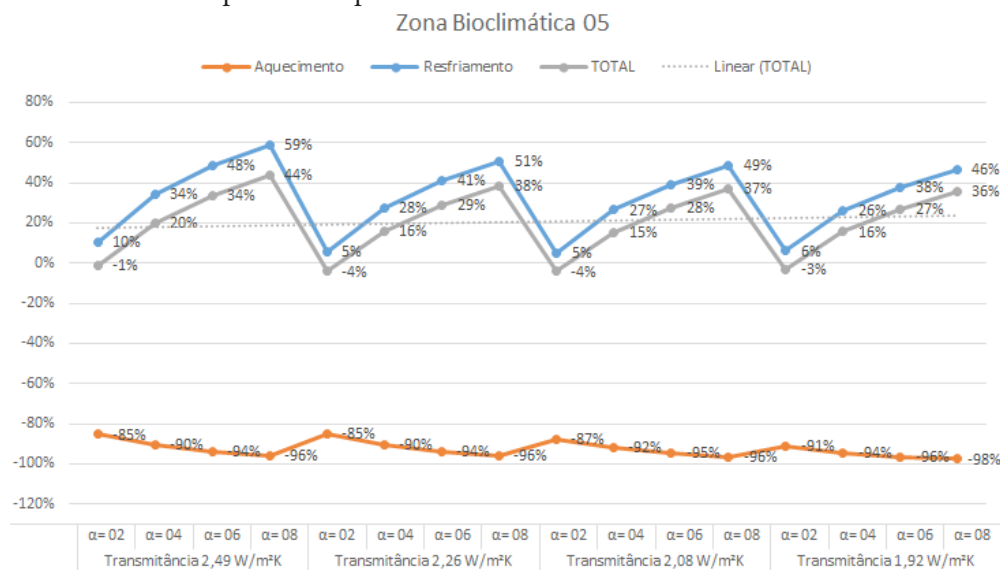
Figura 13 – Resultado em percentual para zona bioclimática 4



Fonte: Autores.

4.6.4 ZONA BIOCLIMÁTICA 5 E 6

Figura 14 – Resultado em percentual para zona bioclimática 5

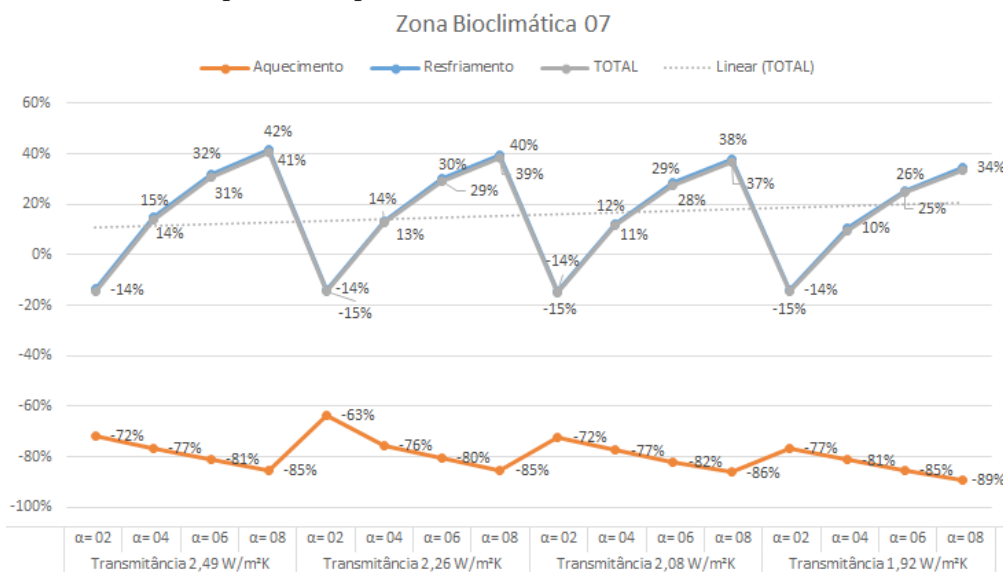


Fonte: Autores.

De acordo com a figura 14, é possível perceber o comportamento percentual das zonas bioclimáticas 5 e 6 discutidas no item 4.4 deste trabalho.

4.6.5 ZONA BIOCLIMÁTICA 7 E 8

Figura 14 – Resultado em percentual para zona bioclimática 7



Fonte: Autores.

5 CONCLUSÕES

Considerando os resultados apresentados o objetivo do presente trabalho foi alcançado ao verificar o impacto das pontes térmicas em edificações residenciais. Comparando o efeito da presença de pontes térmicas em edificações com fechamentos mais e menos isolados e diferentes absorvâncias, verificou-se que a cor é a principal influência na alteração do consumo de energia.

A elaboração deste trabalho contribuiu para ressaltar a importância da discussão envolvendo a presença das pontes térmicas na composição da estrutura da parede. De acordo com os resultados apresentados, para zonas bioclimáticas brasileiras iniciais (1 e 2) – zonas que possuem um clima frio no inverno – é possível observar um superdimensionamento relacionado ao consumo de energia, visto que a presença das pontes térmicas nas edificações residências testadas nessas regiões apresentam um maior consumo energético quando comparadas as edificações sem a presença das pontes térmicas. Considerando o restante das zonas bioclimáticas brasileiras, com a presença de pontes térmicas nos fechamentos verticais, é possível observar um subdimensionamento com relação ao consumo de energia, visto que edifícios que apresentam pontes térmicas na sua composição possuem um consumo de energia menor.

5.1 DISCUSSÕES GERADAS

Frente os problemas das pontes térmicas e a não inclusão das mesmas na modelagem do edifício, trazemos a discussão da inclusão do sistema estrutural nas modelagens computacionais. Essa avaliação final pode ser compreendida com base em duas possibilidades: incluir o sistema estrutural diretamente na modelagem, ou considerar a estrutura no cálculo de transmitância da parede equivalente.

Embora o RTQ-R recomende que em fechamentos heterogêneos seja feita uma ponderação no cálculo da transmitância, não há discussão sobre a estrutura em relação ao item simulação. Não está claro se durante a simulação deve-se utilizar a transmitância apenas do fechamento ou realizar uma ponderação entre fechamento e estrutura no cálculo.

No ponto de vista da simulação, não é comum a modelagem do sistema estrutural, contudo os resultados demonstraram uma grande diferença de consumo quando a mesma edificação é simulada considerando a sua estrutura. Entra aqui a discussão da necessidade de acrescentar os elementos que representem essa estrutura, como no caso do presente trabalho: as *subsurfaces*; ou o cálculo de uma transmitância que pondere o fechamento e a estrutura. Os resultados demonstram que, trabalhar sem a modelagem da estrutura nos fechamentos verticais, poderá gerar diferenças consideráveis nos resultados do consumo energético.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15220-3: desempenho térmico de edificações - Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social*. Rio de Janeiro. 2005.
- _____. *NBR 15575: Desempenho de edifícios de até cinco pavimentos: parte 1: requisitos gerais*. Rio de Janeiro, 2008.
- BEN 2014 – *Balanco Energético Nacional 2015*. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: maio 2016.
- CHANDRA, J.; SIMON, B.; RAVI, D.; CHANDRAN, P. Parallelizing SystemC Kernel for Fast Hardware Simulation on SMP Machines. *23rd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation*. 2009.
- COELHO, Flavio Codeço. *Computação Científica com Python*. Disponível em: <https://ccpcode.googlecode.com/hg/Text_src/_build/latex/LivroPython.pdf>. Acesso em: mar. 2016.
- SANTOSH, Philip. *Eppy 0.5.1 Documentation*. Disponível em: <<http://pythonhosted.org/eppy/>>. Acesso em: nov. 2015.
- PRZYWÓSKI, Jakub. *Replace Method Documentation*. Disponível em: <<http://python-reference.readthedocs.org/en/latest/docs/str/replace.html>>. Acesso em: out. 2015.
- COSTA, Manuel Francisco. *Aplicação do DesignBuilder à avaliação de soluções de aquecimento e arrefecimento de edifícios para diferentes zonas portuguesas*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Universidade do Porto. Portugal.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NÖRMUNG. *DIN 4108 – Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden. Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz, Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Alemanha, 2001.
- EVANS, John M.; DE SCHILLER, Silvia. *Verificación de puentes térmicos normas para definir soluciones admisibles*. 2010. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v.14 p. 51-58.
- GIOIELLI, B; ALMEIDA, A; CUNHA, E; FERRUGEM, A. Estudo do Efeito de Pontes Térmicas em Estruturas de Concreto Armado no Desempenho Energético de Edifício Hoteleiro Para 4 Zonas Bioclimáticas Brasileiras. *XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais do evento*. Alagoas, 2015.
- HENSEN, Jan L. M., LAMBERTS, Roberto. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Abingdon: Spon Press, 2011.
- HAUPT, Wolfram. *Skript Feuchsteschutz*. Kassel Universität, Kassel, 2008.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 14683 - Thermal bridges in building construction — Linear thermal transmittance — simplified methods and default values*. Suíça: ISO, 2007.
- _____. *ISO 10211 - Thermal bridges in building construction — Heat flows and surface temperatures — Detailed calculations*. Suíça: ISO, 2007.
- INMETRO - Instituto Nacional de Meteorologia, Normalização e Qualidade Industrial. *RTQ-R. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais*. Eletrobrás, 2012.
- INSTITUTO ARGENTINO DE NORMALIZACIÓN. *IRAM 11549. Aislamiento térmico de edificios*. Argentina: IRAM. 2002.
- _____. *IRAM 11605 – Condicionamento Térmico de Edifícios – Condições de Habitabilidade nos Edifícios – Valores máximos de transmitância térmica em fechamentos opacos*. Argentina: IRAM. 1996.
- MELO, A.P.; WESTPHAL, F.S.; MATOS, M.. *Apostila do Curso Básico do Programa Energy Plus*. Florianópolis, 2009. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4202_Apostila_EnergyPlus_0.pdf>. Acesso em: nov. 2015.
- MME – Ministério de Minas e Energia. *Plano Nacional de Energia 2030*. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/>>. Acesso em: nov. 2015.
- MENEZES, Milton Serpa. *Avaliação do Desempenho Térmico de Habitações Sociais de Passo Fundo – RS*. Passo Fundo, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo.
- PEREIRA, C; GHISI, E. Calibração de um Modelo Computacional de uma Residência Unifamiliar Localizada em Florianópolis- *XIII Encontro nacional e IX Encontro Latino Americano de Conforto do Ambiente Construído*. Anais do evento. 2015.
- PESSOA, Júlio Henrique Marques. *Análise da influência das pontes térmicas nos edifícios residenciais*. Dissertação de Mestrado. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 2011.
- KIEßL, Kurt, SEDLBAUER, Klaus. *Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung*. 2001, Weimar.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. *Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulação no visualdoe- 3.1*. Relatório de Pesquisa. Florianópolis, 2013.

VALÉRIO, Jorge Gustavo Marques Alfaface Pereira. *Avaliação do Impacte das Pontes Térmicas no Desempenho Térmico e Energético de Edifícios Residenciais Correntes*. Dissertação de mestrado. Instituto Técnico de Lisboa. 2007.

Analysis of the influence of thermal bridges impact in the computer simulation of energy efficiency in residential buildings

ABSTRACT

With the considerable increase in electric power consumption, the search for buildings with lower energy impact has become essential to be able to control energy consumption and at the same time designing buildings with high thermal comfort. Thermal bridges are weak points of buildings where the thermal resistance varies considerably between two distinct points. Depending on the situation, the existence of thermal bridges in a building can be favorable to the achievement of the expected thermal comfort and lower energy consumption. The objective of this paper is to analyze the impact of thermal bridges of reinforced concrete structure regarding to energy consumption for residential buildings in the Brazilian bioclimatic zones. The method used is characterized by computer simulations of distinct cases configured with and without thermal bridges. The results show that in most of the bioclimatic zones, the presence of thermal bridges in the wall composition contributes to the reduction of energy consumption for heating and cooling, and independent of the wall's insulation level, solar absorptance is a major factor in the energy consumption levels, walls with smaller absorptance consume less and this consumption increases gradually with increasing absorptance.

Keywords: Thermal bridges. Computer simulation. Energy efficiency. Residential buildings. EnergyPlus.