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

ANÁLISE DO IMPACTO DA GEOMETRIA DE EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS NO DESEMPENHO TÉRMICO

Camila Carvalho Ferreira (1); Henor Artur de Souza (2)
(1) Pos doutoranda, arquiteta, camilaccferreira@yahoo.com.br, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto
(2) Doutor, engenheiro mecânico, henorster@gmail.com, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Campus Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – MG, 35400-000

RESUMO
O desempenho térmico de uma edificação está relacionado ao clima em que está inserida, seus fechamentos e a sua forma arquitetônica. As normas brasileiras de desempenho térmico (NBR 15.220 e NBR 15.575) baseiam-se no atual zoneamento bioclimático proposto na norma NBR 15.220-3, desenvolvido com ênfase na avaliação de habitações unifamiliares de interesse social. Na ausência de um zoneamento equivalente para as outras tipologias edilícias, este tem sido utilizado de forma abrangente para todas as tipologias de edificações no país. Poucos são os estudos acerca do impacto da tipologia e sua geometria no desempenho térmico das edificações residenciais. Portanto, o objetivo deste artigo é avaliar as possíveis diferenças de desempenho térmico entre uma tipologia residencial unifamiliar e multifamiliar para as oito zonas bioclimáticas. Para tal, foram selecionados dois modelos representativos de edificações residenciais para análise. A análise foi baseada no experimento fatorial e em simulações de desempenho térmico utilizando o programa EnergyPlus, comparando o comportamento dos dois modelos residenciais e as variáveis de maior influência no desempenho térmico de cada um deles. Os resultados obtidos apontam que há uma boa similaridade nas variáveis de maior influência no desempenho térmico das duas tipologias, no entanto algumas diferenças de comportamento térmico entre os modelos são observadas. No caso da edificação multifamiliar é observada a influência da área de envoltória do ambiente, enquanto que no unifamiliar a orientação da abertura é que influencia no desempenho térmico da edificação. Constata-se então a necessidade de aprofundamento na relação da geometria com o desempenho térmico destas tipologias.
Palavras-chave: simulação computacional, parâmetros geométricos, desempenho térmico.

ABSTRACT
The thermal performance of a building is related to the climate in which it is inserted, its envelope and its architectural form. The Brazilian thermal performance standards (NBR 15.220 and NBR 15.575) are based on the current bioclimatic zoning proposed in the norm NBR 15.220-3, developed with emphasis on the evaluation of single-family dwellings of social interest. In the absence of an equivalent zoning for other building types, it has been used extensively for all typologies of buildings in the country. There are few studies about the impact of typology and its geometry on the thermal performance of residential buildings. Therefore, the objective of this article is to evaluate the possible differences in thermal performance between a single-family and multifamily residential typology for the eight bioclimatic zones. For this, two representative models of residential buildings were selected for analysis. The analysis was based on the factorial experiment and on thermal performance simulations using the EnergyPlus program, comparing the behavior of the two residential models and the variables of greater influence on the thermal performance of each of them. The results show that there is a good similarity in the variables of greater influence on the thermal performance of the two typologies, however some differences of thermal behavior between the models are observed. In the case of multifamily building, the largest influence is the building's surrounding area, whereas for the single family house, orientation of the opening presents the main influence on their thermal performance. It is then verified the need to deepen the geometry relation with the thermal performance of these typologies.
Keywords: computer simulation, geometric parameters, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

Com a finalidade de regular o desempenho térmico mínimo de uma edificação, foram instituídas no país normas de desempenho térmico que estabelecem parâmetros limites de características da envoltória e de projeto, objetivando avaliar e regulamentar um padrão mínimo de desempenho para as edificações residenciais, garantindo as condições de habitabilidade das edificações e de conforto dos usuários.

Dentre as normas de desempenho térmico atualmente em vigor no Brasil, pode-se citar a norma NBR 15.220 – Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005), dividida em cinco partes. Esta norma foi desenvolvida com ênfase na avaliação de habitações unifamiliares de interesse social e apresenta recomendações de projeto baseado no zoneamento bioclimático nela estabelecido.

O zoneamento bioclimático é também utilizado como base para definição dos requisitos de desempenho térmico para edificações residenciais (unifamiliares e multifamiliares) estabelecidos pela norma NBR 15.575 – Edifícios habitacionais: desempenho (ABNT, 2013). O procedimento simplificado desta norma verifica o atendimento de critérios mínimos referentes às características termofísicas de transmitância e capacidade térmica para os sistemas de paredes e de cobertura, de acordo com a zona bioclimática da cidade em que a edificação está inserida.

Apesar do zoneamento bioclimático e suas recomendações de projeto terem sido desenvolvidos especificamente para habitações unifamiliares de interesse social, na ausência de um zoneamento equivalente para as outras tipologias edilícias, este tem sido utilizado de forma abrangente para todas as tipologias de edificações no país.

São ainda poucos os estudos desenvolvidos que abordem os diferentes comportamentos térmicos das tipologias entre as edificações residenciais, relacionando sua forma, área de envoltória, área de aberturas com clima em que se inserem e seu desempenho. A importância do ganho térmico pelas superfícies está subordinada às diferentes tipologias. Em tipologias unifamiliares, a cobertura é a principal responsável pelo ganho térmico. Já em edificações multifamiliares, os fechamentos verticais são os principais responsáveis pelo ganho térmico da edificação (CORBELLA; CORNER, 2011).

Assim, a geometria da edificação irá influenciar no seu desempenho térmico em função dos componentes da envoltória. Formas diferentes com um mesmo volume de ar interior resultam em comportamentos térmicos distintos (RIVERO, 1985; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004).

Ferreira (2016) ao analisar o desempenho térmico de uma edificação residencial multifamiliar para diferentes climas brasileiros pode verificar que a área de parede exposta influencia no desempenho térmico. Para ambientes de mesma área de piso, naqueles com maior área de parede exposta ao exterior, as propriedades termofísicas da parede apresentaram maior relevância do que as características das aberturas e que a ventilação natural do ambiente.

Santana *et al*. (2019) investigam o impacto da variação dos parâmetros geométricos de uma edificação residencial unifamiliar, tomando como base os indicadores numéricos do método prescritivo do RTQ-R. As autoras concluem que o aumento do volume e da área de piso acarreta em melhoria do desempenho durante o período de verão. Já o fator de forma não apresenta linearidade em relação ao desempenho térmico.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar as possíveis diferenças de desempenho térmico entre duas tipologias de edificações residenciais: uma unifamiliar e outra multifamiliar para as oito zonas bioclimáticas brasileiras.

3. MÉTODO

O método deste trabalho é baseado no experimento fatorial para avaliação da influência das características termofísicas da envoltória e da ventilação natural no desempenho térmico de edificações residenciais e em simulações de desempenho térmico no programa EnergyPlus (versão 8.7) de duas tipologias residenciais representativas brasileiras para localidades de cada uma das oito zonas bioclimáticas. Em resumo, o método proposto possui quatro etapas:

1. Definição dos modelos representativos de edificações residenciais brasileiras;
2. Estruturação do experimento fatorial;
3. Modelagem para a simulação;
4. Análise estatística dos dados.

3.1. Definição dos modelos representativos de edificações residenciais brasileiras

As análises de desempenho térmico contemplam duas tipologias residenciais brasileiras: unifamiliar e multifamiliar.

As edificações representativas foram definidas conforme o estudo realizado por Telles (2016), que caracterizou o parque imobiliário residencial brasileiro existente e definiu as características físicas do setor residencial brasileiro e, por fim, definiu oito modelos físicos representativos de edificações residenciais brasileiras. A autora também observou que no Brasil há uma predominância de unidades habitacionais de 2 (42,66% dos domicílios) e 3 dormitórios (22,90% dos domicílios), sendo observada uma tendência de expansão das unidades com 2 dormitórios (TELLES, 2016). Por esta razão, os modelos unifamiliar e multifamiliar adotados para análise no presente trabalho são os que possuem dois quartos, dentre os modelos de referência selecionados por Telles (2016). Os modelos adotados são apresentados na Figura 1 e na Figura 2. No caso do modelo multifamiliar são considerados 11 pavimentos e as análises foram realizadas no primeiro, sexto e no último pavimento.

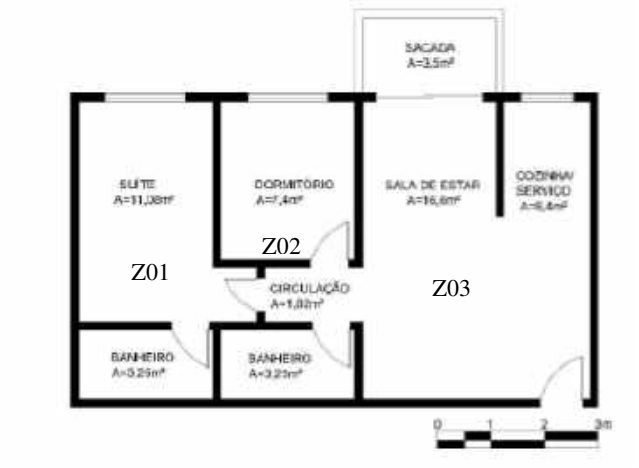

Figura 1 – Modelo de edificação multifamiliar.

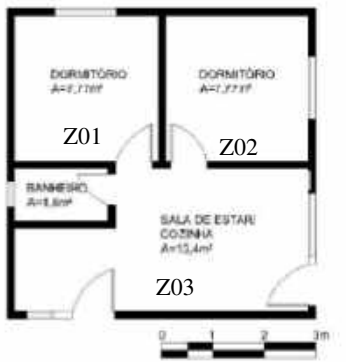

Figura 2 – Modelo de edificação unifamiliar.

Para avaliar a influência da geometria no desempenho térmico, os aspectos geométricos adotados são o fator de forma (razão entre a área de envoltória e o volume) e o percentual de área de abertura (PAF) em relação à área da envoltória. As características geométricas dos modelos analisados são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características geométricas dos modelos multifamiliar e unifamiliar

	Multifamiliar			**Unifamiliar**		
Zona térmica	**Z01**	**Z02**	**Z03**	**Z01**	**Z02**	**Z03**
Pé direito (h) (m)	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7	2,7
Área de envoltória (m^2)	17,8	6,5	6,75	15,0	15,0	27,0
Área de piso (m^2)	11,08	7,4	16,6	7,77	7,77	13,4
Área de abertura (m^2)	1,95	1,95	2,55	1,56	1,56	2,21
Volume (m^3)	29,9	20,7	44,8	21,0	21,0	36,2
PAF (%)	0,11	0,29	0.38	0,10	0,10	0,08
Fator de forma (FF) (adimensional)	0,59	0,34	0,11	0,72	0,72	0,75

No caso do modelo multifamiliar, pode-se observar que o dormitório suíte (zona térmica 1) possui uma área de piso e de envoltória superior ao dormitório 2 (zona térmica 2), mas ambos possuem a mesma área de abertura, assim como mesma orientação. A sala (zona térmica 3) possui a maior área de piso da edificação, mas a área de envoltória é a mesma do dormitório 2. Já no modelo unifamiliar os dormitórios (zona térmica 1 e 2) possuem mesma área de piso, de envoltória e de abertura. No entanto, as orientações das aberturas são distintas. A sala do modelo unifamiliar possui a maior área de piso, de envoltória e de abertura deste modelo.

3.2. Estruturação do Experimento Fatorial

Para o estudo da influência de variáveis em um determinado fenômeno recomenda-se o emprego do projeto experimental. Nele estuda-se a influência de alterações propositais de variáveis de entrada do fenômeno investigado nas variáveis de saída deste quais foram os efeitos (MONTGOMERY, RUNGER e HUBELE, 2012).

A técnica de projeto experimental selecionada é a fatorial, que permite extrair a influência dos fatores em análise no resultado final. Este método se distingue dos demais por ser o único tipo de experimento que permite descobrir não só a influência das variáveis em si (1° fator), mas também a interação entre as variáveis (2° fator em diante). Considerando que as trocas de calor na edificação são sistemas complexos, esta particularidade assume relevância. Deste modo, a análise fatorial foi aplicada com o objetivo de determinar quais são os parâmetros de influência no desempenho térmico de cada uma das tipologias. O experimento fatorial adotado foi o de dois níveis e a partir dele foram definidas as simulações a serem realizadas. Os dados obtidos por simulação são utilizados como as variáveis de saída da análise fatorial. As variáveis avaliadas foram a transmitância térmica, capacidade térmica e absortância solar das paredes; o fator solar das aberturas e a possibilidade de ventilação natural; e a transmitância térmica, capacidade térmica, absortância solar das coberturas.

Para uma fatorial em dois níveis, o número de testes é equivalente a 2^k. Considerando as variáveis selecionadas, para a análise das paredes externas foram 32 testes (2^5) e para a análise das coberturas foram 8 testes (2^3). Além disso, a análise foi realizada para as quatro orientações principais: norte, leste, sul e oeste. Estas simulações para as diferentes orientações são consideradas réplicas (repetições de um mesmo experimento) dos testes fatoriais e são de valia para aumentar a confiabilidade do modelo gerado.

As variáveis selecionadas, denominadas de fatores, variam em níveis a partir de valores pré-determinados que, combinados entre si, resultam em conjuntos paramétricos de valores ordenados, conforme o planejamento fatorial. Aos fatores escolhidos atribui-se um nível dito baixo (-) e outro alto (+). É relevante ressaltar que um dos níveis produz um desempenho térmico superior, o que não significa necessariamente corresponder ao nível alto ou ao maior valor numérico.

A variável é considerada ativa quando está em seu fator alto. Assim, quando se está considerando a absortância térmica de uma parede ativa, por exemplo, significa que esta equivale a uma absortância de 0,9.

As variações dos parâmetros foram estabelecidas a partir da distribuição de probabilidade normal das variáveis (transmitância térmica das paredes, capacidade térmica das paredes, absortância solar das paredes, fator solar das aberturas, transmitância térmica da cobertura, capacidade térmica da cobertura e absortância solar da cobertura) ou da distribuição discreta no caso do parâmetro ventilação natural, em que foi considerado sua existência ou não. Os valores das variações dos parâmetros são apresentados nas Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 - Níveis para o experimento fatorial para as paredes

Fator	**FATOR A**	**FATOR B**	**FATOR C**	**FATOR D**	**FATOR E**
Nível	**Transmitância da parede (U_{PAR}) [W/(m².K)]**	**Capacidade térmica da parede (CT_{PAR}) [J/(m².K)]**	**Absortância da parede (α_{PAR})**	**Fator Solar das aberturas (FS_{ABER}) [%]**	**Ventilação (F_{vent})**
Baixo (-)	3,70	49,9	0,1	0,9	0
Alto (+)	1,00	250,1	0,9	0,2	1

Tabela 3 - Níveis para o experimento fatorial para a cobertura

Fator	**FATOR A**	**FATOR B**	**FATOR C**
Nível	**Transmitância da cobertura (U_{COB}) [W/(m².K)]**	**Capacidade térmica da cobertura (CT_{COB}) [J/(m².K)]**	**Absortância da cobertura (α_{COB})**
Baixo (-)	4,00	20,0	0,1
Alto (+)	1,00	200,0	0,9

As probabilidades de ocorrência dos parâmetros para a distribuição normal são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Distribuição das probabilidades dos parâmetros segundo a distribuição normal

Parâmetro	**Variações**	**Probabilidade**
Transmitância térmica das paredes	1,00/3,70	0,20
Capacidade térmica das paredes	49,9/250,1	0,20
Absortância solar das paredes	0,1/0,9	0,20
Fator solar das aberturas	0,2/0,9	0,2
Transmitância térmica da cobertura	1,00/4,00	0,2
Capacidade térmica da cobertura	20,0/200,0	0,2
Absortância solar da cobertura	0,1/0,9	0,2

As envoltórias adotadas no estudo variaram conforme os parâmetros analisados no experimento. São necessários quatro tipos de paredes externas: uma chamada de base, que não seja isolante e nem pesada; uma parede isolante e leve; uma parede não isolante e pesada; e outra isolante e pesada. Para o experimento fatorial das paredes externas a cobertura não sofre variações, sendo adotada a cobertura base para este experimento. De forma análoga, tem-se quatro tipos de coberturas e as paredes externas não sofrem variações, sendo adotada a parede base para este experimento.

3.3. Modelagem para a simulação

3.3.1 Parâmetros de entrada das características termofísicas das envoltórias

A especificação das envoltórias foi baseada em suas características termofísicas de acordo com o experimento fatorial e são apresentados na Tabela 5. O vidro considerado na simulação foi o vidro comum de 3mm.

Tabela 5 – Características dos materiais utilizados na simulação computacional.

Material	**Condutividade térmica [W/m.K]**	**Densidade [kg/m^3]**	**Calor específico [J/kg.K]**
Parede base	1,74	500	1.000
Parede isolante	0,25	500	1.000
Parede pesada	1,74	2.500	1.000
Parede isolante e pesada	0,25	2.500	1.000
Cobertura base	2,50	200	1.000
Cobertura isolante	0,18	200	1.000
Cobertura pesada	2,50	2.200	1.000
Cobertura isolante e pesada	0,18	2.200	1.000

O dispositivo modelado para sombreamento das aberturas foi uma veneziana horizontal, com refletância de 0,5. Nos testes em que o fator solar da abertura era um fator ativo, foi considerada a presença do sombreamento durante todo o período do dia. As venezianas foram consideradas em todas as janelas dos dormitórios e salas da edificação.

3.3.2 Parâmetros de entrada de cargas internas

Os parâmetros de entrada de cargas internas (pessoas, iluminação e equipamentos) e suas respectivas rotinas seguiram o especificado pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R) (INMETRO, 2012). Estes parâmetros foram mantidos constantes em todas as simulações realizadas.

3.3.3 Parâmetros de entrada da ventilação natural

Para uma avaliação mais precisa do impacto da ventilação no desempenho térmico da edificação, optou-se por simular a ventilação natural no módulo "*Airflow Network*" do EnergyPlus. Os coeficientes de pressão foram calculados pelo programa. Os coeficientes de descarga adotados foram de 0,65 para as portas e de 0,6 para as janelas, valores *default* conforme manual do próprio programa.

Não foi considerado nenhum tipo de controle para o uso das aberturas nas simulações do experimento fatorial, com o intuito de avaliar o impacto desta variável tanto no desconforto por calor, quanto por frio. Quando a ventilação natural era um parâmetro ativo na avaliação, as janelas e portas eram consideradas

abertas durante todo o período de análise. Apenas a porta de entrada da residência foi exceção, sendo considerada sempre fechada.

3.3.4 Parâmetros de saída

As variáveis de saída solicitadas ao *software* de simulação foram a temperatura neutra de conforto(°C) e a temperatura operativa interna horária das zonas térmicas (°C).

As temperaturas de conforto são utilizadas para o cálculo da faixa de conforto e as temperaturas operativas para a verificação da condição de conforto ou não das zonas térmicas. Para determinar quais temperaturas operativas internas encontravam-se dentro da faixa de conforto, o modelo adotado para a quantificação das horas de conforto foi o desenvolvido por deDear e Brager (2002), adotado pela norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013). A faixa de conforto utilizada foi a de ±3,5 °C, de acordo com a recomendação da norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2013) de 80% de satisfação dos usuários para aplicações típicas.

3.3.5 Arquivos climáticos

Os arquivos climáticos utilizados foram os tipos SWERA e TRY disponíveis no próprio site do EnergyPlus[11]. As cidades selecionadas para a análise foram: São Joaquim/SC (ZB01), Santa Maria/RS (ZB02), Belo Horizonte/MG (ZB03), Brasília (ZB04), Niterói (ZB05), São Simão/GO (ZB06), Palmas/TO (ZB07) e Manaus/AM (ZB08).

3.4. Análise estatística dos dados

A variável de saída adotada para análise estatística dos dados foi a somatória de horas de conforto anual. A etapa de análise dos dados foi realizada no programa estatístico Minitab versão 17, para o cálculo do efeito e das interações dos fatores e para a análise de variância (ANOVA), sendo considerados como fatores significativos aqueles que apresentaram um valor de teste superior a 0,05.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos por meio do experimento fatorial. Para cada uma das zonas térmicas correspondentes aos ambientes de permanência prologada (dormitórios e sala) foram avaliados quais as variáveis de influência no desempenho térmico dos modelos de edificações. Foram considerados neste trabalho apenas os fatores de primeira ordem, ou seja, as variáveis isoladas sem qualquer combinação entre elas, uma vez que as combinações das variáveis pouco contribuíram no desempenho térmico para os climas analisados.

Nos gráficos estão representadas as influências de cada uma das variáveis, assim como, se estas são positivas (aumentam as horas de conforto, em azul) ou negativas (reduzem as horas de conforto, em vermelho).

De modo geral, a influência das variáveis no desempenho da cobertura apresenta um comportamento mais homogêneo em relação ao comportamento da influência das variáveis no desempenho das paredes externas.

4.1. Influência das variáveis para a cobertura

Os resultados das variáveis de maior influência no desempenho térmico no estudo da cobertura são apresentados na Tabela 6. De modo geral, o que se pode observar é que as variáveis de maior influência foram a transmitância térmica e a absortância solar da cobertura, sendo que a primeira apresenta uma influência positiva, enquanto a segunda uma influência negativa no desempenho térmico das edificações. Exceção foi o clima de São Joaquim (ZB1) em que a absortância mais alta resultou em uma melhoria no desempenho da edificação. Este resultado era esperado, uma vez que a cidade de São Joaquim apresenta um clima frio e o aumento da absortância solar da cobertura representa um maior ganho térmico, que pode ser benéfico para as condições de conforto do usuário.

[11] https://energyplus.net/weather-region/south_america_wmo_region_3/BRA%20%20

A absortância exerceu uma maior influência para as zonas bioclimáticas 1, 3, 4, 6, 7 e 8. Para estas zonas a absortância define o desempenho térmico na análise da cobertura. Para as zonas 2 e 5 é a transmitância térmica quem desempenha este papel.

Comparando os modelos, observa-se que a influência da absortância foi maior no caso do modelo unifamiliar em relação ao multifamiliar. Novamente, exceção foi o clima de São Joaquim, no qual a absortância apresentou uma influência menor no modelo unifamiliar em relação ao multifamiliar. Já a transmitância térmica, comparativamente, apresentou uma influência maior no modelo multifamiliar para as cidades das zonas bioclimáticas 2 a 6. Para as demais zonas, a transmitância das coberturas apresentou uma influência maior para o modelo unifamiliar.

Outra observação feita, foi uma certa relação entre a influência da absortância da cobertura e o fator de forma do ambiente para o modelo multifamiliar. Quanto menor o fator de forma do ambiente, maior a influência desta variável. Outras relações entre a influência das variáveis e as características geométricas dos ambientes não puderam ser observadas.

Tabela 6 – Influência das variáveis da cobertura no desempenho térmico

Zona térmica		Z01PAVTO11	Z02PAVTO11	Z03PAVTO11	Z01	Z02	Z03
ZB1 São Joaquim	U_{COB}	-1.6	0.1	0.2	63.5	3.2	7.5
	CT_{COB}	-5.1	-4.4	-4.6	0.7	-5.6	-4.8
	Abs	84.4	85.5	87.8	24.4	76.3	73.1
ZB2 Santa Maria	U_{COB}	69.8	54.8	55.1	38.6	47.1	42.5
	CT_{COB}	3.0	6.5	5.8	1.5	1.4	1.2
	Abs	-2.0	-14.4	-15.0	-36.7	-27.5	-27.9
ZB3 Belo Horizonte	U_{COB}	29.4	20.6	22.9	14.9	25.4	23.9
	CT_{COB}	2.4	4.0	3.8	4.3	3.6	3.7
	Abs	-46.7	-56.7	-57.5	-59.6	-47.3	-48.1
ZB4 Brasília	U_{COB}	36.1	25.4	26.9	16.1	27.4	26.2
	CT_{COB}	3.4	6.3	5.8	8.1	6.8	6.7
	Abs	-35.1	-45.3	-47.3	-56.3	-44.3	-45.1
ZB5 Niterói	U_{COB}	80.3	72.6	76.1	33.0	49.6	48.5
	CT_{COB}	2.0	5.4	3.9	4.8	7.9	7.4
	Abs	2.3	-4.6	-4.8	39.2	-5.6	-8.8
ZB6 São Simão	U_{COB}	23.6	16.7	18.2	7.9	16.2	15.3
	CT_{COB}	6.1	7.4	7.1	8.0	7.7	7.7
	Abs	-56.6	-63.9	-64.4	-65.1	-55.6	-56.7
ZB7 Palmas	U_{COB}	13.5	9.1	9.7	4.7	13.8	13.4
	CT_{COB}	10.7	10.7	11.1	4.8	8.6	8.7
	Abs	-26.8	-31.0	-35.8	-73.0	-62.9	-63.2
ZB8 Manaus	U_{COB}	1.1	2.1	2.1	2.1	11.0	10.3
	CT_{COB}	0.3	2.6	2.9	1.6	3.2	3.2
	Abs	-48.5	-86.5	-88.7	-82.8	-71.9	-72.4

4.2. Influência das variáveis para as paredes externas

Os resultados do experimento fatorial das paredes externas são apresentados na Tabela 7. Com relação ao desempenho das paredes externas, pode-se notar alguns comportamentos gerais das variáveis. As variáveis de maior influência no desempenho térmico, tanto para o multifamiliar como para o unifamiliar, foram a absortância solar e a ventilação natural. Para as zonas bioclimáticas 2, 3, 5 e 6, a transmitância térmica e a capacidade térmica também apresentaram influência, mas em amplitudes diferentes entre as zonas bioclimáticas. Para a zona bioclimática 2 a influência da transmitância térmica é superior às demais zonas. Assim como para as zonas 1 e 4, a capacidade térmica influenciou o desempenho, em conjunto com a

absortância e a ventilação natural. Para o clima frio, como o de São Joaquim (ZB1), a absortância apresentou uma influência positiva e a ventilação uma influência negativa. Para as outras zonas, a absortância tem uma influência negativa e a ventilação uma influência positiva.

Comparando o modelo multifamiliar com o unifamiliar, pode-se observar que a influência da absortância foi mais significativa no caso do unifamiliar em relação ao multifamiliar. Também se observou que a influência da transmitância térmica e da capacidade térmica são proporcionalmente menores no modelo unifamiliar em relação ao multifamiliar. Outro comportamento observado é que a ventilação apresentou influência positiva no modelo multifamiliar para a zona bioclimática 2 nos pavimentos intermediário e superior e influência negativa no primeiro pavimento do modelo multifamiliar e no modelo unifamiliar.

Com relação ao modelo multifamiliar, constatou-se uma diferença de comportamento entre os pavimentos analisados. Em geral, a transmitância térmica das paredes possui uma influência no primeiro pavimento, que se reduz ou se anula no pavimento intermediário e superior. Já a capacidade térmica, a absortância e a ventilação possuem um aumento gradativo da sua influência do primeiro pavimento ao último. No caso da ventilação natural é válido salientar para as zonas bioclimáticas 2, 5, 6 e 7 a ventilação possui influência negativa no primeiro pavimento, enquanto que para o pavimento intermediário e superior possui influência positiva.

Tabela 7 – Influência das variáveis das paredes externas no desempenho térmico

Tipologia		Multifamiliar									Unifamiliar		
Zona térmica		Z01PAVTO01	Z02PAVTO01	Z03PAVTO01	Z01PAVTO06	Z02PAVTO06	Z03PAVTO06	Z01PAVTO11	Z02PAVTO11	Z03PAVTO11	Z01	Z02	Z03
ZB1 São Joaquim	U_{PAR}	1.1	0.8	0.2	1.5	1.2	0.3	1.0	0.7	0.2	0.8	1.3	1.7
	CT_{PAR}	-3.1	-1.8	-0.7	-7.5	-5.0	-1.4	-6.1	-1.9	-0.7	0.1	-1.8	-1.9
	Abs	58.6	28.3	7.4	50.3	17.4	4.8	69.5	30.4	12.0	-1.5	52.1	52.1
	FS_{ABER}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	Vent	-21.5	-35.2	-31.6	-21.3	-34.7	-38.5	-15.0	-40.3	-68.6	-76.5	-17.9	-20.4
ZB2 Santa Maria	U_{PAR}	17.7	8.1	2.4	5.0	3.2	4.1	3.4	2.3	1.8	0.9	23.4	20.2
	CT_{PAR}	-2.3	-0.3	0.0	0.5	2.7	2.8	8.2	8.4	6.3	3.2	2.0	1.4
	Abs	3.2	0.1	7.4	-54.2	-42.2	-39.2	-47.4	-40.6	-21.8	-50.5	-11.2	-17.6
	FS_{ABER}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.2
	Vent	-1.1	-37.3	-67.3	2.6	0.0	0.2	13.6	12.6	34.9	-17.3	-14.4	-17.4
ZB3 Belo Horizonte	U_{PAR}	3.6	2.9	1.8	1.2	0.9	1.0	1.2	1.1	1.2	0.0	1.2	0.9
	CT_{PAR}	0.5	1.1	0.3	4.3	3.2	2.1	7.0	4.0	2.1	1.5	0.4	0.5
	Abs	-33.6	-40.7	-21.4	-57.3	-36.0	-21.3	-51.5	-31.6	-14.7	-37.5	-28.7	-28.7
	FS_{ABER}	-0.3	-0.4	-0.2	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.7	-0.6	0.0	0.1	0.0
	Vent	2.7	4.3	2.7	6.6	12.7	35.7	12.5	26.5	47.6	53.4	3.8	4.0
ZB4 Brasília	U_{PAR}	4.2	2.0	3.6	0.6	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.9	1.3	1.2
	CT_{PAR}	0.1	1.3	1.3	3.4	4.0	3.5	7.9	5.1	2.9	2.3	1.3	2.1
	Abs	-50.9	-42.6	-24.5	-71.1	-41.4	-37.9	-62.4	-41.5	-21.4	-28.2	-8.0	-8.9
	FS_{ABER}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Vent	0.5	0.3	-2.4	3.3	8.3	11.2	9.2	17.8	44.9	64.9	2.5	2.9
ZB5 Niterói	U_{PAR}	5.5	4.4	0.2	5.9	3.4	3.5	2.3	1.3	0.8	-0.4	1.6	1.8
	CT_{PAR}	-1.6	1.0	-0.2	0.1	0.6	0.9	3.3	3.4	2.0	0.6	0.5	0.8
	Abs	47.4	-40.2	52.1	-27.5	-29.3	-16.9	-22.0	-19.7	-7.0	-35.5	-2.3	-8.9
	FS_{ABER}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.4	-1.8	-1.7
	Vent	5.7	-2.2	-8.0	13.5	7.2	19.5	39.7	41.1	65.9	42.5	9.5	6.3
ZB6 São Simão	U_{PAR}	2.5	2.4	2.1	1.0	0.8	1.5	0.5	0.5	0.9	0.9	2.2	1.8
	CT_{PAR}	2.0	1.5	1.5	5.6	4.4	2.8	11.7	9.6	5.6	3.0	4.7	4.7
	Abs	-73.5	-61.1	-39.8	-77.6	-65.0	-56.0	-71.6	-59.8	-34.6	-31.4	-81.3	-83.0
	FS_{ABER}	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
	Vent	-0.1	-2.5	-1.7	0.4	1.9	8.4	3.1	8.5	39.5	61.2	7.0	0.8
ZB7 Palmas	U_{PAR}	0.4	0.0	0.0	0.0	-0.2	-0.3	0.1	0.0	0.1	0.0	1.8	1.6
	CT_{PAR}	1.6	1.4	0.2	8.3	6.8	6.2	9.6	6.2	3.2	0.8	2.9	3.5
	Abs	-77.0	-56.4	-39.7	-76.1	-61.3	-52.0	-75.3	-65.7	-34.9	-22.3	-80.0	-81.2
	FS_{ABER}	-1.4	-2.6	-4.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Vent	-2.3	-6.2	-16.4	0.4	3.0	3.9	3.9	13.7	49.8	74.2	5.2	3.3
ZB8 Manaus	U_{PAR}	0.3	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-0.7	0.3
	CT_{PAR}	1.2	0.7	0.4	2.1	0.6	0.0	1.8	0.4	0.1	0.0	1.9	1.5
	Abs	-85.3	-64.5	-50.0	-67.4	-49.3	-25.5	-58.0	-31.9	-16.7	-16.9	-88.3	-87.6
	FS_{ABER}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
	Vent	4.9	14.5	25.4	23.7	46.7	63.6	35.0	60.2	77.8	83.1	0.8	1.7

Comparando as zonas térmicas, no caso do modelo multifamiliar é observado que a zona térmica 1 (suíte), independente do pavimento, por possuir maior área de envoltória, a capacidade térmica e absortância apresentam maior influência em relação aos demais ambientes. Para o dormitório 2 e a sala, com uma menor área de envoltória, a ventilação possui uma maior influência. Já no caso do modelo unifamiliar, apesar dos dormitórios apresentarem a mesma área de piso, de envoltória e de abertura, estes apresentam comportamentos térmicos distintos. No caso do unifamiliar, observa-se que é a orientação das aberturas quem define o comportamento térmico dos ambientes. O dormitório 2 e a sala, por possuírem a mesma

orientação das aberturas, possuem um comportamento muito similar, mesmo com áreas de piso, envoltória e aberturas distintas.

5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho apontam que as variáveis de maior influência no desempenho térmico residencial são a transmitância térmica da cobertura, a absortância solar da cobertura e das paredes e a ventilação natural.

Comparando os comportamentos dos modelos unifamiliar e multifamiliar, há uma tendência similar nas variáveis de maior influência no desempenho térmico, mas algumas especificidades são notadas em cada tipologia. Quanto às coberturas, observou-se um comportamento mais homogêneo. No entanto, para as paredes foi observado que a orientação das aberturas, o pavimento analisado e a área de envoltória exercem influência no desempenho térmico. No caso do multifamiliar, em que o modelo apresentava a mesma orientação para as aberturas de todos os ambientes, o aumento da área de envoltória do ambiente, resultava em uma influência maior das variáveis relacionadas as superfícies opacas (capacidade térmica e absortância solar). Para os ambientes com menor área de envoltória, a ventilação passava a ter maior influência. No caso do modelo unifamiliar, observou-se que a absortância das superfícies e a orientação das aberturas possuem papel fundamental no desempenho térmico da edificação.

Notou-se também uma variação de comportamento térmico entre os pavimentos térreo, intermediário e superior no caso do modelo multifamiliar.

Está pesquisa encontra-se em desenvolvimento e pretende-se dar continuidade a ela, avaliando outros modelos de referência com características geométricas distintas e outras cidades, de forma a obter resultados mais abrangentes e melhor relação da geometria dos ambientes com o desempenho térmico das edificações residenciais, permitindo também análises de correlação entre desempenho térmico e características geométricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220:** Desempenho térmico de edificações, Rio de Janeiro, 2005. 92p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais – Desempenho, Rio de Janeiro, 2013. 312p.

ASHRAE. AMERICAN SOCIETY FOR HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING. **ASHRAE 55:** Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta. 2013.

BRASIL. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA (INMETRO). **Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R)**. Rio de Janeiro. 2012.

CORBELLA, O.; CORNER, V. **Manual de Arquitetura Bioclimática Tropical para a Redução de Consumo Energético**. Rio de Janeiro: Revan, 2011.

DEDEAR, R.; BRAGER, G. S. Thermal Comfort in Naturally Ventilated Buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, v. 34, 2002. p.549-564.

FERREIRA, C. C. **Análise de Sensibilidade por Meio de Experimento Fatorial de Parâmetros de Desempenho Térmico de Envoltórias de Edificações Residenciais: contribuição à revisão das normas brasileiras**. Orientador: Henor Artur de Souza. 2016. 437f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto). Ouro Preto, 2016.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 2 Ed. ed. São Paulo: PW Editores, 2004.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima:** acondicionamento termico natural. Porto Alegre: [s.n.], 1985.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; HUBELE, N. F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. Tradução de Verônica Calado. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC _ Livros Técnicos e Científicos Editora, 2012.

SANTANA, L. O. et al. Impacto da Geometria de Edificações sobre o DEsempenho Térmico de Acordo com o Método Prescritivo do RTQ-R. **Oculum Ensaios**, Campinas, 16, n. 1, 2019. 139-155.

TELLES, C. D. P. **Proposta de Simplificação do RTQ-R**. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 135. 2016.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto.