

ESTUDO DO EFEITO DE PONTES TÉRMICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFÍCIO HOTELEIRO PARA 4 ZONAS BIOCLIMÁTICAS BRASILEIRAS

GIOIELLI, Beatriz Echenique (1), ALMEIDA, André Basso de (2), CUNHA, Eduardo Graia da (1) e FERRUGEM, Anderson Priebe (2).

(1) Laboratório de Conforto e Eficiência Energética, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Brasil.
beagioielli@gmail.com

(2) Engenharia da Computação, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

RESUMO

O objetivo principal do artigo é apresentar a análise da influência das pontes térmicas de sistemas estruturais em concreto armado no desempenho energético da envoltória de um edifício comercial localizado nas zonas bioclimáticas brasileiras de 1 a 4 utilizando simulação computacional. O método utilizado para alcançar o objetivo é caracterizado pelas seguintes etapas: 1) Definição e configuração do caso base; 2) Definição e configuração do modelo de referência; 3) otimização das simulações e 4) Simulação e comparação do consumo do caso base e do modelo de referência. Como principais resultados observou-se que as pontes térmicas de concreto armado interferem no desempenho energético da edificação e o impacto relaciona-se ao percentual de abertura transparente τ_{paft0} da edificação. 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.

Palavras-chave: Ponte térmica; Desempenho Energético; Eficiência Energética.

ABSTRACT

The main objective of this paper is to analyze the influence of thermal bridges in reinforced concrete structural system in thermo energetic performance of a hotel building located in the Brazilian bioclimatic zones 1 to 4 using computer

simulation. The method applied to achieve the goal is characterized by the following steps: 1) definition and configuration the base case; 2) Definition and configuration of the reference model; 3) optimization of computational simulations and 4) Simulation and comparison of the annual energetic consume of the base case and the reference model. As main results showed that thermal bridges in reinforced concrete impact is related with the window-to-wall ratio (WWR) of the building. For buildings with 30% and 45% WWR, thermal bridges imply a decrease in the estimated consumption, which, depending on the climatic zone, can reach 10%. In the case of 60% WWR not considering the thermal bridge can represent up to 4 % of estimated consumption depending on the Brazilian bioclimatic zone.

Keywords: Thermal Bridge; Energy Performance; Energy Efficiency.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil as novas normas de desempenho e eficiência energética são recentes, e ainda não impactam a vida dos brasileiros de forma incisiva. Convivemos ainda, em alguns casos, com técnicas e sistemas construtivos inadequados para os diferentes contextos climáticos encontrados no país, gerando muitas vezes um baixo nível de conforto térmico para os usuários. O aumento do poder de compra do brasileiro nos últimos anos aliado a soluções construtivas inadequadas do ponto de vista bioclimático aumentaram sobre maneira o consumo de energia dos edifícios. Nos últimos anos foram publicadas as primeiras normas de desempenho térmico e eficiência energética de edificações. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) aprovou duas normas: a NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações – em 2005 e a NBR 15575 – Desempenho de Edifícios Habitacionais – em 2013.

A NBR 15575 (2013) é ampla e propõe uma análise de requisitos, critérios e métodos de avaliação de desempenho que vão desde o desempenho estrutural, estanqueidade de aberturas, desempenho térmico, acústico e lumínico, até a adequação ambiental, durabilidade e manutenibilidade da edificação. A NBR 15220 (2005), em sua parte 3, define recomendações quanto ao desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social, indicando as diretrizes construtivas e as estratégias bioclimáticas mais adequadas para diversas Zonas Bioclimáticas. Contudo, muitas das prescrições contidas na norma, principalmente em relação às características físicas dos fechamentos (transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar), tem sido contestadas em trabalhos de pesquisadores da área.

Alguns autores como MATOS (2007) e PEREIRA (2009) provaram através de estudos que alguns dos critérios utilizados pelas normas são inadequados ou equivocados, de forma que a própria NBR 15575 (2013), posterior à NBR 15220 (2005), já utiliza alguns parâmetros diferentes para avaliação simplificada das edificações.

Foi possível constatar a importância de se ter recomendações projetuais confiáveis graças a pesquisa realizada por VENÂNCIO (2011) que comprovou que mais de 50% dos arquitetos, consultores e pesquisadores adotam essas recomendações como a ferramenta mais frequente na tomada de decisões.

Existem vários trabalhos com o foco na análise do desempenho energético da envoltória, no entanto se concentram principalmente, nas questões de controle de radiação solar no contexto dos fechamentos opacos e transparentes. Como a pesquisa de CARLO (2008) que se tornou referência pois, em sua tese de doutorado realizou mais de 1000 simulações computacionais com o software Energy Plus e com base no seu trabalho as equações de regressão linear presentes no Regulamento Brasileiro de Eficiência Energética para Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), foram geradas para avaliar o nível de eficiência energética da envoltória de edifícios comerciais, de serviços e públicos pelo método prescritivo. Tanto no caso de edifícios residenciais, como também no caso de comerciais, não encontramos trabalhos acadêmicos no Brasil cujo foco seja a análise do impacto das pontes térmicas no contexto do desempenho termo energético das edificações.

No âmbito internacional as consequências negativas das pontes térmicas são reconhecidas e estratégias para a sua correção são utilizadas. As pontes térmicas agravam o risco da ocorrência de condensações superficiais e a formação de fungos filamentosos, e ainda por sua natureza servem como caminho para a transmissão de calor agravando as perdas térmicas para o exterior, o que poderá suscitar em um maior consumo energético para aquecimento. Segundo EVANS e SCHILLER (2010) as pontes térmicas favorecem a ocorrência da condensação superficial, e a norma argentina IRAM 11.549 (2002) define que a ponte térmica ocasiona maior fluxo de calor originando condensação superficial. No mesmo contexto HAUPT (2007) afirma que as pontes térmicas geram uma diminuição brusca da temperatura de superfícies podendo gerar condensação superficial. Como consequência direta da condensação superficial na maioria das vezes há formação de fungos filamentosos. Nos estudos sobre transmissão de calor em edificações o efeito das pontes térmicas ainda é um assunto negligenciado ou não implementado corretamente nos cálculos. Isso se dá principalmente porque a transferência de calor nas edificações tem sido considerada como unidimensional. Segundo

HAUPT (2007) a ponte térmica é caracterizada quando o fluxo térmico não é mais unidimensional. VALÉRIO (2007) afirma que a ponte térmica é toda a parte da envolvente de um edifício onde não é possível admitir a hipótese de unidirecionalidade do fluxo de calor e, por conseguinte, deixa de ser válida a abordagem de cálculo convencionalmente usado em análise de desempenho termo energético de edifícios, que toma a resistência térmica dos elementos uniforme na sua área. Em termos de fenómeno físico, nas zonas de pontes térmicas as linhas do fluxo de calor deixam de ser retilíneas, aspecto característico de um processo unidirecional (Figura 1), e tomam as direções em que a resistência oferecida à passagem de calor é menor.

Com esse raciocínio percebe-se a importância de quantificar a perda ou o ganho de calor gerado pelas pontes térmicas. Elas interferem no conforto térmico e desempenho termoenergético de uma edificação, assim como, propensão à patologias.

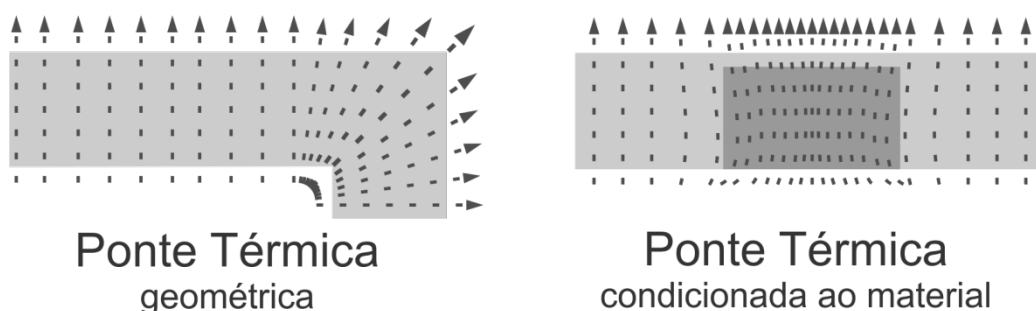


Figura 1 - Exemplos de pontes térmicas no envelope construído

Nesse sentido O objetivo do artigo é apresentar a análise da influência das pontes térmicas de sistemas estruturais em concreto armado no desempenho termoenergético da envoltória de um edifício hoteleiro localizado nas zonas bioclimáticas brasileiras de 1 a 4 utilizando simulação computacional.

2. MÉTODO

A pesquisa foi desenvolvida em quatro etapas. Na primeira foi definida a tipologia a ser analisada, observando as características de uso e ocupação como também a densidade de carga interna. A tipologia escolhida foi a de um hotel que conjuga a ocupação residencial com a densidade de carga interna de edifícios comerciais.

A partir da definição da tipologia, iniciou-se a segunda etapa da pesquisa: a modelagem e configuração da edificação. O programa utilizado foi o DesignBuilder versão 3.0.0.15, considerando na modelagem a presença e ausência de pontes térmicas referentes à estrutura em concreto. Devido a limitações do programa para a modelagem das pontes térmicas, foi necessária uma adaptação do modelo para que o software fosse capaz de interpretar as pontes térmicas e, para tanto, paredes equivalentes foram calculadas, conforme caracterizado a seguir. Com o objetivo de otimizar o tempo de realização das simulações foi desenvolvido um trabalho de otimização das simulações – terceira etapa da pesquisa - descrita a seguir.

De posse dos modelos com e sem as pontes térmicas modelados e configurados no DesignBuilder, deu-se início às simulações – quarta etapa da pesquisa. O modelo de hotel foi simulado com diferentes configurações: com alterações de PAFT – percentual de aberturas nas fachadas (30%, 45%, 60%), densidade de iluminação e densidade de carga de equipamentos, referenciados pela norma NBR 16401 (ABNT, 2008) e pelo RTQ-C (2010). Estes parâmetros resultaram em 36 configurações simuladas para cada contexto climático das quatro Zonas Bioclimáticas Brasileiras.

3.1. DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO CASO BASE

O caso base foi definido como hotel, por conter características residenciais e comerciais já caracterizadas anteriormente, sendo ocupadas todas as horas do dia. Com base na análise tipológica de CARLO (2008) foram definidos o volume e o percentual de área de janela na fachada. A partir desses dados, gerou-se um projeto arquitetônico que posteriormente, foi modelado no programa DesignBuilder versão 3.0.0.15. O modelo foi configurado utilizando os parâmetros referentes à tipologia de hotelaria do trabalho de referência que são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros e Variáveis do modelo base

Parâmetros	Variáveis	
Dimensões	52m x 17m	
Número de Pavimentos	5	
Percentual de Área de Abertura na Fachada Total	30%	
Vidro	Cor	Incolor
	Espessura	4 mm
	Película	Não
Parede	Transmitância	1,92 W/m ² K
	Absotância	0,25
Ocupação - Densidade	0,28 pessoas/m ³	
Densidade de Carga Interna	Iluminação	21 W/m ²
	Equipamentos	60 W/m ²
Padrão de Uso (dias úteis;sáb/dom)	0:00-6:00	100%
	7:00-15:00	50%
	16:00-24:00	75%
	0:00-6:00	60%
	7:00-15:00	30%
	16:00-24:00	40%
Sistema de Ar Condicionado	Split	CoP 3,21 (heating/cooling)

3.1.2 Definição da parede equivalente

Para que pudessem ser configuradas as paredes externas no programa DesignBuilder, considerando a composição heterogênea do fechamento em alvenaria, foi necessária a construção de uma parede equivalente, composta por reboco, material cerâmico, camada de ar, material cerâmico e reboco com a mesma transmitância e capacidade térmica da parede original. Na Figura 2 apresenta-se a parede equivalente.

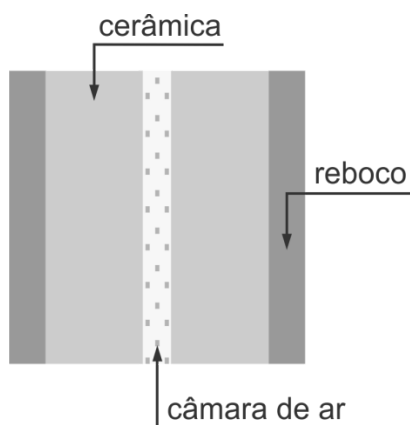


Figura 2 Parede Equivalente

Na Tabela 2 caracterizam-se as propriedades térmicas dos materiais que compõem a parede. Considerando a alteração das espessuras, nessa nova parede equivalente, foi necessário ajustar a densidade de massa aparente do material cerâmico.

Tabela 2 Materiais e parâmetros da parede equivalente.

Materials	Parameters	
Sistema(Paredes)	Capacidade Térmica	202 kJ/m ² K
Reboco	Espessura	0,025 m
	Densidade de Massa	2000 kg/m ³
	Calor Específico	1,00 kJ/kgK
Cerâmica	Espessura	0,076 m
	Densidade de Massa	739,13 kg/m ³
	Calor Específico	0,92 kJ/(kgK)
Câmara de Ar	Espessura	0,02 m

3.2. DEFINIÇÃO E CONFIGURAÇÃO DO MODELO DE REFERÊNCIA

Para poder atingir os parâmetros de transmitância de 1,92W/m²K determinado no caso base, e representar as pontes térmicas no programa DesignBuilder, calculou-se uma parede equivalente modelada com 3 subsurfaces (uma ferramenta de modelagem do programa que permite sobreposição de camadas): a parede pesada, representando as vigas e pilares de concreto com reboco; parede leve, feita de aglomerado e concreto; e parede interna, composta de concreto em toda a sua extensão, conforme mostra a Figura 3. Na Tabela 3 estão os materiais com os seus parâmetros detalhados.

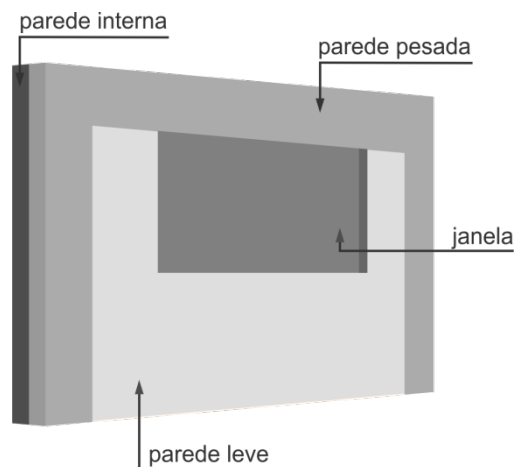


Figura 3 Parede equivalente modelada com subsurfaces no programa DesignBuilder.

Tabela 3 Parâmetros da Parede Equivalente

Parede Interna (PI)	Concrete	Condutividade Térmica	1,75 W/mK
		Espessura	0,08 m
		Density	2400 kg/m ³
Parede Leve (PL) $U_{total} = R_{SI} + R_{PI} + R_{PL} + R_{SE}$ $U_{(PL + PI)} = 1,92 \text{ W/m}^2\text{K}$	Concrete	Condutividade Térmica	1,75 W/mK
		Espessura	0,062 m
		Densidade de Massa	2400 kg/m ³
	Aglomerado	Condutividade Térmica	0,058 W/mK
		Espessura	0,0172 m
		Density	338,46 kg/m ³
Parede Pesada (PP) $U_{total} = R_{SI} + R_{PP} + R_{PI} + R_{SE}$ $U_{(PP + PI)} = 3,71 \text{ W/m}^2\text{K}$	Concrete	Condutividade Térmica	1,75 W/mK
		Espessura	0,1 m
		Densidade de Massa	2400 kg/m ³
	Plaster	Condutividade Térmica	1,15 W/mK
		Espessura	0,02 m
		Density	2000 kg/m ³

3.2.1 Revisão e definição da DCI (equipamentos e iluminação)

Utilizou-se a densidade de carga de equipamentos sugerida por CARLO (2008) com 60W/m². Questionando esse parâmetro, foram utilizados também os parâmetros de densidade de carga de equipamentos sugeridos pela NBR 16401 (ABNT, 2008) para comparação. Simulando com tipo de carga leve (6 W/m²), médio (11 W/m²) e alto (21 W/m²).

A carga de iluminação utilizada por CARLO (2008) é de 21W/m², no entanto foram utilizados os valores recomendados pelo RTQ-C (INMETRO, 2012) para a função do edifício, no caso hotel, sendo 10,8 W/m² para nível A; 12,4 W/m² nível B; 14 W/m² nível C e 15,7W/m² nível D.

3.2.2 Definição dos setpoints de aquecimento e refrigeração

Na configuração do controle ambiental o *setpoint* de aquecimento foi configurado para 22°C e o *setback* de aquecimento para 21°C; o *setpoint* de refrigeração ajustado para 24° e o *setback* de refrigeração para 25,5°C. Os setpoints foram definidos com base na NBR 16401 (ABNT, 2008).

3.3 OTIMIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

A otimização das simulações teve como objetivo principal otimizar o elevado número de simulação realizadas. O processo de geração novo IDFs (Input Data File), foi gerado a partir do desenvolvimento de um analisador, para percorrer os IDFs base e modificá-los, para que cada novo IDF tenha suas propriedades de iluminação e de equipamentos.

Para modificar um IDF é necessário saber suas densidades de iluminação (DPI) e de carga interna (DCI) tanto as originais quanto as novas para que um novo IDF seja gerado. As seguintes fórmulas são usadas nesse processo:

$$\text{Densign Lighting Level} = \frac{DPI(original)}{DCI(original)} \times DPI(novo)$$

$$\text{Densign Equipament Level} = \frac{DPI(original)}{DCI(original)} \times DPI(novo)$$

Também são inseridas ao final de cada novo IDF as seguintes regras de saída, para que o simulador gere resultados baseados na quantidade de energia gasta em iluminação, equipamentos, aquecimento e refrigeração.

Output: Meter, InteriorLight: Electricity, daily

Output: Meter, InteriorEquipament: Electricity, daily

Output: Meter, DistrictHeating: Facility, daily

Output: Meter, DistrictCooling: Facility, daily

Com todos os IDFs já gerados, a próxima etapa é a simulação. Nessa utilizamos o software Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB), para realizar co-simulações a partir de troca de mensagens em tempo real entre outros softwares. Na Figura 3 podemos ver a ligação entre o EnegyPlus e o Matlab.

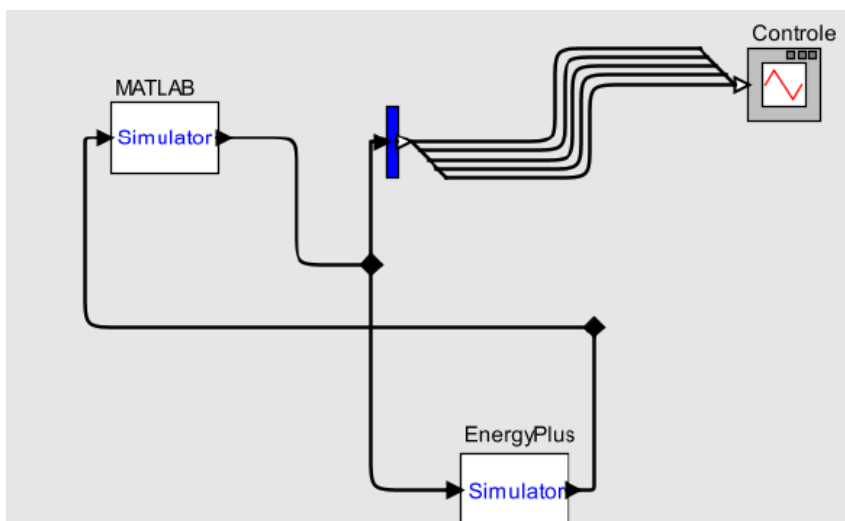


Figura 3: Interface BCVTB.

O EnergyPlus é um software desenvolvido para simulação de carga térmica e análise energética de edificações e seus sistemas. Para que a simulação seja realizada no BCVTB, inicialmente configuramos o arquivo bioclimático utilizado e as seguintes variáveis:

$$\begin{aligned} startTime &= 0 \\ finalTime &= 12 \times 31 \times 24 \times 3600 \\ timeStep &= 3600 \end{aligned}$$

Estas variáveis são respectivamente: tempo inicial, tempo final e tempo de uma simulação. Assim temos uma simulação ao longo de um ano, como resultados diários.

O BCVTB pode ser executado pela sua interface padrão ou também por linha de comando, e isto pode ser explorado por qualquer linguagem de programação.

Tanto BCVTB como o EnergyPlus trabalham com um IDF por vez, para resolver esse problema foi desenvolvida outra ferramenta, agora para executar automaticamente o BCVTB para cada IDF e após realizada a simulação, a ferramenta gera tabelas e gráficos para uma melhor análise dos dados obtidos pela simulação.

3.4. SIMULAÇÃO E COMPARAÇÃO DO CONSUMO DO CASO BASE E DO MODELO DE REFERÊNCIA

Com o modelo do caso base e o modelo de referência, com e sem pontes térmicas respectivamente, modelados e configurados no DesignBuilder, deu-se início às simulações. Nos primeiros dados gerados foram utilizados os

parâmetros de CARLO (2008). Após as primeiras simulações confirmou-se que a DCI de 60W/m² estava fora dos parâmetros normativos, e com a utilização dos diferentes parâmetros de densidade de carga e de iluminação, referenciados pela norma NBR 16401(ABNT, 2008) e ao RTQ-C (INMETRO, 2012), gerou-se 36 configurações a serem simuladas, com e sem pontes térmicas.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os modelos foram simulados com e sem as pontes térmicas variando as configurações de densidade de carga interna (DCI), a densidade de potência de iluminação (DPI) e o percentual de aberturas nas fachadas (PAFT) para as Zonas Bioclimáticas 1 a 4. Os resultados das simulações foram copilados em tabelas, como a Tabela 4. A partir do estudo dessas tabelas gerou-se o Gráfico 1 que mostram as zonas bioclimáticas nas abscissas, numeradas de 1 a 4, e a diferença entre o consumo anual dos modelos com e sem pontes térmicas em porcentagem nas ordenadas. Os resultados negativos se referem ao fato do modelo com pontes ter atingido um consumo superior ao modelo sem pontes.

Gráfico 1 - Resultado das Simulações para 5 Zonas - Consumo Anual

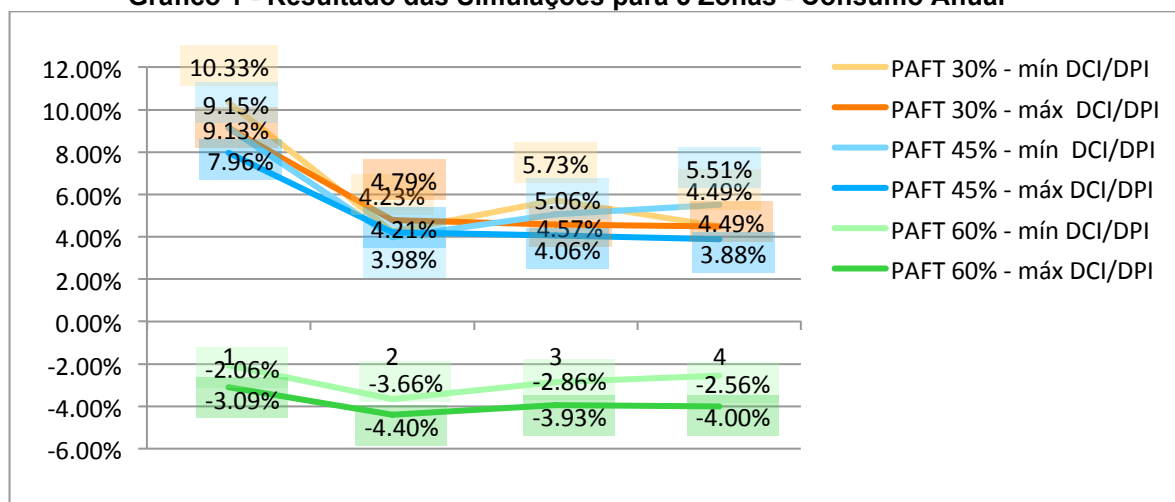


Table 4 Tabela - Resultado das Simulações para 4 Zonas - Consumo Anual

Zona Bioclimática	PAFT 30% mín DCI/DPI	PAFT 30% máx DCI/DPI	PAFT 45% mín DCI/DPI	PAFT 45% máx DCI/DPI	PAFT 60% mín DCI/DPI	PAFT 60% máx DCI/DPI
1	10,33%	9,13%	9,15%	7,96%	-2,06%	-3,09%
2	4,23%	4,79%	3,98%	4,21%	-3,66%	-4,40%
3	5,73%	4,57%	5,06%	4,06%	-2,86%	-3,93%
4	4,49%	4,49%	5,51%	3,88%	-2,56%	-4,00%

O consumo total é a soma do consumo para aquecimento e refrigeração no período de um ano, ressalta-se que o consumo para refrigeração equivale a mais de 95% do consumo total, tornando o consumo para aquecimento pouco significativo. Entretanto, para aquecimento o modelo com as pontes térmicas tem um consumo em média 40% maior em todas as zonas.

Os resultados mostram que para os menores valores de DCI e DPI conjugados com maiores ganhos por condução pelos vidros, as pontes térmicas geram um aumento do consumo entre 2% e 3%. E no caso das DCI e DPI altos, conjugados com maiores ganhos por condução pelos vidros, fazem com que o consumo aumente próximo de 4%.

Nas zonas bioclimáticas 1 a 4 observa-se que para PAFT 30% e 45% os fechamentos com pontes térmicas proporcionam uma diminuição de até 10% no consumo total. Em relação ao PAFT 60% houve um aumento em todas as zonas de 3,09% ; 4,40% ; 3,93% e 4,00% respectivamente.

A zona bioclimática 1 teve a maior redução do consumo anual, isso se deve ao fato de ser a zona mais fria, por tanto a diferença de temperatura entre o interior e exterior da edificação é maior, o que facilita as trocas de calor através das pontes térmicas e diminui o consumo de energia elétrica do edifício, principalmente com refrigeração, já que o compartimento estaria naturalmente perdendo calor.

5. CONCLUSÃO

Observando os resultados obtidos entende-se a importância da consideração das pontes térmicas no cálculo do desempenho termoenergético de edifícios, tendo em vista que a desconsideração das pontes para edificações de hotelaria com PAFT 30% e 45% em simulação termoenergéticas implica em uma diminuição da estimativa de consumo, que dependendo da zona bioclimática pode chegar em 10%. No caso de 60% de PAFT a não consideração da ponte térmica pode representar um aumento de até 4% no consumo dependendo da zona bioclimática.

BIBLIOGRAFIA

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.220. Norma Brasileira de Desempenho Térmico de Edificações, Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR16401-1. Instalações de ar-condicionado -Sistemas centrais e unitário Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15.575. Desempenho de Edifícios habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

CARLO, Joyce Correna. Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvimento de Edificações Não-residenciais. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. UFSC, 2008.

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.

HAUPT, Wolfram. Skript Feuchsteschutz. Kassel Universität, Kassel, 2007.

INMETRO - instituto nacional de metrologia, normalização e qualidade industrial. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos - RTQ-C. Eletrobrás, 2012.

Instituto Argentino de Normalización. IRAM 11549. Aislamiento térmico de edificios. Argentina: IRAM. 2002.

MATOS, Michele. Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural. Florianópolis, UFSC, 2007.

PEREIRA, Cláudia. A influência do envelope no desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ocupadas e ventiladas naturalmente. 2009.124 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

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

VENÂNCIO, Raoni. Investigando o projeto de envoltória: questionário sobre prática arquitetônica e desempenho térmico. XI Encontro Nacional de conforto no ambiente construído, Búzios RJ, 2011.