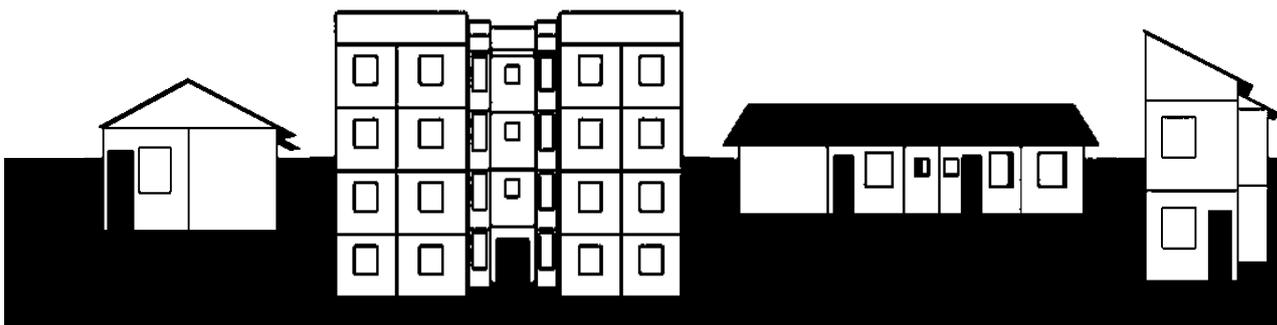
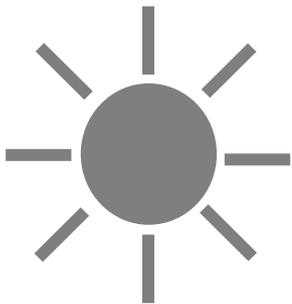


Influência das
propriedades
térmicas da
envolvente opaca no
desempenho de
habitações de
interesse social em
São Carlos, SP

Tássia Helena Teixeira Marques



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO DE SÃO CARLOS

Tássia Helena Teixeira Marques

Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Karin Maria Soares Chvatal

Apoio:
Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP

São Carlos
2013

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

M357i Marques, Tássia Helena Teixeira
Influência das propriedades térmicas da envolvente
opaca no desempenho de habitações de interesse social
em São Carlos, SP / Tássia Helena Teixeira Marques;
orientador Karin Maria Soares Chvatal. São Carlos,
2013.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo,
2013.

1. Envolvente opaca de habitações. 2. Transmitância
térmica. 3. Absortância térmica. 4. Simulação de
desempenho térmico. 5. Paredes. 6. Coberturas. 7. NBR
15575. 8. RTQ-R. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Arquiteta e Urbanista Tássia Helena Teixeira Marques

Título da dissertação: "Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP".

Data da defesa: 22/11/2013.

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. **Karin Maria Soares Chvatal (orientadora)**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

APROVADA

Profa. Tit. **Lucila Chebel Labaki**
(Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP)

APROVADA

Profa. Assoc. **Rosana Maria Caram**
(Instituto de Arquitetura e Urbanismo - USP)

aprovada

Presidente e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura Urbanismo: Professor Associado **Márcio Minto Fabrício**

DEDICATÓRIA

À amiga Marieli Lukiantchuki, exemplo de pessoa, profissional e pesquisadora, que me ensinou, entre tantas outras belas coisas, que podem ser necessárias 99 tentativas para que a centésima atinja o seu objetivo.

AGRADECIMENTOS

"Diante da vastidão do tempo e da imensidão do universo, é um imenso prazer dividir um planeta e uma época com você."

Carl Sagan

Agradeço, sincera e profundamente:

À Deus.

Aos meus pais, Cleber e Tânia, e aos meus irmãos Daniel, Danilo, Thaís, Telma e Denys, pelo apoio incondicional, pela presença, pelas orações, e pela importância que sempre terão em minha vida. Em especial ao meu irmão Denys, pela companhia durante o mestrado, pela ajuda em todos os momentos e principalmente na revisão deste trabalho.

À professora Karin Chvatal, grande responsável pelo meu amadurecimento enquanto pesquisadora, pela excelência na orientação e pelo exemplo profissional passado.

Às professoras Lucila Chebel Labaki, Kelen Dornelles e Rosana Caram, pela contribuição e pelo incentivo imprescindíveis ao longo da pesquisa, na Qualificação e na Defesa final.

À FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO – FAPESP, por apoiar este trabalho.

Aos amigos e amigas presentes durante o Mestrado (ou além dele), listados aqui em ordem alfabética por medo de que outra ordem possa atribuir maior ou menor importância à qualquer um deles: Adriana Almeida, Adrielle Favini, Ana Paula Tavares, Ariel Lazzarin, Cristiane Bueno, Daniel Polistchucky, Debora Verniz, Fernanda Faria, Fernando Cavalcanti, Gabriela Miglino, Helenice Sacht, Isabel Morim, Isabella Denzin, Jacqueline Souza, Josiane Nogueira, Juliana Lukiantchuki, Kattia Villadiego, Leticia Mattaraia, Lizeth Rodriguez, Lyda Patiño, Mariana Goulart, Marieli Lukiantchuki, Natália Calvi, Nicole Oliveira, Rafaela Izeli, Raquel Arata, Rodrigo Jabur e Rosilene Brugnera. Obrigada pela presença (próxima ou à distância, constante ou passageira – mas sempre especial) em minha vida.

À Carla e Florent Mármol, que me receberam em sua casa durante minha estadia em Marselha. Um agradecimento muito especial, pelas conversas, pelos passeios, pelas risadas e pelas boas lembranças.

Ao Victor Roriz, pela ajuda nas explorações do modelo e do software *EnergyPlus*.

Ao Fernando Westphal, por ter intermediado meu primeiro contato com o software *EnergyPlus*, e por, através de sua empolgação, ter me despertado o interesse para a área de simulação.

Ao arquiteto Silmar Fattori, da Caixa Econômica Federal, e aos arquitetos Irene Rizzo e Paulo Pignanelli, da Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU), pela

gentileza em fornecerem informações sobre tipologias habitacionais durante a fase de levantamentos da pesquisa.

Aos professores Mohamed Belmaziz, Alain Guyot e Aziz Boukara, da École Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille (ENSA), pela acolhida em Marselha e pelo auxílio na revisão de parâmetros de modelagem e na análise de dados climáticos.

A todos os funcionários do Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pela gentileza em auxiliar sempre que necessário. Ao Sérgio Celestini, Alessandro Souza, Lucinda Silva, Fátima Mininel, Mara Santos, José Zanardi, Paulo Ceneviva, Daniel Picon, Oswaldo de Andrade e Evandro Bueno. Em especial a: Marcelo Celestini (o querido Marcelinho) e Geraldo Pereira, pela atenção sempre solícita, pela paciência e pelo apoio fundamentais para o desenvolvimento deste mestrado.

Aos funcionários do Laboratório de Construção Civil do IAU: Sérgio Trevelin, Sérgio Pratavieira, Paulo Albertini, e aos "agregados" Donizetti Becaro, José Renato Dibo, Odinei Carlos e Pedro Mattia, pelos cafezinhos, pelas conversas e por tantos bons momentos vividos no LCC.

Ao Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo e todos os seus professores, pelo importante papel desempenhado em minha formação.

A todos que de alguma forma contribuíram com esta pesquisa, os meus sinceros agradecimentos.

"A recompensa reside no esforço, e não no resultado obtido. O esforço total é a vitória plena."

Mahatma Gandhi

RESUMO

MARQUES, Tássia Helena Teixeira. **Influência das propriedades térmicas da envolvente opaca no desempenho de habitações de interesse social em São Carlos, SP.** 2013. 143p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

O objetivo principal desta pesquisa é analisar a influência da transmitância térmica da envolvente opaca (paredes e coberturas) e de outros parâmetros (cor das superfícies exteriores, ventilação natural e inércia térmica) que interferem no desempenho térmico de edifícios habitacionais de interesse social no clima da cidade de São Carlos, SP. Após levantamento de dados em construtoras e em órgãos públicos e privados ligados à habitações, foi selecionado um modelo unifamiliar térreo representativo desta tipologia para a análise. Como a pesquisa baseia-se em simulações paramétricas de desempenho térmico, inicialmente é feito um estudo sobre padrões de modelagem de habitações, identificando quais elementos são mais relevantes. Definidos os parâmetros da modelagem, procede-se à verificação dos valores máximos de propriedades da envoltória prescritos na norma *NBR 15575 – Edificações habitacionais - Desempenho*, e no regulamento *RTQ-R: Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais*. Esta análise fornece indícios sobre a dificuldade em fixar valores desta propriedade para o fechamento opaco, uma vez que seu desempenho é definido pelas características da envoltória como um todo. Por fim, são realizadas três séries de simulações paramétricas, variando-se a transmitância térmica de paredes e coberturas, a inércia das paredes externas, as cores das superfícies expostas à radiação solar, o aproveitamento de ventilação natural e o uso de cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos). De acordo com os resultados, verifica-se que os melhores desempenhos térmicos estão associados a baixos valores de transmitância da envoltória opaca das habitações. Contudo, percebe-se que as faixas de valores tornam-se muito tênues quando analisa-se o desempenho conjunto dos parâmetros da envoltória. Conclui-se que há uma dificuldade no estabelecimento dos limites de transmitância sem considerar a totalidade de fatores que influem no comportamento térmico da habitação. Isso implica em uma análise conjunta dos materiais de paredes e coberturas e das cores das superfícies exteriores (transmitância, capacidade térmica e absorvância). Além disso, critérios que considerem períodos de verão e inverno de acordo com predominância no clima da cidade e ainda outras características, como porcentagem de área envidraçada por orientação de fachada, devem ser considerados nas análises.

Palavras-chave: Envolvente opaca de habitações; Transmitância térmica; Absorvância térmica; Simulação de desempenho térmico; Paredes; Coberturas; NBR 15575; RTQ-R.

ABSTRACT

MARQUES, Tássia Helena Teixeira. **Influence of the thermal properties of the opaque envelope in the thermal performance of social housing in São Carlos, SP.** 2013. 143p. Master thesis – Architecture and Urban Planning Institute of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2013.

The main objective of this research is to analyze the influence of the thermal transmittance of the opaque envelope (walls and roof) and other parameters (color of the exterior surfaces, natural ventilation and thermal mass) that affect the thermal performance of social housing in the city of São Carlos, SP. After a research in public and private agencies related to housing construction, a single-family model was selected for the studies. First, it was carried out a study on parameters of the simulation models, identifying which elements are most relevant for the *software*. Defined the parameters of the models, it was made a verification of maximum values of properties of the envelope prescribed in the standard NBR 15575 - Residential Buildings - Performance and in the regulation RTQ -R: Technical Regulation for the quality level of energy efficiency in residential buildings. This analysis provides evidence of the difficulty of setting values of this property (U-value) for the opaque envelope, since its performance is defined by the thermal characteristics of the envelope as a whole. Finally, it was made three series of parametric simulations varying the thermal transmittance of walls and roofs, the thermal inertia of the external walls, the colors of the surfaces exposed to solar radiation, the use of natural ventilation and the use of internal loads (occupancy, lighting and equipment). The results indicate that the best performances are associated with low thermal transmittance of the opaque envelope of housing. However, it is clear that the ranges of transmittance values become very tenuous when we analyze the performance of all parameters of the envelope. We conclude that to establish limits of transmittance values results is an incomplete analysis of the thermal performance of the building. It is necessary to consider all factors that influence the thermal behavior of housing, which involves the analysis of the materials of walls and roofs and the colors of exterior surfaces. It is also important to adopt different criteria to consider summer and winter according to predominance in the climate of the city, and to consider in the analysis the percentage of glass area of the exterior envelope.

Keywords: Housing opaque envelope; Thermal transmittance; Thermal absorptance; Simulation of thermal performance; Walls; Roof; NBR 15575 ; RTQ -R.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parâmetros especificados pela norma NBR 15220.....	36
Figura 2: Mapa das oito zonas bioclimáticas brasileiras.....	37
Figura 3: Procedimento de avaliação de desempenho térmico segundo a NBR 15575.....	41
Figura 4: Exemplo de etiqueta para edificações.....	46
Figura 5: Vistas das tipologias modeladas para o <i>EnergyPlus</i>	64
Figura 6: Formato de apresentação do <i>plug-in Open Studio</i>	65
Figura 7: Análise do arquivo climático <i>epw</i> pelo diagrama de Givoni.....	81
Figura 8: Formato de apresentação do IDF Editor.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo a NBR 15220	39
Tabela 2: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo a NBR 15220	39
Tabela 3: Tamanho de aberturas para ventilação segundo a NBR 15220	39
Tabela 4: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo a NBR 15575	42
Tabela 5: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo a NBR 15575	43
Tabela 6: Tamanho de aberturas para ventilação segundo a NBR 15575	43
Tabela 7: Desempenho térmico mínimo, intermediário e superior	44
Tabela 8: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo o RTQ-R	47
Tabela 9: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo o RTQ-R	48
Tabela 10: Tamanho de aberturas para ventilação segundo o RTQ-R	48
Tabela 11: Comparativo de valores para o desempenho térmico de paredes: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R	52
Tabela 12: Comparativo de valores para o desempenho térmico de coberturas: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R	53
Tabela 13: Comparativo de tamanhos de aberturas para ventilação: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R	54
Tabela 14: Tipologias selecionadas	64
Tabela 15: Dados gerais sobre as tipologias	65
Tabela 16: Orientações das tipologias	66
Tabela 17: Padrão de ocupação RTQ-R	69
Tabela 18: Atividades dos usuários RTQ-R	69
Tabela 19: Padrão de uso RTQ-R	70
Tabela 20: Padrão de uso de iluminação RTQ-R	71
Tabela 21: Potência de iluminação RTQ-R	71
Tabela 22: Padrão de equipamentos RTQ-R	71
Tabela 23: Principais dados de entrada	72
Tabela 24: Principais parâmetros das simulações	73
Tabela 25: Etapa 1 das simulações paramétricas	74
Tabela 26: Etapa 2 das simulações paramétricas	76
Tabela 27: Etapa 3 das simulações paramétricas	78
Tabela 28: Dados de temperaturas e umidade para a cidade de São Carlos	80
Tabela 29: Graus-hora de desconforto anual para São Carlos	84
Tabela 30: Faixas de conforto mensais para a cidade de São Carlos	84
Tabela 31: Desempenho térmico mínimo, intermediário e superior para a Zona 4	87
Tabela 32: Roteiro de cada etapa das simulações	89
Tabela 33: Temperaturas finais do solo obtidas para cada situação	91
Tabela 34: Temperaturas do solo a 0,50m de profundidade de acordo com arquivo climático	91
Tabela 35: Resultados para os testes de temperatura do solo	92
Tabela 36: GH de desconforto em cada orientação - TA	93
Tabela 37: Temperaturas máximas e mínimas em cada orientação - TA	93
Tabela 38: GH de desconforto em cada orientação - TB	94
Tabela 39: Temperaturas máximas e mínimas em cada orientação - TB	95
Tabela 40: TA - Resultados para os testes: medidas da geometria, caixilhos, venezianas e beirais	98
Tabela 41: TB - Resultados para os testes: medidas da geometria, caixilhos, venezianas e beirais	100
Tabela 42: Propriedades térmicas de paredes e coberturas segundo a NBR 15575 e o RTQ-R	102
Tabela 43: Atendimento aos métodos simplificado e de simulação da NBR 15575	109
Tabela 44: Vistas e perspectiva TA	134
Tabela 45: Dados das zonas TA	134

Tabela 46: Dados das janelas TA.....	134
Tabela 47: Área envidraçada em relação às fachadas TA	135
Tabela 48: Vistas e perspectiva TB.....	135
Tabela 49: Dados das zonas TB, considerando um apartamento térreo.....	135
Tabela 50: Dados das janelas TB, considerando um apartamento térreo.....	135
Tabela 51: Área envidraçada em relação às fachadas TB, considerando um apartamento térreo	136
Tabela 52: Propriedades dos materiais para o modelo.....	137

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Graus-hora de resfriamento e aquecimento em São Carlos, SP	84
Gráfico 2: Avaliação das paredes pelo dia típico de verão	104
Gráfico 3: Avaliação das paredes pelos graus-hora anuais de calor.....	104
Gráfico 4: Avaliação das paredes pelo dia típico de inverno.....	105
Gráfico 5: Avaliação das paredes pelos graus-hora anuais de frio.....	105
Gráfico 6: Avaliação das coberturas pelo dia típico de verão	106
Gráfico 7: Avaliação das coberturas pelos graus-hora anuais de calor	107
Gráfico 8: Avaliação das coberturas pelo dia típico de inverno	107
Gráfico 9: Avaliação das coberturas pelos graus-hora anuais de frio	108
Gráfico 10: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor.....	112
Gráfico 11: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio	113
Gráfico 12: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor	113
Gráfico 13: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio	115
Gráfico 14: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor.....	117
Gráfico 15: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio	118
Gráfico 16: Etapa 2 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor.....	119
Gráfico 17: Etapa 2 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio	120
Gráfico 18: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor.....	121
Gráfico 19: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio	122
Gráfico 20: Etapa 3 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor.....	123
Gráfico 21: Etapa 3 - TA - Coberturas com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio	124
Gráfico 22: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor	140
Gráfico 23: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio.....	141
Gráfico 24: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor	142
Gráfico 25: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio.....	143

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Principais dados da NBR 15220	35
Quadro 2: Principais dados da NBR 15575	40

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.....	32
Equação 2.....	32
Equação 3.....	33
Equação 4.....	33
Equação 5.....	33
Equação 7.....	33

LISTA DE SIGLAS

λ = condutividade térmica

α = absorvência à radiação solar

$^{\circ}\text{Ch}$ = graus-hora

A= abertura para ventilação

a= difusividade térmica

b= efusividade térmica

c= calor específico

C= capacidade térmica

e= espessura

EP= *EnergyPlus*

FS= fator de calor solar

FT= fator de correção da transmitância

FV= fator de ventilação

GH= graus-hora

R= resistência térmica

Ren/h= renovação por hora

Rse= resistência superficial externa

Rsi= resistência superficial interna

Rt= resistência térmica total

T= temperatura

TA= Tipologia A

TB= Tipologia B

U= transmitância térmica

ρ = densidade de massa aparente

φ = atraso térmico

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	16
LISTA DE TABELAS	17
LISTA DE GRÁFICOS	19
LISTA DE QUADROS.....	20
LISTA DE EQUAÇÕES	21
LISTA DE SIGLAS	22
SUMÁRIO	24
1. INTRODUÇÃO.....	28
1.2. OBJETIVOS	29
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1. A ENVOLTÓRIA E SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS	31
2.1.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS OPACOS	31
2.2. NORMAS E REGULAMENTO SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES NO BRASIL	34
2.2.1. NBR 15220: DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	34
2.2.1.1. ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO	37
2.2.1.2. DIRETRIZES CONSTRUTIVAS	38
2.2.2. NBR 15575: EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO.....	40
2.2.2.1. PROCEDIMENTO NORMATIVO SIMPLIFICADO	42
2.2.2.2. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	43
2.2.3. RTQ-R: REGULAMENTO TÉCNICO DA QUALIDADE PARA O NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS	46
2.2.3.1. PRÉ-REQUISITOS.....	47
2.2.3.2. MÉTODO PRESCRITIVO	48
2.2.3.3. MÉTODO DE SIMULAÇÃO	49
2.2.4. COMPARAÇÕES ENTRE OS DOCUMENTOS: NBR 15220, NBR 15575 E RTQ-R	50
2.3. IMPACTO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ENVOLVENTE OPACA NO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO	55
2.3.1. INFLUÊNCIA DA TRANSMITÂNCIA E DA INÉRCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES.....	56
3. METODOLOGIA	63
3.1. MODELOS ANALISADOS.....	63
3.1.1. TIPOLOGIAS	63

3.1.2.	ORIENTAÇÃO	65
3.2.	PARÂMETROS ANALISADOS	66
3.2.1.	ENVOLTÓRIA	66
3.2.1.1.	PAREDES EXTERNAS.....	66
3.2.1.2.	COBERTURA.....	67
3.2.1.3.	COR DAS SUPERFÍCIES EXTERIORES	68
3.2.1.4.	PAREDES INTERNAS	68
3.2.2.	VENTILAÇÃO MÍNIMA: CONDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO DE AR	68
3.2.3.	APROVEITAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL.....	69
3.2.4.	GANHOS INTERNOS.....	69
3.3.	DADOS DE ENTRADA: “TESTES DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA MODELAGEM PARA A SIMULAÇÃO”	72
3.4.	DADOS DE ENTRADA: “AVALIAÇÃO DOS VALORES-LIMITE DE TRANSMITÂNCIA ESTABELECIDOS PELA NBR 15575 E PELO RTQ-R”	73
3.5.	DADOS DE ENTRADA: “ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO DA TIPOLOGIA ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DOS VALORES DE TRANSMITÂNCIA DA ENVOLTÓRIA OPACA”	74
3.5.1.	SÉRIE 1.....	74
3.5.2.	SÉRIE 2.....	76
3.5.3.	SÉRIE 3.....	77
3.6.	DADOS CLIMÁTICOS	79
3.6.1.	ARQUIVO CLIMÁTICO TRY.....	79
3.6.2.	CLIMA DA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP.....	80
3.6.3.	ANÁLISE DO CLIMA ATRAVÉS DE ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO	82
3.6.3.1.	ÍNDICE DE CONFORTO DA ASHRAE-55	82
3.6.3.2.	ÍNDICE DE CONFORTO BASEADO EM GIVONI.....	83
3.6.3.3.	ÍNDICE DE CONFORTO BASEADO EM TEMPERATURAS FIXAS AO LONGO DE TODO ANO	83
3.6.3.4.	RESULTADOS.....	83
3.7.	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	85
3.7.1.	PROGRAMA DE SIMULAÇÃO.....	85
3.8.	FORMAS DE ANÁLISES DOS RESULTADOS	86
3.8.1.	GRAUS-HORA DE DESCONFORTO ANUAL (GH)	86
3.8.2.	DESCONFORTO ANUAL RELATIVO.....	86
3.8.3.	TEMPERATURAS PARA O DIA TÍPICO DE VERÃO E INVERNO DADAS PELA NBR 15575	87
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	88
4.1.	TESTES DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA MODELAGEM PARA A SIMULAÇÃO	88

4.1.1.	INTRODUÇÃO	88
4.1.2.	MÉTODOS.....	88
4.1.3.	IMPACTO DA TEMPERATURA DO SOLO NOS MODELOS.....	90
4.1.3.1.	RESULTADOS.....	91
4.1.4.	IMPACTO DOS PARÂMETROS: MEDIDAS INTERNAS, CAIXILHOS, VENEZIANAS E BEIRAIS .	92
4.1.4.1.	DEFINIÇÃO DA ORIENTAÇÃO PARA ANÁLISE	92
4.1.4.2.	HABITAÇÃO TÉRREA.....	97
4.1.4.3.	HABITAÇÃO MULTIFAMILIAR	99
4.2.	AVALIAÇÃO DOS VALORES-LIMITE DE TRANSMITÂNCIA ESTABELECIDOS PELA NBR 15575 E PELO RTQ-R.....	102
4.2.1.	INTRODUÇÃO	102
4.2.2.	MÉTODOS.....	102
4.2.2.1.	PAREDES COM DIFERENTES VALORES DE U E ABSORTÂNCIAS	103
4.2.2.2.	COBERTURAS COM DIFERENTES VALORES DE U E ABSORTÂNCIAS	105
4.2.2.3.	COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO E SIMPLIFICADO DA NBR 15575	108
4.3.	DESEMPENHO DA TIPOLOGIA ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA ENVOLTÓRIA OPACA – TRANSMITÂNCIA, ABSORTÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA	111
4.3.1.	SÉRIE 1.....	111
4.3.2.	SÉRIE 2.....	117
4.3.3.	SÉRIE 3.....	121
5.	CONCLUSÕES.....	125
5.1.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	126
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128
7.	APÊNDICES	134
	APÊNDICE A – Tipologias: vistas, perspectivas e dados gerais dos modelos	134
	APÊNDICE B – Propriedades dos materiais utilizados nas simulações.....	136
	APÊNDICE C – Gráficos de resultados completos da Série 1	140

1. INTRODUÇÃO

Projetistas da área civil lidam com um grande número de variáveis na realização de um projeto, dentre elas as relacionadas ao conforto térmico. Define-se conforto térmico como o estado da mente que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico (ASHRAE, 2010). Assim, o desconforto pode ser sentido quando há diferença no balanço entre a energia produzida e a energia perdida pelo corpo, tendo assim a sensação de calor ou frio. O adequado desempenho térmico de edificações garante o conforto dos usuários e surge como uma ferramenta importante para o projeto de edifícios, contribuindo ainda para a economia de energia e alinhando-se ao tema da eficiência energética.

Em linhas gerais, o desempenho térmico de uma edificação depende da orientação do edifício como um todo (seus ambientes de maior permanência e seu entorno), das condições de ventilação, das características dos materiais opacos e transparentes e das trocas de calor que ocorrem através deles. Em um projeto de habitação social as características das superfícies opacas da envoltória (paredes e cobertura) e as estratégias de ventilação natural são os principais elementos que influenciam o conforto, uma vez que dificilmente esta tipologia apresenta sistema de ar condicionado e as superfícies transparentes não representam uma área significativa.

No Brasil, há duas normas e um regulamento que tratam do desempenho térmico de habitações: a NBR 15220 (ABNT, 2005), a NBR 15575 (ABNT, 2013) e o RTQ-R (INMETRO, 2010). A primeira refere-se especificamente a habitações unifamiliares de interesse social. Ela estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro, dividindo o território em oito zonas para as quais apresenta estratégias de adequação ao conforto térmico de acordo com o clima. A segunda norma, NBR 15575, trata de edificações residenciais, independente da área do projeto, e abrange diversos outros itens além do desempenho térmico, como aspectos estruturais e acústicos, por exemplo. Essa norma apresenta métodos para verificação do desempenho térmico dessas habitações, classificando-o em mínimo, intermediário ou superior. Já o RTQ-R – Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais – (INMETRO, 2010), especifica critérios de conforto térmico em habitações, apresentando um método de classificação das mesmas, que varia de A (melhor desempenho/eficiência energética) a E. Todos estes documentos, ao fornecerem indicações sobre as propriedades dos materiais da envoltória, fixam valores máximos para a transmitância (U) dos fechamentos. Tais valores variam para cada uma das oito zonas definidas no zoneamento bioclimático prescritas na NBR 15220, e entram em desacordo entre si (no caso, a NBR 15220 contra a NBR 15575 e o RTQ-R, que apresentam as mesmas exigências).

A limitação da transmitância térmica da envoltória a valores máximos é baseada em normas internacionais européias ou norte-americanas, onde o clima frio exige um maior

isolamento da envolvente, isto é, a fixação de um baixo valor de U. No presente trabalho, procura-se verificar se esse modelo também seria adequado também para o caso brasileiro. Em estudos anteriores (CHVATAL, 2007; CHVATAL; CORVACHO, 2009), verificou-se o impacto do aumento do nível de isolamento da envoltória no conforto térmico e no consumo de energia em edifícios em Portugal e no Sul Europeu. A pesquisa demonstrou que apesar do alto isolamento ser bom para o período de inverno, no verão uma envolvente altamente isolada pode dificultar a dissipação do calor para o exterior, aumentando a temperatura interior acima do limite de conforto. O estudo demonstra ainda a necessidade de especificações distintas quanto ao desempenho térmico para edifícios habitacionais e comerciais, devido aos diferentes ganhos internos e à diferente participação do usuário no conforto térmico em cada caso.

1.2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal analisar a influência conjugada da transmitância térmica da envolvente opaca (paredes e coberturas) e de outros parâmetros (cor das superfícies exteriores, inércia das paredes externas, e inserção ou não de ventilação natural e ganhos internos) que interferem no desempenho térmico de edifícios habitacionais de interesse social em São Carlos, SP. Os estudos são feitos para uma geometria de edifício unifamiliar térrea isolada, obtida através de pesquisa junto à Caixa Econômica Federal.

Tendo-se em conta o tipo de projeto e o clima considerados, são objetivos específicos do trabalho:

- verificar o impacto da transmitância térmica das paredes e de coberturas separadamente;
- comparar os valores de transmitância térmica estudados com os limites máximos prescritos pela norma NBR 15575 e pelo regulamento RTQ-R, verificando a adequabilidade da forma de indicação dessa propriedade nesses documentos;
- indicar recomendações referentes a parâmetros de desempenho térmico das envoltórias de habitações de interesse social para o clima de São Carlos.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Após a introdução e apresentação dos objetivos da pesquisa, inicia-se o **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica**, que trata das propriedades termofísicas da envoltória, das normas e regulamento brasileiros referentes ao tema, e da influência da transmitância térmica e da inércia térmica no desempenho térmico de edificações.

No capítulo seguinte, **Capítulo 3: Metodologia**, apresentam-se os parâmetros principais das simulações (tipologias, dados de entrada dos modelos e suas variáveis, o clima da cidade de São Carlos) e as formas de análise dos resultados.

O **Capítulo 4: Resultados e Discussão** apresenta três subitens. No item **4.1: Testes da influência de parâmetros da modelagem para a simulação**, realiza-se a etapa de adequação da modelagem abrangendo dois modelos de habitações. Nesta etapa foram definidos quais parâmetros de entrada são mais significativos para o modelo a ser simulado. No item **4.2: Avaliação dos valores-limite de transmitância estabelecidos pela NBR 15575 e pelo RTQ-R**, são apresentados os resultados das simulações paramétricas correspondentes ao modelo unifamiliar térreo, analisados a partir de dois métodos: dias típicos de verão e inverno e graus-hora de resfriamento e aquecimento anuais. No item **4.3: Desempenho da tipologia escolhida em função das propriedades térmicas da envoltória opaca – transmitância, absorvância e capacidade térmica**, são apresentados os resultados das simulações paramétricas de séries de estudos para o modelo térreo, variando a transmitância e a absorvância (cor) das paredes e coberturas associadas a alterações de padrão de ventilação, de ganhos internos e de inércia térmica das paredes externas.

A seguir, o **Capítulo 5: Conclusões**, apresenta as conclusões da pesquisa e também algumas considerações para futuros trabalhos na área.

Por fim, os **Capítulos 6 e 7** contêm as referências bibliográficas e os anexos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A ENVOLTÓRIA E SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

Segundo a definição do INMETRO (2010), a envoltória da edificação consiste nos planos externos do edifício, formados por fachadas, empenas, cobertura, brises, marquises, aberturas, e quaisquer elementos que os compõem. A envoltória constitui uma divisão entre os ambientes interno e externo da edificação e, por esse motivo, tem uma grande influência em seu desempenho térmico. É necessário conhecer o papel que cada um de seus elementos desempenha nas trocas de energia com o ambiente interno para que se possa projetar uma edificação confortável e eficiente energeticamente. É fundamental também diferenciar os elementos da envoltória da edificação em opacos e transparentes (ou translúcidos). Materiais opacos não possibilitam a transmissão direta da radiação solar ao ambiente interno, já os transparentes transmitem uma grande parcela de radiação. A intensidade das trocas de energia através desses fechamentos será função da:

- radiação solar incidente;
- condutividade, resistência, transmitância, difusividade, efusividade e capacidade térmica dos materiais da envoltória;
- absorvância e refletância dos fechamentos opacos – correspondente à sua cor;
- temperaturas interna e externa da edificação.

A seguir são descritas as propriedades que atuam nas trocas de calor da envoltória opaca.

2.1.1. PROPRIEDADES DOS MATERIAIS OPACOS

- *Absorvância (α) e refletância (ρ)*

Em um fechamento opaco, a transmissão de calor ocorre quando há diferença de temperatura entre as superfícies internas e externas, sendo o sentido do fluxo da superfície mais quente para a superfície mais fria. Em um primeiro momento, a superfície externa do fechamento recebe calor do meio por radiação e por convecção. Parte da radiação solar incidente no fechamento opaco é absorvida e a outra é refletida, de acordo com a absorvância (α) e a refletância (ρ) do material. Portanto, a soma das duas variáveis é sempre: $\alpha + \rho = 1$. Superfícies de cores escuras, muito comuns em materiais de construção, possuem alta absorvância ou grande capacidade de absorver calor, enquanto que superfícies claras apresentam uma maior refletância, ou seja, grande capacidade de refletir o calor. Quando o ar próximo a esta superfície externa da parede se aquece, formam-se movimentos convectivos, e o ar – fluido – trocará calor com a parede – sólido.

A radiação solar é responsável pela maior parte dos ganhos de calor de uma edificação, de forma que a absorvância e a refletância das superfícies externas exercem grande influência na carga térmica total da mesma. A aplicação de cor sobre as superfícies externas funciona como um filtro das radiações solares, influenciando, de acordo com seu índice de reflexão e absorção, as condições térmicas no interior do edifício.

- *Condutividade (λ), Resistência (R) e Transmitância térmica (U)*

Condução é a segunda fase do processo de transferência de calor em um fechamento opaco. Após os raios solares terem incidido no fechamento – troca de calor com o meio exterior, por radiação e convecção –, ocorre um aumento da temperatura superficial do mesmo. Pela diferença de temperatura gerada entre a superfície externa e a interna do fechamento, ocorrerá uma troca de calor entre as elas – denominada de transferência por condução. A intensidade do fluxo térmico envolvido nesse processo depende, além da diferença de temperatura, da condutividade térmica (λ) e da espessura (e) do material. A condutividade térmica (λ), segundo a ABNT (2005), corresponde à propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de 1 W/m^2 , quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro. É expressa em $\text{W}/(\text{m.K})$. Os materiais que apresentam altas ou baixas condutividades são classificados como condutores ou isolantes térmicos, respectivamente.

Ao contrário da condutividade, a resistência térmica estabelece a resistência do fechamento à passagem de calor. Sabendo-se a espessura (e) do material e sua condutividade (λ), tem-se a possibilidade de calcular o valor de sua resistência térmica (R) pela expressão a seguir:

$$R = \frac{e}{\lambda} \text{ (m}^2 \text{ K / W)} \quad \text{(Equação 1)}$$

Nos fechamentos com camadas heterogêneas, isto é, de materiais distintos, a resistência térmica total é a soma da resistência de cada camada homogênea mais as resistências superficiais externa (R_{se}) e interna (R_{si}) (ABNT, 2005).

O inverso da resistência térmica (R) se denomina transmitância térmica (U), definida como o fluxo de calor que, na unidade de tempo e por unidade de área, passa através do componente (ABNT, 2005):

$$U = \frac{1}{R} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K)} \quad \text{(Equação 2)}$$

Quanto menor a transmitância de determinado material, maior o isolamento que ele oferece.

- *Difusividade (a), Efusividade (b) e Capacidade térmica (C) ou Inércia*

Em um regime variável, o valor das temperaturas varia no interior e no exterior do fechamento, e parte do calor que entra por uma das faces da parede serve para aquecê-la, de modo que a quantidade de calor que sai pela outra face é menor: o fluxo térmico é variável. Neste regime, chamado de regime térmico variável, os dois pontos que trocam calor alteram temperaturas durante essa troca. Este fenômeno depende da difusividade térmica (a) do material, isto é, da velocidade de difusão do calor através desse material, e da efusividade térmica do material (b) – capacidade de absorver ou restituir um fluxo de calor ou uma potência térmica, sendo:

$$a = \lambda / \rho \cdot c \text{ (m}^2/\text{s)} \quad \text{(Equação 3)}$$

$$b = \sqrt{\lambda} \cdot \rho \cdot c \text{ (W/m}^2\text{K)}^{1/2} \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde: a = difusividade térmica do material (m²/s); b = efusividade térmica do material ((W/m²K)^{1/2}); λ = condutividade térmica do material (W/m K); ρ = densidade de massa aparente do material (Kg/m³); e c = calor específico do material (J/Kg K).

A difusividade e a efusividade são aplicadas no cálculo do atraso e do amortecimento térmicos. O atraso indica o tempo necessário para uma onda térmica atravessar um componente construtivo. Já o amortecimento (μ) de um sistema construtivo é o quociente entre as amplitudes de variação das temperaturas interna e externa ("Ai" e "Ae"):

$$\mu = A_i / A_e \text{ (adimensional)} \quad \text{(Equação 5)}$$

Um valor alto de amortecimento significa grandes oscilações da temperatura interna.

O atraso e o amortecimento compõem a inércia térmica, que depende da espessura (e), do calor específico (c) e da densidade da parede (ρ). A capacidade térmica (C) da vedação, que corresponde à sua inércia, é dada por:

$$C = e \cdot c \cdot \rho \text{ (J/m}^2\text{K)} \quad \text{(Equação 6)}$$

Trata-se da capacidade de um componente construtivo de armazenar energia em forma de calor e liberá-lo após certo tempo. Contando com uma inércia térmica adequada e elementos com adequado isolamento, pode-se assegurar conforto interior durante as horas de maior temperatura e radiação solar no exterior. Quanto maior for a inércia da construção, maior será seu atraso térmico e menor o amortecimento.

2.2. NORMAS E REGULAMENTO SOBRE DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES NO BRASIL

As propriedades termofísicas dos materiais opacos estão relacionadas com as condições de conforto térmico proporcionadas pelo sistema construtivo de uma edificação, e requisitos mínimos para algumas delas (transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico, absorvância) estão presentes nas normas e regulamentos térmicos nacionais. Segundo Dilkin e Schneider (1999), a especificação das características térmicas do envelope de edificações residenciais, reunidas em forma de norma, é fundamental para garantir condições adequadas de conforto aos ocupantes e proporcionar economia de energia.

Em 2005 surge a primeira norma para avaliação de desempenho térmico de habitações no Brasil, intitulada “NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações” (ABNT, 2005). Em 2013, é lançada a norma “NBR 15575 - Edifícios habitacionais – Desempenho” (ABNT, 2013), a qual apresenta uma seção exclusiva voltada para o desempenho térmico. Além delas, o governo brasileiro lançou em 2003 o programa Procel Edifica: Plano de Ação para Eficiência Energética em Edificações, como meio de reduzir o consumo de energia nas edificações. Desta forma desenvolveu-se o terceiro documento nacional relacionado ao desempenho térmico de habitações: o “Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais” / RTQ-R, publicado em novembro de 2010. Apresenta-se na sequência, em linhas gerais, cada um dos documentos, destacando-se os itens mais relevantes relacionados a esta pesquisa. Após a apresentação das duas normas e do regulamento é feita uma comparação entre eles, em termos de propriedades da envoltória recomendadas para cada zona bioclimática.

2.2.1. NBR 15220: DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

A seguir, tem-se um quadro-resumo (Quadro 1) referente à norma NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005):

NORMA/ANO	PARTES	ABRANGÊNCIA	APLICAÇÃO
Desempenho térmico de edificações/ 2005	<p>Parte 1: Definições, símbolos e unidades</p> <p>Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações</p> <p>Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social</p> <p>Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida</p> <p>Parte 5: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo método fluximétrico</p>	Habitações unifamiliares de interesse social	Não obrigatório*
<p>*Normas técnicas não são leis, mas têm força obrigatória, embasadas pelo Código Civil: "Art.615: Concluída a obra de acordo com o ajuste, [...], o dono é obrigado a recebê-la. Poderá, porém, rejeitá-la, se o empreiteiro se afastou [...] das regras técnicas em trabalhos de tal natureza" (BRASIL, 2004, Art.615).</p>			

Quadro 1: Principais dados da NBR 15220. Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

Para a pesquisa, a análise concentra-se principalmente na parte 3, onde é feita a divisão do país em oito zonas bioclimáticas, abrangendo um conjunto de estratégias construtivas destinadas às habitações unifamiliares de interesse social. Nesta parte, a NBR 15220 indica para cada zona bioclimática os seguintes parâmetros: aberturas para ventilação, proteção das aberturas, vedações externas e estratégias de condicionamento térmico passivo. A seguir (**Figura 1**), tem-se um resumo geral dos parâmetros e suas especificações:

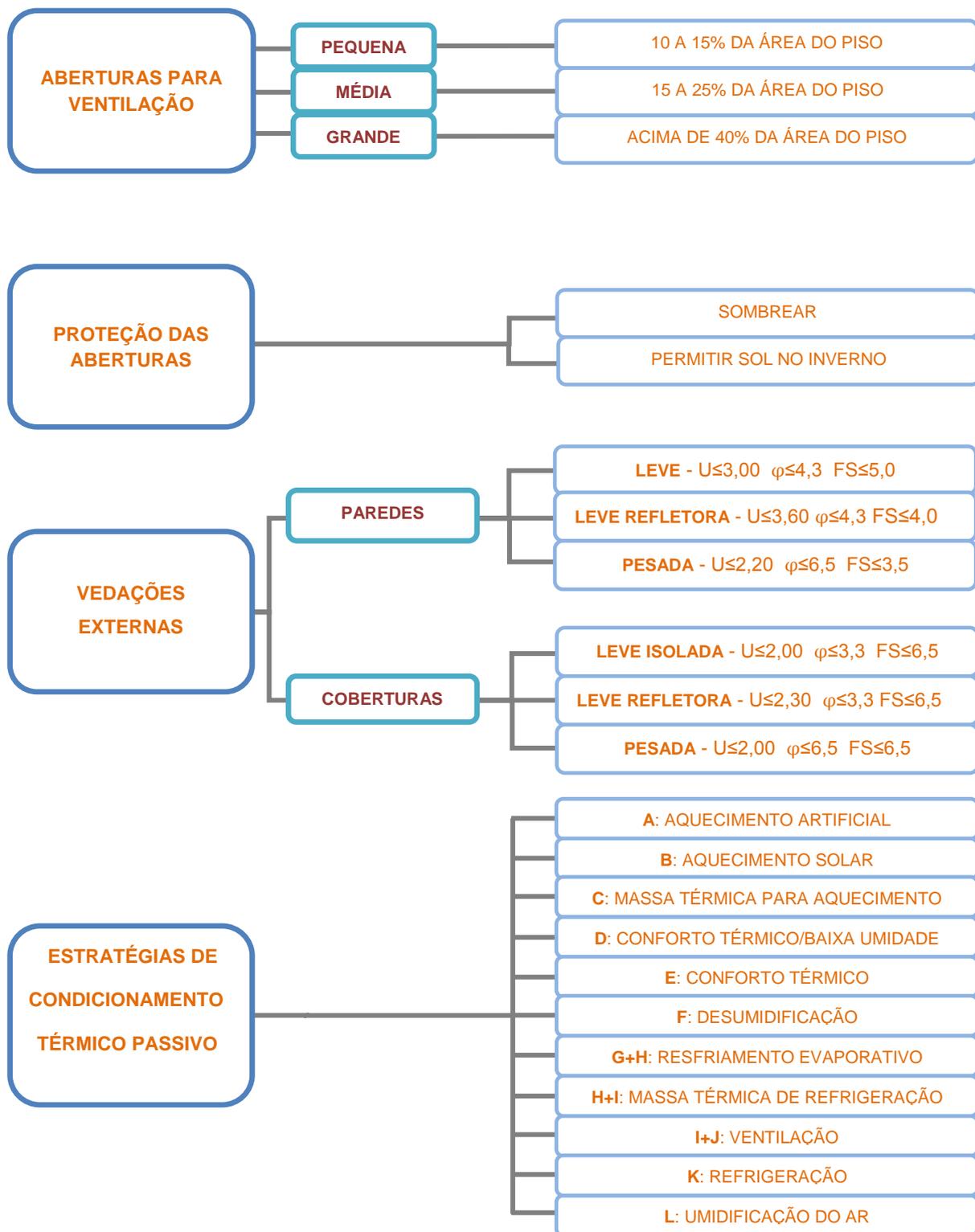


Figura 1: Parâmetros especificados pela norma NBR 15220

2.2.1.1. ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO

Para realizar a divisão do Brasil em zonas bioclimáticas, estabelecida na parte 3 da NBR 15220, foram usados dados das normais climatológicas de 1931-1960 e de 1961-1990, além de outras fontes de medições no período de 1961 a 1990 (ABNT, 2005). Analisando-se as médias das temperaturas máximas e mínimas e as médias das umidades relativas do ar mensais, bem como as coordenadas geográficas de cada cidade, o Brasil foi dividido em 6500 células (cada célula de 36Km \times 36Km), agrupadas em oito zonas. As zonas foram numeradas de 1 a 8, sendo 1 a mais fria, com cidades localizadas no Sul do Brasil, e 8 a mais quente, compreendendo partes das regiões Norte e Nordeste (ver

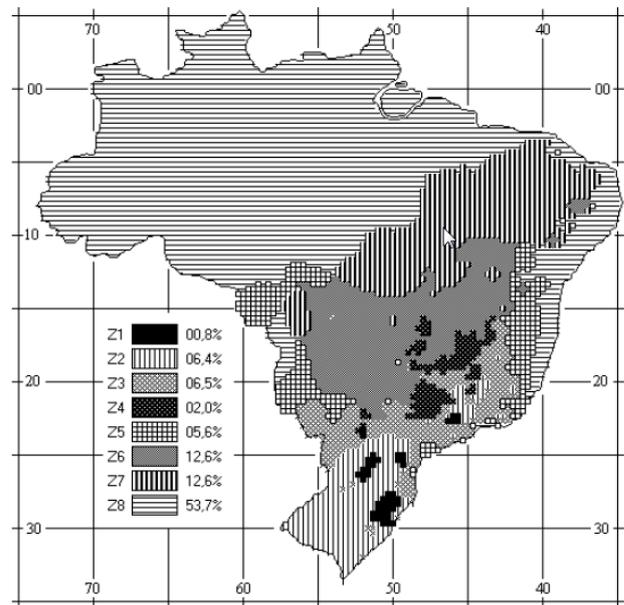


Figura 2: Mapa das oito zonas bioclimáticas brasileiras. **Fonte:** ABNT, 2005

Figura 2). São Carlos (SP), clima foco desta pesquisa, é classificado na zona bioclimática 4.

Para cada zona, foram criadas recomendações técnico-construtivas visando otimizar o desempenho térmico das edificações a partir de sua adequação climática. Entretanto, diversos estudos mostram deficiências no zoneamento bioclimático apresentado e nas diretrizes construtivas da NBR 15220. Bogo (2008) analisou as limitações da norma de desempenho térmico, constatando a ausência de diretrizes construtivas visando o controle solar no verão para a zona bioclimática 3 e a ausência de recomendação de valores máximos de fator solar para elementos transparentes da edificação. Sacht e Rossignolo (2009) também apontam disparidades no zoneamento, a partir de resultados distintos de desempenho em cidades de mesma zona, especificamente as cidades de São Paulo e Florianópolis – de climas bastante diferenciados –, inseridas na zona bioclimática 3, e São Carlos e Brasília, na zona bioclimática 4. Sorgato (2009), em estudo sobre a influência da área de superfície exposta ao exterior e do tamanho do ambiente no desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente, obteve resultados que contradizem os limites máximos de atraso térmico estabelecidos pela NBR 15220-3 para a zona bioclimática 3 (Florianópolis). Os casos simulados com paredes e coberturas com maior atraso térmico que o da norma apresentaram melhor desempenho que os casos com componentes que atendem os critérios da norma (SORGATO, 2009).

Roriz (2012b; 2012c) afirma a necessidade de revisão da norma, e destaca os seguintes motivos: para o zoneamento, a equipe de pesquisadores baseou-se apenas em Normas Climatológicas de pouco mais de 300 municípios, obtendo por interpolação os demais dados climáticos, o que agregou elevados níveis de incerteza ao mapa resultante; o zoneamento foi proposto especificamente para habitações unifamiliares de interesse social, mas, por ser o único disponível nas normas técnicas brasileiras, tem sido aplicado para qualquer tipo de edificação, provocando análises equivocadas; os limites geográficos de cada zona foram estabelecidos a partir de critérios baseados na Carta Bioclimática de Givoni¹ e nas Planilhas de Mahoney² – foram definidas as estratégias bioclimáticas recomendáveis para cada ponto do mapa e, posteriormente, foram agrupados em uma mesma zona os pontos correspondentes a estratégias semelhantes –, este procedimento resultou em zonas com baixa homogeneidade climática e em um número total de zonas insuficiente para refletir a diversidade climática do Brasil. Assim, espera-se em breve a revisão da norma e o lançamento de um novo zoneamento, mais criterioso e adequado às características climáticas de cada cidade.

2.2.1.2. DIRETRIZES CONSTRUTIVAS

As diretrizes apresentadas na parte 3 da NBR 15220 são diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social e têm caráter orientativo para projetos, visando um adequado conforto térmico dos usuários.

De forma geral, a norma fornece recomendações de limites para as propriedades de transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar, além de propor estratégias bioclimáticas de projeto conforme cada zona. Segundo Giglio e Barbosa (2006), trata-se de um método simplificado, pois depende apenas do cálculo das propriedades térmicas de um componente construtivo isoladamente.

A seguir (**Tabela 1**, **Tabela 2**, **Tabela 3**), são colocadas as indicações relativas às paredes externas, coberturas e aberturas para as zonas bioclimáticas 1 a 8.

¹ Givoni concebeu uma carta bioclimática para edifícios não condicionados baseada nas temperaturas internas dos ambientes. Segundo ele, os usuários desses edifícios aceitam melhor as oscilações de temperatura e velocidade do ar, devido à sua adaptação. A carta bioclimática relaciona a temperatura do ar e a umidade relativa, identificando nove zonas de atuação que correspondem à estratégias bioclimáticas a serem adotadas no edifício (GIVONI, 1992).

² Segundo o método tradicional dos Quadros de Mahoney, ou Planilhas de Mahoney (UNITED NATIONS, 1971), a análise é feita a partir de três planilhas: a primeira é preenchida com os dados climáticos locais, a segunda determina a frequência dos indicadores do clima local a partir da análise desses dados, e a terceira fornece as recomendações para o projeto arquitetônico. Trata-se de um método de análise climática simplificada, que indica diretrizes para projeto de edificações.

Tabela 1: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo a NBR 15220

DESEMPENHO TÉRMICO DE PAREDES EXTERNAS								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	$U \leq 3,0$		$U \leq 3,6$	$U \leq 2,2$	$U \leq 3,6$	$U \leq 2,2$		$U \leq 3,6$
Fator solar (FS) (%)	$FS \leq 5,0$		$FS \leq 4,0$	$FS \leq 3,5$	$FS \leq 4,0$	$FS \leq 3,5$		$FS \leq 4,0$
Atraso térmico (φ) (horas)	$\varphi \leq 4,3$			$\varphi \geq 6,5$	$\varphi \leq 4,3$	$\varphi \geq 6,5$		$\varphi \leq 4,3$

Notas

FS= Fator Solar, calculado como $FS=4.U.\alpha$, onde U=transmitância térmica do elemento e α =absortância à radiação solar da superfície do elemento.

φ = Atraso térmico, calculado como $\varphi=0,7284\sqrt{Rt Ct}$, onde Rt=resistência térmica de superfície a superfície do componente e Ct=capacidade térmica do componente.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

Tabela 2: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo a NBR 15220

DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS									
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8	
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	$U \leq 2,0$							$U \leq 2,3 FT^*$	
Fator solar (FS) (%)	$FS \leq 6,5$								
Atraso térmico (φ) (horas)	$\varphi \leq 3,3$					$\varphi \geq 6,5$		$\varphi \leq 3,3$	

Notas

*FT: Na zona 8, também serão aceitas coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores tabelados, desde que atendam às seguintes exigências: a) contenham aberturas para ventilação em no mínimo dois beirais opostos; b) as aberturas para ventilação ocupem toda a extensão das fachadas respectivas. Nesses casos, em função da altura total para ventilação, os limites aceitáveis da transmitância térmica poderão ser multiplicados pelo fator FT, $FT = 1,17 - 1,07h^{-1,04}$, onde FT: fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da Zona Bioclimática 8; h: altura da abertura em dois beirais opostos (cm). Para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT=1.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

Tabela 3: Tamanho de aberturas para ventilação segundo a NBR 15220

ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO									
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8	
Aberturas para ventilação (A) (% da área do piso)	Médias: $15 < A < 25$					Pequenas: $10 < A < 15$		Grandes: $A > 40$	
Sombreamento das aberturas dos dormitórios	Permitir sol durante o inverno			Sombrear aberturas					

Notas

$A=nxAp$, em %, onde A é a abertura para ventilação, n o valor de porcentagem recomendado e Ap a área de piso do ambiente.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005

2.2.2. NBR 15575: EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS - DESEMPENHO

A norma NBR 15575 - Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), estabelece requisitos de desempenho de acordo com cada sistema das habitações, dividindo-as em sistemas estruturais, sistemas de pisos, sistemas de vedações verticais internas e externas, sistemas de coberturas e sistemas hidrossanitários. Entre as exigências a serem cumpridas, uma refere-se especificamente ao desempenho térmico das edificações. Abaixo, os principais dados da NBR 15575 (**Quadro 2**):

NORMA/ANO	PARTES	ABRANGÊNCIA	APLICAÇÃO
Edifícios habitacionais – Desempenho/2012	<p>Parte 1: Requisitos gerais</p> <p>Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais</p> <p>Parte 3: Requisitos para os sistemas de piso</p> <p>Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas</p> <p>Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas</p> <p>Parte 6: Requisitos para os sistemas hidrossanitários</p>	Habitações unifamiliares ou multifamiliares em geral, alguns requisitos são específicos para habitações de até cinco pavimentos	Não obrigatório*
<p>*Normas técnicas não são leis, mas têm força obrigatória, embasadas pelo Código Civil: "Art.615: Concluída a obra de acordo com o ajuste, [...], o dono é obrigado a recebê-la. Poderá, porém, rejeitá-la, se o empreiteiro se afastou [...] das regras técnicas em trabalhos de tal natureza" (BRASIL, 2004, Art.615).</p>			

Quadro 2: Principais dados da NBR 15575. Fonte: Adaptado de ABNT, 2013

O foco da NBR 15575 não está na prescrição de como os sistemas são construídos, mas sim nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e para o comportamento em uso de seus subsistemas.

Quanto ao comportamento térmico da habitação, considera-se que o mesmo depende do comportamento interativo entre fachada, cobertura e piso. A NBR 15575 permite que o desempenho térmico seja avaliado para um sistema, de forma independente, ou para a edificação como um todo, definindo requisitos de conforto térmico de acordo com a região de implantação da obra e as características bioclimáticas dadas na NBR 15220 – 3.

A NBR 15575 tem sido bastante discutida no meio acadêmico e da construção civil em geral. Com sua validação espera-se um grande impacto no mercado construtivo, porém ela apresenta ainda algumas lacunas sobre certos procedimentos, o que gerou seu processo de revisão. Contudo, a versão revista, liberada para consulta pública entre 16 de julho e 13 de setembro de 2012, apresenta algumas falhas. Uma de suas deficiências principais em relação ao desempenho térmico corresponde à definição de dias típicos de projeto de verão e inverno nos quais a edificação deve ser avaliada. Brito et al (2012) analisaram a caracterização dos dias de projeto a serem utilizados no procedimento de simulação da norma, constatando a importância dos dados climáticos referentes a estes

dias na avaliação da edificação. Pelos resultados de sua pesquisa, Brito et al (2012) destacam que ao menos dois fatores devem ser obrigatoriamente considerados na definição dos dias típicos: a amplitude diária da temperatura do ar e a radiação solar total global diária. Na versão revista, são apresentados dados de dias típicos para capitais apenas, permitindo que cidades que não possuem dados climáticos disponíveis utilizem dados de cidades próximas dentro da mesma zona bioclimática – não informando, contudo, critérios para definir a semelhança entre climas de cidades distintas e nem métodos para estabelecer os dias típicos a partir dos dados disponíveis.

Para avaliar as edificações quanto à adequação ao desempenho térmico, a norma estabelece dois procedimentos: normativo simplificado – que é uma espécie de lista de pré-requisitos a serem cumpridos –, e informativo por medição – para edificações existentes e/ou protótipos. O método de avaliação por meio de simulação computacional é oferecido como uma alternativa caso o edifício não cumpra os requisitos pelo método simplificado, sendo considerado também um método informativo. Destes, os que interessam à pesquisa são o procedimento normativo simplificado, por apresentar as recomendações de valores de transmitância da envoltória, e o método da simulação computacional. A **Figura 3** a seguir esquematiza a avaliação de desempenho térmico estipulada pela norma:

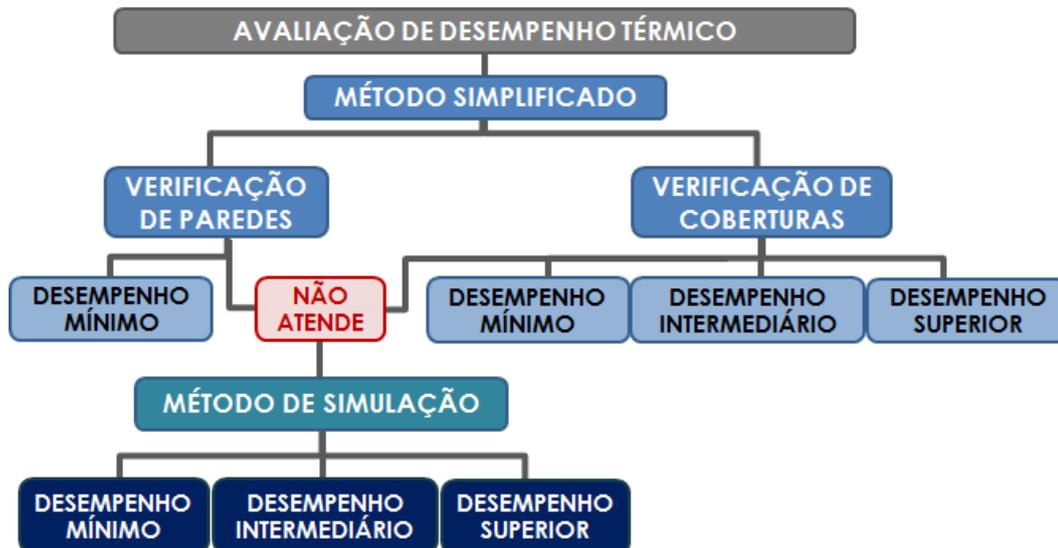


Figura 3: Procedimento de avaliação de desempenho térmico segundo a NBR 15575

A seguir, apresenta-se a descrição dos métodos simplificado e de simulação.

2.2.2.1. PROCEDIMENTO NORMATIVO SIMPLIFICADO

No procedimento simplificado, verifica-se o atendimento aos requisitos e critérios para fachadas (vedações verticais externas) e coberturas, conforme descrito nas partes 4 e 5 da NBR 15575. De modo resumido, os procedimentos para a avaliação de desempenho térmico por meio do procedimento simplificado seguem os seguintes passos:

- determinação de U e C da parede (transmitância e capacidade térmica);
- se U e C estiverem dentro do limite recomendado, determina-se a área das aberturas para ventilação;
- se as aberturas estiverem dentro dos valores recomendados por Códigos de Obras, Códigos Sanitários Estaduais ou, em último caso, pelos valores estabelecidos na norma, considera-se que a edificação possui o nível de desempenho mínimo recomendado, M.

Caso algum destes itens não esteja dentro dos valores recomendados, o desempenho será considerado insatisfatório.

Neste procedimento deve ser feita também a avaliação da cobertura:

- determina-se U da cobertura (transmitância térmica);
- analisa-se em função da cor, se o U encontrado for menor que o U limite, o desempenho sobe para o nível I, intermediário;
- se o U calculado for maior que o U limite, o desempenho é considerado insatisfatório.

Abaixo, são colocados os valores de transmitância e capacidade térmica de paredes recomendados para cada zona bioclimática (**Tabela 4**).

Tabela 4: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo a NBR 15575

DESEMPENHO TÉRMICO DE VEDAÇÕES VERTICAIS (NÍVEL MÍNIMO OBRIGATÓRIO)								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Transmitância térmica (U) (W/m ² .K)	U ≤ 2,5		U ≤ 3,7 se α ≤ 0,6 U ≤ 2,5 se α > 0,6					
Capacidade térmica (CT) (kJ/m ² .K)	CT ≥ 130							sem exigência

Fonte: Adaptado de ABNT, 2013

No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de $\lambda \leq 0,065$ W/(m.K) e $Rt > 0,5$ (m².K)/W, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar.

Para as coberturas, a norma indica apenas o valor de transmitância térmica, sem mencionar a capacidade térmica do sistema (**Tabela 5**).

Tabela 5: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo a NBR 15575

DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS (NÍVEL MÍNIMO OBRIGATÓRIO)								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	$U \leq 2,3$		$U \leq 2,3$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 1,5$ se $\alpha > 0,6$			$U \leq 2,3$ FV se $\alpha \leq 0,4$ $U \leq 1,5$ FV se $\alpha > 0,4$		

Notas:

A norma indica que o Fator de Ventilação (FV) é estabelecido na ABNT NBR 15220, porém esta última não faz nenhuma referência ao FV, mas sim ao FT (fator de correção da transmitância). Valores de transmitância térmica considerando-se fluxo térmico descendente.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2013

Quanto ao tamanho de aberturas para ventilação, a norma indica que os ambientes de permanência prolongada devem seguir as exigências da legislação específica do local da obra, incluindo Códigos de Obras, Códigos Sanitários e outros. Caso não haja requisitos de ordem legal, devem ser adotados os seguintes valores (**Tabela 6**):

Tabela 6: Tamanho de aberturas para ventilação segundo a NBR 15575

ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO (NÍVEL MÍNIMO OBRIGATÓRIO)								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Aberturas para ventilação (A) (% da área do piso)	Aberturas Médias: $A \geq 7$						Aberturas Grandes: $A \geq 12$ – região Norte $A \geq 8$ – regiões Nordeste e Sudeste	

Notas:

Para o tamanho de aberturas, deve-se seguir legislação específica do local da obra (Códigos de obras, Códigos Sanitários, etc), e apenas na inexistência destes aplica-se o disposto na Norma.

Usa-se a fórmula $A=100x(Aa/Ap)$, em %, onde A é a abertura para ventilação, Aa é a área de ventilação efetiva por janelas, e Ap é a área de piso do ambiente.

Nas zonas 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas no período frio.

Valores válidos para ambientes de longa permanência – salas, cozinhas e dormitórios.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2013

2.2.2.2. PROCEDIMENTO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

No método da simulação computacional, verifica-se o atendimento aos requisitos e critérios por meio de simulação do desempenho térmico do edifício como um todo. São feitas comparações entre a temperatura externa e a temperatura interna dos ambientes de maior permanência, para os dias típicos de verão e inverno.

Os dados climáticos para a definição dos dias típicos devem ser baseados na norma, que fornece dados climáticos e de localização geográfica para as capitais. Caso a cidade analisada não possua dados climáticos disponíveis, recomenda-se escolher uma cidade da mesma zona bioclimática que tenha clima semelhante – como dito anteriormente, a norma não especifica os critérios de semelhança a serem avaliados e nem o método para determinar o dia típico a partir dos dados disponíveis. Se a cidade em questão não possuir semelhança climática com nenhuma outra cidade que tenha dados disponíveis, a norma recomenda evitar o método da simulação.

Quanto ao programa a ser utilizado, recomenda-se o uso do software *EnergyPlus*. Podem ser usados também outros programas validados pela ASHRAE Standard 140 (ASHRAE, 2004), que determinem o comportamento térmico da construção em exposição dinâmica ao clima e que reproduzam os efeitos da inércia térmica.

Para a modelagem, cada ambiente da edificação deve constituir uma zona térmica.

Quanto às propriedades térmicas dos materiais e componentes construtivos, deve-se usar, na seguinte ordem:

- dados obtidos por ensaios em laboratório;
- dados obtidos junto aos fabricantes; e
- dados disponibilizados na NBR 15220-2.

Para o desempenho térmico no verão e no inverno, a habitação deve apresentar as seguintes condições térmicas em seu interior, em relação às condições do ambiente externo (**Tabela 7**):

Tabela 7: Desempenho térmico mínimo, intermediário e superior

		ZONAS BIOCLIMÁTICAS							
NÍVEL DE DESEMPENHO		1	2	3	4	5	6	7	8
VERÃO	Mínimo	$T_{i, \text{máx}} \leq T_{e, \text{máx}}$							
	Intermediário	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 2 \text{ }^\circ\text{C})$						$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 1 \text{ }^\circ\text{C})$	
	Superior	$T_{i, \text{máx}} \leq (T_{e, \text{máx}} - 4 \text{ }^\circ\text{C})$						$T_{i, \text{máx}} \leq T_{e, \text{máx}} - 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $T_{i, \text{mín}} \leq (T_{e, \text{mín}} + 1 \text{ }^\circ\text{C})$	
INVERNO	Mínimo	$T_{i, \text{mín}} \geq (T_{e, \text{mín}} + 3 \text{ }^\circ\text{C})$				Não necessita de verificação			
	Intermediário	$T_{i, \text{mín}} \geq (T_{e, \text{mín}} + 5 \text{ }^\circ\text{C})$							
	Superior	$T_{i, \text{mín}} \geq (T_{e, \text{mín}} + 7 \text{ }^\circ\text{C})$							

Notas

$T_{i, \text{máx}}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e, \text{máx}}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

$T_{i, \text{mín}}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e, \text{mín}}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2013

Para o método de avaliação por simulação de edifícios em fase de projeto, deve-se simular todos os ambientes da unidade e analisar os resultados de dormitórios e salas, considerando as seguintes condições:

1. Recintos adjacentes de outras unidades (geminadas ou multipavimentos) devem ser considerados com a mesma condição térmica do ambiente simulado;
2. A edificação deve ser orientada conforme a implantação. Caso não esteja definida, considerar a orientação mais crítica do ponto de vista térmico (que receba maior insolação nos ambientes de longa permanência), sendo recomendado:

- a) Verão: janela do dormitório ou sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada ao norte; caso não seja possível, o ambiente deve ter ao menos uma janela voltada ao oeste;
 - b) Inverno: janela do dormitório ou sala voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste; caso não seja possível, o ambiente deve ter ao menos uma janela voltada ao sul;
 - c) Obstrução no entorno: considerar paredes e janelas expostas desobstruídas (sem a presença de edificações ou vegetação nas proximidades que modifiquem a incidência de sol e/ou vento). Pode-se considerar edificações de um mesmo complexo, por exemplo um condomínio, desde que previstas para habitação no mesmo período;
 - d) Obstrução por elementos construtivos previstos na edificação: dispositivos de sombreamento devem ser considerados na simulação;
3. Adotar taxa de ventilação de 1 ren/hora, para o ambiente e para a cobertura;
 4. Absortância da cobertura: considerar em relação ao material especificado para o telhado;
 5. Absortância da parede: considerar a cor definida no projeto. Se não houver, simular para três situações:
 - a) Cor clara $\alpha = 0,3$;
 - b) Cor média $\alpha = 0,5$;
 - c) Cor escura $\alpha = 0,7$;
 6. Desconsiderar fontes internas de calor - ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral;
 7. Para unidades habitacionais isoladas, o procedimento será feito para a unidade como um todo. Para conjuntos habitacionais de edificações térreas, deve-se selecionar a unidade com maior número de paredes expostas para a análise. Para edifícios multipisos, deve-se analisar a unidade do último andar, que apresente cobertura exposta;
 8. Caso o edifício não atenda aos requisitos estabelecidos para o dia típico de verão, deve-se simular novamente considerando-se as seguintes alterações:
 - a) Ventilação: considerar taxa de ventilação de 5 ren/h e janelas sem sombreamento;
 - b) Sombreamento: inserção de proteção solar externa ou interna com dispositivo capaz de cortar no mínimo 50% da radiação solar direta, com taxa de ventilação de 1 ren/h;
 - c) Ventilação e sombreamento: combinação das duas estratégias anteriores, inserção de dispositivo de proteção solar e taxa de ventilação de 5 ren/h.

Isto é, pode-se optar por uma das três opções para atingir o nível de desempenho mínimo no verão. Como a norma não considera o uso de estratégia de ventilação natural,

- Áreas de uso comum: avaliam-se os requisitos relativos à eficiência do sistema de iluminação artificial, do sistema de aquecimento de água, dos elevadores, das bombas centrífugas, dos equipamentos e de eventuais bonificações.

A regulamentação fornecida pelo RTQ-R de cálculo para o nível de eficiência energética é estruturada de forma a oferecer duas opções de verificação: o método prescritivo e o de simulação. Antes da verificação por um destes métodos, deve ser visto também o atendimento aos pré-requisitos da envoltória estabelecidos no documento. Após a verificação destes requisitos, será utilizado um dos dois métodos descritos para a obtenção dos graus-hora de resfriamento e do consumo para aquecimento dos ambientes de longa permanência. Estes valores serão inseridos em uma equação que computará a pontuação da eficiência da envoltória do edifício analisado, que será convertida na escala de A a E.

2.2.3.1. PRÉ-REQUISITOS

O RTQ-R indica alguns parâmetros que devem ser adotados para que a edificação seja minimamente eficiente. Tais pré-requisitos para avaliação do desempenho da envoltória devem ser atendidos por paredes externas e coberturas de ambientes de permanência prolongada. No caso, o RTQ-R considera de permanência prolongada os seguintes ambientes: sala de estar, sala de jantar, sala íntima, dormitórios, escritório, e sala de TV. O não cumprimento destes pré-requisitos implica em nível E nos equivalentes numéricos da envoltória do ambiente para o cálculo da pontuação geral do edifício (**Tabela 8**, **Tabela 9**, **Tabela 10**). Ressalta-se que os valores das propriedades são os mesmos definidos pela NBR 15575.

Tabela 8: Valores de propriedades térmicas de paredes segundo o RTQ-R

PRÉ-REQUISITOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DA ENVOLTÓRIA: PAREDES								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Transmitância térmica (U) ($W/m^2.K$)	$U \leq 2,5$		$U \leq 3,7$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,5$ se $\alpha > 0,6$					
Capacidade térmica (CT) ($kJ/m^2.K$)	$CT \geq 130$							sem exigência

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Tabela 9: Valores de propriedades térmicas de coberturas segundo o RTQ-R

PRÉ-REQUISITOS PARA AVALIAR O DESEMPENHO DA ENVOLTÓRIA: COBERTURAS								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Transmitância térmica (U) (W/m ² .K)	U ≤ 2,3		U ≤ 2,3 se α ≤ 0,6 U ≤ 1,5 se α > 0,6			U ≤ 2,3 FT se α ≤ 0,4 U ≤ 1,5 FT se α > 0,4		

Notas:

A transmitância térmica a ser considerada é a média das transmitâncias de cada parcela das paredes externas, excluindo aberturas, ou da cobertura, ponderadas pela área que ocupam.

A absorvância solar a ser considerada para a avaliação no RTQ-R é a média das absorvâncias de cada parcela das paredes externas, excluindo aberturas, ou da cobertura, ponderadas pela área que ocupam.

FT: fator de correção da transmitância, indicado pela equação $FT = 1,17 - 1,07h^{-1,04}$, onde FT: fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da Zona Bioclimática 8; h: altura da abertura em dois beirais opostos (cm).

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Tabela 10: Tamanho de aberturas para ventilação segundo o RTQ-R

ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO								
ZONAS BIOCLIMÁTICAS	1	2	3	4	5	6	7	8
Abertura para ventilação (A) (%)	A ≥ 8					A ≥ 5		A ≥ 10

Notas:

O percentual de abertura para ventilação é calculado de acordo com a equação $A = 100 \times \left(\frac{A_v}{A_u}\right)$, onde A é o percentual de abertura para ventilação em relação à área útil do ambiente; A_v é a área efetiva de abertura para ventilação (m²); e A_u , a área útil do ambiente (m²).

Nas zonas 1 a 7 e nas cidades com médias mensais das temperaturas mínimas abaixo de 20°C, as aberturas para ventilação devem ser passíveis de fechamento durante o período de frio.

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Segundo o RTQ-R, ambientes de permanência prolongada devem possuir os percentuais de áreas mínimas de aberturas para ventilação. Ainda pelo Regulamento, toda unidade habitacional das zonas 2 a 8 deve possuir ventilação cruzada através do sistema de aberturas, atendendo à seguinte equação: $\frac{A_2}{A_1} \geq 0,25$, onde A_1 é o somatório das áreas efetivas de abertura para ventilação nas fachadas da orientação com maior área de abertura para ventilação (m²); e A_2 é o somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas das demais orientações (m²). Como pré-requisito para nível A, nos ambientes de permanência prolongada deve-se garantir condições de ventilação controlável pelo usuário com as devidas proteções à chuva.

2.2.3.2. MÉTODO PRESCRITIVO

Após a verificação dos pré-requisitos da envoltória, aplica-se o método prescritivo para determinar sua eficiência.

No método prescritivo, o desempenho térmico da envoltória da unidade é determinado pelo seu equivalente numérico (EqNumEnv), calculado por meio de

equações específicas para cada zona bioclimática, considerando o desempenho térmico da envoltória quando naturalmente ventilada.

Deve-se calcular o indicador de graus-hora de resfriamento (GHR) da unidade ponderado pelas áreas dos ambientes de permanência prolongada. Para as zonas bioclimáticas 1 a 4, calcula-se também o consumo relativo anual para aquecimento (CA). Os valores de graus-hora de resfriamento e de consumo de aquecimento terão pesos diferentes nas equações de acordo com a zona analisada, no caso das zonas de 1 a 4. Quanto mais fria a zona (zona 1), menor o peso do valor de graus-hora de resfriamento. Tal valor aumenta gradativamente até atingir a zona 4, onde o valor de GHR tem peso maior que o consumo de aquecimento. Para as zonas bioclimáticas 5 a 8, o cálculo se limita apenas aos graus-hora de resfriamento, uma vez que o consumo de aquecimento não é calculado para estas zonas.

2.2.3.3. MÉTODO DE SIMULAÇÃO

O RTQ-R descreve ainda o método de simulação, de caráter informativo, para determinar a eficiência da envoltória. A simulação computacional deve ser feita para ambos os casos: edificações naturalmente ventiladas e edificações condicionadas artificialmente.

O documento apresenta alguns requisitos em relação ao programa de simulação a ser utilizado, ao arquivo climático a ser inserido, e aos dados de entrada, como padrões de ocupação e temperatura do solo.

Para o método da simulação devem ser observadas as seguintes regras de modelagem:

1. Em uma unidade habitacional, cada ambiente deve ser modelado como uma zona térmica;
2. Para edifícios de até 10 pavimentos, devem ser modeladas todas as unidades dos pavimentos tipo, térreo e cobertura, sendo cada ambiente da unidade uma zona térmica;
3. Para edifícios com mais de 10 pavimentos segue-se a mesma regra do anterior, porém pode-se modelar apenas um pavimento tipo a cada cinco andares, ao invés de todos os pavimentos tipos;
4. Considerar dispositivos de sombreamento existentes no projeto;
5. O ático pode ser modelado como uma zona térmica;
6. Ambientes comuns de edificações multifamiliares podem ser modelados em uma única zona térmica, desde que não interfira na ventilação das unidades;
7. Garagens das unidades em contato com as mesmas devem ser modeladas como uma zona térmica.

O RTQ-R especifica também as condições de ventilação natural a serem simuladas, no caso da unidade naturalmente ventilada. São indicados os coeficientes de rugosidade do entorno, pressão superficial, descarga, e fluxo de ar por frestas, bem como o padrão de uso da ventilação. No caso de edificação condicionada artificialmente, são indicados todos os parâmetros do sistema de condicionamento de ar, como as temperaturas do termostato de refrigeração e de aquecimento, taxa de fluxo de ar por pessoa, eficiência do ventilador e do motor, padrão de uso, modo de operação do ventilador contínuo, razão entre o calor retirado/fornecido do ambiente e a energia consumida, e o número máximo de horas não atendidas do sistema.

Para ambos os casos de unidades naturalmente ventiladas e condicionadas artificialmente, são apresentadas tabelas com o padrão de ocupação (quantidade de pessoas, horários), padrão das atividades (taxas metabólicas), padrão de uso e potência da iluminação, e cargas internas de equipamentos.

Para a temperatura do solo nas simulações, o documento indica que seja calculada para cada mês do ano, baseando-se nas médias das temperaturas internas e externas da edificação para o clima em questão. Ele cita o uso do programa *Slab*, vinculado ao *EnergyPlus*, e ressalta que os valores de temperatura do solo dadas nos arquivos climáticos não são recomendados para a simulação.

Na simulação de uma edificação naturalmente ventilada, a metodologia de avaliação compara os indicadores de graus-hora de resfriamento dos ambientes de permanência prolongada da unidade com os níveis de eficiência das tabelas do arquivo climático usado na simulação. Tais níveis são indicados pelo PROCEL no endereço eletrônico do RTQ-R. Já para a simulação de uma edificação condicionada artificialmente, compara-se com estes níveis os consumos relativos para aquecimento e para refrigeração dos ambientes de permanência prolongada da unidade.

As unidades habitacionais que apresentam iniciativas que otimizem sua eficiência energética podem somar até um ponto à sua classificação geral.

2.2.4. COMPARAÇÕES ENTRE OS DOCUMENTOS: NBR 15220, NBR 15575 E RTQ-R

Há poucos estudos que analisam e comparam as normas e o regulamento entre si – talvez devido ao fato da NBR 15575 e do RTQ-R ainda serem instrumentos recentes. Giglio e Barbosa (2006), por exemplo, analisaram o desempenho de painéis em madeira sob a ótica da NBR 15220, da NBR 15575 (ainda em sua fase de projeto), e do método de graus-hora de desconforto (somatória da temperatura horária quando esta encontra-se fora da temperatura de conforto, sendo que quando seu valor é superior ao da temperatura de referência trata-se de graus-hora de resfriamento, e quando seu valor é inferior, trata-se de graus-hora de aquecimento). Os resultados obtidos sobre a adequação do desempenho

térmico em cada método foram contraditórios, constatando a necessidade de revisão das normas para aplicação em materiais alternativos como os painéis de madeira. Em seu estudo, para a análise de inverno de um modelo habitacional, a ausência de fontes internas de calor determinada pela NBR 15575 na configuração do protótipo resultou na não adequação térmica de um sistema de vedação bastante comum no país (tijolos cerâmicos de seis furos e reboco). Quanto à NBR 15220, embora a norma considere adequados os painéis em madeira de apenas 2,2 cm de espessura à zona bioclimática 3, as análises por simulação comprovaram grandes oscilações climáticas no interior do protótipo com essa vedação, ocasionando grande amplitude térmica interna e picos de temperatura elevados (GIGLIO; BARBOSA, 2006). Em estudo mais recente, Loura, Assis e Bastos (2011) efetuaram a aplicação do método prescritivo do RTQ-R e do método normativo simplificado da NBR 15575 em uma edificação multifamiliar localizada na cidade do Rio de Janeiro, zona bioclimática 8. Os autores levantaram alguns pontos falhos de ambas regulamentações, como a exigência de proteção solar obrigatória nos dormitórios estipulada pela NBR 15575, sem especificar como verificar este sombreamento, citando apenas que uma janela com veneziana já cumpre este requisito. Outro aspecto se refere ao cálculo de dispositivos de proteção solar do RTQ-R, cujos ângulos mínimos recomendados nem sempre são suficientes. No entanto, o documento não permite o aumento dos mesmos. A autora verificou a necessidade de maior coerência entre as avaliações de desempenho térmico feitas a partir desses instrumentos³.

A seguir são apresentadas tabelas comparativas entre os três documentos analisados quanto às indicações de cada um para os parâmetros de desempenho térmico, onde de fato notam-se divergências entre os valores de transmitância recomendados (**Tabela 11, Tabela 12, Tabela 13**).

³ Na versão revista da NBR 15575 (ABNT, 2013), o trecho sobre sombreamento das aberturas foi removido.

Tabela 11: Comparativo de valores para o desempenho térmico de paredes: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R

ZONAS BIOCLIMÁTICAS		1	2	3	4	5	6	7	8	
		PAREDES	Transmitância térmica (U) ($W/m^2 \cdot K$)	NBR 15220 - 3	$U \leq 3,0$		$U \leq 3,6$	$U \leq 2,2$	$U \leq 3,6$	$U \leq 2,2$
NBR 15 575 - 4	$U \leq 2,5$			$U \leq 3,7$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,5$ se $\alpha > 0,6$						
RTQ -R	$U \leq 2,5$			$U \leq 3,7$ se $\alpha \leq 0,6$ $U \leq 2,5$ se $\alpha > 0,6$						
Capacidade térmica (CT) ($kJ/m^2 \cdot K$)	NBR 15220 - 3		-							
	NBR 15 575 - 4		$CT \geq 130$							sem exigência
	RTQ -R		$CT \geq 130$							sem exigência
Fator solar (FS) (%)	NBR 15220 - 3		$FS \leq 5,0$	$FS \leq 4,0$	$FS \leq 3,5$	$FS \leq 4,0$	$FS \leq 3,5$	$FS \leq 4,0$		
	NBR 15 575 - 4		-							
	RTQ -R		-							
Atraso térmico (φ) (h)	NBR 15220 - 3		$\varphi \leq 4,3$		$\varphi \geq 6,5$	$\varphi \leq 4,3$	$\varphi \geq 6,5$	$\varphi \leq 4,3$		
	NBR 15 575 - 4		-							
	RTQ -R		-							

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005; ABNT, 2013 e INMETRO, 2010

Tabela 12: Comparativo de valores para o desempenho térmico de coberturas: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R

ZONAS BIOCLIMÁTICAS		1	2	3	4	5	6	7	8	
COBERTURAS	Transmitância térmica (U) (W/m ² .K)	NBR 15220 - 3	U ≤ 2,0						U ≤ 2,3 FT	
		NBR 15575 - 5	U ≤ 2,3		U ≤ 2,3 se α ≤ 0,6 U ≤ 1,5 se α > 0,6			U ≤ 2,3 FV se α ≤ 0,4 U ≤ 1,5 FV se α > 0,4		
		RTQ -R	U ≤ 2,3		U ≤ 2,3 se α ≤ 0,6 U ≤ 1,5 se α > 0,6			U ≤ 2,3 FV se α ≤ 0,4 U ≤ 1,5 FV se α > 0,4		
	Fator solar (FS) (%)	NBR 15220 - 3	FS ≤ 6,5							
		NBR 15575 - 5	-							
		RTQ -R	-							
	Atraso térmico (φ) (h)	NBR 15220 - 3	φ ≤ 3,3				φ ≤ 6,5		φ ≤ 3,3	
		NBR 15575 - 5	-							
		RTQ -R	-							

Notas:

NBR 15220:

- no caso de coberturas, entendida como o telhado+ático+forro, a transmitância térmica deve ser verificada para fluxo descendente. Ático se refere à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.
- coberturas com telha de barro sem forro podem ser aceitas na zona 8, desde que as telhas não sejam pintadas ou esmaltadas.
- na zona 8, também serão aceitas coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores tabelados, desde que: a) contenham aberturas para ventilação em no mínimo dois beirais opostos; b) as aberturas para ventilação ocupem toda a extensão das fachadas respectivas. Nesses casos, em função da altura total para ventilação, os limites aceitáveis da transmitância térmica poderão ser multiplicados pelo fator FT, $FT = 1,17 - 1,07h^{-1,04}$, onde FT: fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da Zona Bioclimática 8; h: altura da abertura em dois beirais opostos (cm). Para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT=1.

NBR 15575:

- FV, fator de ventilação. A norma indica que tal fator é estabelecido na NBR 15220 - 2, porém não encontra-se esta referência na norma de desempenho térmico. Há estudo que já indica este erro (LOURA; ASSIS; BASTOS, 2011).
- valores de transmitância térmica considerando-se fluxo térmico descendente.

RTQ-R:

- coberturas com telha de barro sem forro na Zona Bioclimática 8, que não sejam pintadas ou esmaltadas, não precisam atender às exigências.
- na Zona Bioclimática 8 também serão aceitas coberturas com transmitâncias térmicas acima dos valores estipulados, desde que: a) contenham aberturas para ventilação em, no mínimo, dois beirais opostos; e b) as aberturas para ventilação ocupem toda a extensão das fachadas respectivas. Nestes casos, em função da altura total para ventilação, os limites aceitáveis da transmitância térmica poderão ser multiplicados pelo fator de correção da transmitância (FT) indicado pela Equação: $FT = 1,17 - 1,07h^{-1,04}$, onde FT: fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da Zona Bioclimática 8; h: altura da abertura em dois beirais opostos (cm).

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005; ABNT, 2013 e INMETRO, 2010

Tabela 13: Comparativo de tamanhos de aberturas para ventilação: NBR 15220, NBR 15575 e RTQ-R

ZONAS BIOCLIMÁTICAS		1	2	3	4	5	6	7	8
		ABERTURAS	Aberturas para ventilação (A) (%)	NBR 15220 - 3	Médias: $15 < A < 25$				Pequenas: $10 < A < 15$
NBR 15 575 - 4	Médias: $A \geq 7$				Grandes: $A \geq 12$ – região Norte $A \geq 8$ – regiões Nordeste e Sudeste				
RTQ -R	$A \geq 8$				$A \geq 5$	$A \geq 10$			
Sombreamento das aberturas	NBR 15220 - 3	Permitir sol durante o inverno		Sombrear aberturas					
	NBR 15 575 - 4	-						-	
	RTQ -R	-						-	

Notas:

NBR 15220:

- onde A, em %, é a abertura para ventilação, em relação à área de piso do ambiente.
- não específica para quais ambientes os valores são válidos.

NBR 15575:

- usa-se a fórmula $A=100 \times (A_a/A_p)$, em %, onde A é a abertura para ventilação, A_a é a área de ventilação efetiva por janelas, e A_p é a área de piso do ambiente.
- nas zonas 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas no período frio.
- valores válidos para ambientes de longa permanência.

RTQ-R:

- o percentual de abertura para ventilação é calculado de acordo com a equação $A=100 \times (\frac{A_v}{A_u})$, onde A é o percentual de abertura para ventilação em relação à área útil do ambiente; A_v é a área efetiva de abertura para Ventilação (m^2); e A_u , a área útil do ambiente (m^2).
- nas zonas 1 a 7 e nas cidades com médias mensais das temperaturas mínimas abaixo de $20^\circ C$, as aberturas para ventilação devem ser passíveis de fechamento durante o período de frio.
- valores válidos para ambientes de permanência prolongada.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005; ABNT, 2013 e INMETRO, 2010

Quanto aos elementos construtivos, percebe-se que o principal fator limitado pelos três documentos é a transmitância de paredes e coberturas. Em relação à inércia, indiretamente será estabelecida pelo atraso térmico dado na NBR 15220 e pela capacidade térmica dada na NBR 15575 e no RTQ-R. Em relação à cor, a norma de desempenho térmico 15220 irá estabelecer o fator solar a ser alcançado, enquanto que os outros dois documentos irão atrelar este valor junto à transmitância, que variará para uma dada absorvância. Também são notadas diferenças quanto ao tamanho recomendado de aberturas das habitações para uma mesma zona. Entende-se que a divergência entre os valores de transmitância indicados pela NBR 15220 e pelos outros dois documentos, que apresentam recomendações semelhantes entre eles, abre espaço para questionamentos na busca de soluções construtivas para uma dada zona bioclimática.

2.3. IMPACTO DAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA ENVOLVENTE OPACA NO DESEMPENHO TÉRMICO DO EDIFÍCIO

Um projeto de edifícios de adequado desempenho térmico deve, segundo Aste, Angelotti e Buzzetti (2009), controlar as características termofísicas da envoltória da edificação, tais como sua transmitância (U) e inércia térmicas.

Aste, Angelotti e Buzzetti (2009) afirmam, referindo-se a casos europeus e de climas frios, que por muitos anos melhorar o desempenho térmico da envoltória do edifício significou predominantemente manter os valores de transmitância térmica dos elementos opacos e transparentes o mais baixo possível. Os chamados edifícios de baixa energia e casas passivas são geralmente baseados em níveis de isolamento elevado. No entanto, durante os últimos anos percebe-se que é um equívoco projetar edifícios que busquem bom desempenho térmico usando apenas o valor de U, apesar desta abordagem ainda se refletir em diversas regulamentações nacionais sobre economia de energia em edifícios. Também Orosa e Oliveira (2012) destacam que no passado as construções de parede de materiais pesados foram consideradas o principal método passivo para controlar o comportamento do ambiente interno. Segundo eles, porém, diversos estudos recentes (BADESCU; SICRE, 2003 (a); BADESCU; SICRE, 2003 (b); KRÜGER; GIVONI, 2008) têm mostrado que parâmetros como ganho solar e taxa de renovação do ar influenciam este ambiente interior.

De fato, segundo Assem (2009), edifícios estão expostos a uma série de elementos externos temporais que podem influenciar a quantidade de calor transferido através de seu envelope. Tais elementos incluem a radiação solar incidente, a temperatura de bulbo seco, a velocidade e direção do vento, e a umidade relativa. Além disso, uma construção compreende camadas de diferentes espessuras e elementos de diversas propriedades: condutividade térmica, densidade, permeabilidade à água e calor específico. O efeito combinado de tais camadas determina as características do envelope, que pode influenciar o ganho ou perda de calor em condições transientes para uma determinada temperatura interior. A quantidade de radiação solar incidente e absorvida na superfície externa é afetada pela orientação do edifício e o coeficiente de absorção solar de suas superfícies (ASSEM, 2009). Todos os parâmetros citados têm impacto no desempenho térmico da envoltória e conseqüentemente no desempenho do edifício como um todo, ou seja, no conforto térmico de seus usuários e em seu consumo energético.

Além das características termofísicas dos materiais das vedações, dados do projeto da edificação (forma, características climáticas do local, orientação, tamanho e proteção das aberturas) e do tipo de ocupação (padrão de uso de equipamentos, quantidade de usuários, atividade desempenhada e taxa de ventilação) também atuarão em seu desempenho térmico. O papel da transmitância e da inércia térmicas da envoltória do

edifício, portanto, deve ser analisado em conjunto com estes parâmetros, como indicam alguns estudos sobre o tema discutidos a seguir.

2.3.1. INFLUÊNCIA DA TRANSMITÂNCIA E DA INÉRCIA NO DESEMPENHO TÉRMICO DAS EDIFICAÇÕES

A presente pesquisa parte da análise dos valores de transmitância e de capacidade térmica recomendados nos documentos regulamentatórios existentes no Brasil atualmente: NBR 15220 (ABNT, 2005), NBR 15575 (ABNT, 2012) e RTQ-R (INMETRO, 2010). Todos são voltados ao desempenho térmico de habitações, e todos contêm em suas recomendações valores específicos para limitar a transmitância térmica da envoltória, além da capacidade térmica (NBR 15575 e RTQ-R) ou atraso térmico (NBR 15220), seja para as vedações verticais ou horizontais. Entretanto, discute-se se esta recomendação é a mais adequada para os climas e edificações brasileiros. Marques (2008), em um estudo sobre o desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social em Santa Catarina, constatou que apenas as propriedades térmicas dos componentes não asseguram o conforto no interior de uma edificação.

Em um estudo de Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009), os resultados de simulações indicaram que nem sempre transmitâncias térmicas baixas proporcionam ambientes mais confortáveis. Os autores simularam uma sala de escritório de 20m² em nove climas (Curitiba, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Brasília, Cuiabá, Belém, Boa Vista, Salvador e Florianópolis), considerando quatro tipos de paredes externas de concreto de 0.10m de espessura mas de diferentes condutividades, associadas a três taxas de ventilação. Em oito dos climas analisados (com exceção de Curitiba), o desconforto térmico em graus-hora (°Ch) de calor ou de frio acumulado em um ano apresentou-se diretamente proporcional às resistências térmicas das fachadas: resistências mais altas provocaram mais desconforto e vice-versa. Assim, o alto isolamento nem sempre se associa a um bom desempenho. Segundo eles, isso ocorre porque no Brasil, por apresentar um clima mais quente, o isolamento restringe as perdas de calor em edificações de altas cargas internas, o que pode gerar desconforto.

Chvatal (2007) já havia feito distinção entre os tipos de edifícios, residenciais ou não residenciais, quanto ao desempenho térmico. Ela estudou o aumento do isolamento da envolvente relacionado a outros parâmetros (ganhos internos, padrões de ventilação, sombreamento das janelas, cores externas dos materiais) em edificações habitacionais e de serviços, nos climas de Portugal e do sul europeu. Descobriu-se que nos edifícios habitacionais o aumento do isolamento deve estar associado ao controle dos ganhos solares no verão e a adequadas condições de ventilação natural, gerando economia de

consumo energético no inverno e evitando desconforto no verão. Já nos edifícios de serviços, que possuem altos ganhos internos, o aumento do isolamento traz desconforto no verão, elevando a temperatura no interior e aumentando o consumo de energia. Tal sobreaquecimento poderia ser trabalhado através de elementos de sombreamento, uso de ventilação natural e redução de ganhos internos. No entanto, Chvatal (2007) destaca que estes parâmetros são os de mais difícil controle em um edifício de serviços.

Esta é uma questão a ser analisada para cada clima específico, de acordo com o tipo de edificação e padrão de uso. Um estudo de Batista, Lamberts e Westphal (2005) investigou a influência de diferentes tipologias de cobertura no desempenho térmico de uma edificação sem ocupação de usuários e sem sistema de condicionamento artificial na cidade de Brasília, através de simulações com o programa computacional *EnergyPlus*. As simulações realizadas no estudo indicaram que o uso do isolamento térmico na cobertura (conjunto telha de barro + lâ de vidro + fôrro de pinus) apresentou melhor desempenho do que a opção com maior capacidade térmica (telha de barro e laje de concreto), considerando o clima em questão.

Também Specht et al (2010) avaliaram diversos tipos e disposições de materiais em paredes de tijolos maciços sob análise termoeconômica, através de modelagem matemática. Foi analisado apenas o componente construtivo em si, sem vinculá-lo a um tipo de edificação ou clima. Através dessa análise pode-se constatar que, apesar de o investimento inicial ser relativamente maior nas paredes mais espessas e/ou com isolamento térmico, estas apresentam um comportamento térmico muito superior às tradicionais, segundo os autores. A parede que apresentou o desempenho termoeconômico mais baixo foi a parede de tijolo a vista, composta por tijolo (10,5cm)+reboco (2,5cm). O segundo pior desempenho termoeconômico foi o da parede formada por reboco (2,5cm)+tijolo (10cm)+reboco (2,5cm), que é a configuração mais utilizada em edificações comuns. De acordo com Specht et al. (2010), o uso dessas paredes para o clima brasileiro não é aconselhável, pois causariam desconforto nos usuários das edificações. A parede que apresentou melhor desempenho foi a de maior isolamento, formada por reboco (2,5cm) + poliestireno (5cm) + tijolo (23cm) + reboco (2,5cm), que possui também o maior custo total. Specht et al (2010) destacam que essa avaliação não dispensa a análise caso a caso de cada projeto, considerando as demais variáveis climáticas, humanas e arquitetônicas intervenientes no ambiente construído, mas permite apontar possíveis soluções construtivas que podem melhorar o desempenho energético das edificações.

Assim, a questão da transmitância nem sempre é óbvia – existem situações e climas em que um alto isolamento pode realmente ser necessário e vantajoso, e outros em que não. Granja e Labaki (2004) destacam que sistemas de coberturas e paredes no Brasil têm sido elaborados com base no coeficiente global de transmitância térmica (U). No entanto, tais valores auxiliam apenas a dar um primeiro passo na escolha de determinados sistemas

de coberturas e paredes, pois não retratam o comportamento dinâmico da onda térmica, que pode mostrar resultados térmicos e energéticos bem diferentes de elementos estudados em regime permanente. Os autores apontam a necessidade do uso de métodos mais especializados para a concepção de coberturas e paredes adequadas térmica e energeticamente às condições climáticas brasileiras. Além da consideração de valores de transmitância, análises que considerem a variação periódica de parâmetros climáticos externos e a capacidade de armazenamento térmico e o uso adequado desta energia armazenada em paredes e coberturas "são primordiais para o projetista com consciência energética e ambiental" (GRANJA; LABAKI, 2004, p.66).

O desempenho térmico e a eficiência energética de um telhado, por exemplo, não dependem apenas da transmitância. Essas questões são bastante influenciadas pela cor de sua superfície externa, pois ela controla a absorção e reflexão da radiação solar incidente durante o dia. O emprego de cores claras nas telhas, isto é, cores de baixa absorvância, pode ser utilizado como uma estratégia bioclimática para minimizar o ganho de calor pela cobertura.

Em um estudo sobre a influência das cores externas da envoltória, Granja e Labaki (2003) investigaram a dinâmica de calor através de um telhado de concreto plano na cidade de Campinas, SP. Os resultados mostraram que a influência da absorvância no fluxo de calor deste telhado diminui à medida que a resistência térmica aumenta. Portanto, o uso de cores da superfície externa como meio de redução de cargas de refrigeração possui um efeito maior no caso de estruturas de telhados leves. De forma inversa, para resistências maiores, esta relação começa a se estabilizar, e o efeito da cor superficial externa na transferência de calor periódico através dele é atenuado. Como consequência, a escolha da cor de componentes opacos para edificações em climas quentes é um fator a ser considerado, e deve estar ligado a um uso apropriado também da inércia térmica (GRANJA; LABAKI, 2003).

Pereira e Ghisi (2011) destacam outros dois fatores importantes que devem ser considerados conjuntamente com as propriedades da envolvente do edifício: a ventilação natural e a ocupação pelos usuários. Eles apontam ainda que estes fatores são mais influenciados pela inércia térmica da envolvente do edifício do que por sua transmitância.

Os autores realizaram um estudo por meio de simulação computacional sobre a influência das propriedades do envelope sobre o desempenho térmico de casas unifamiliares naturalmente ventiladas. Considerou-se a ocupação das unidades, e o clima analisado foi o da cidade de Florianópolis. Segundo eles, a influência da ventilação natural é uma questão importante para o clima tropical ou quente, onde este recurso é necessário e muito utilizado em habitações. Constatou-se que para o modelo de residência com ventilação natural e ocupado, as propriedades térmicas do envelope com maior influência foram a capacidade e atraso térmicos, e a transmitância térmica foi a propriedade de

menor relação com desconforto para ambos os casos, independentemente das condições de ventilação e ocupação.

Ainda sobre a influência da ventilação, Sorgato (2009) investigou em sua pesquisa a influência da área de superfície exposta ao exterior e o tamanho do ambiente no desempenho térmico de edificações residenciais ventiladas naturalmente. No estudo foram analisados quatro diferentes modelos de edificações residenciais no clima de Florianópolis, através de simulações computacionais. Observou-se que os componentes da envoltória da edificação são determinantes no desempenho térmico. A influência nos graus-hora de resfriamento mostrou-se dependente da área de superfície exposta e do tamanho do ambiente relacionados às transmitâncias térmicas da cobertura e paredes e de suas absortâncias. A combinação da transmitância e da absortância da cobertura apresentou grandes influências nos graus-hora de resfriamento para os quatro modelos. Através das análises do balanço térmico, identificou-se que a ocupação predomina nos ganhos internos de calor dos ambientes, sendo mais significativa nos modelos com ambientes menores e menos relevante nos modelos com ambientes maiores. A cobertura teve grande participação nos ganhos e perdas de calor, enquanto as paredes tiveram maior influência nos ambientes menores do que nos maiores. As maiores perdas de calor em todos os modelos e em todas as estações, com exceção do inverno, ocorrem através da ventilação, por serem modelos naturalmente ventilados. O estudo mostrou ainda que, para transmitâncias mais baixas, as perdas de calor pela ventilação são maiores, pois as paredes e coberturas dificultam a dissipação do calor.

Também sobre a influência da transmitância da envoltória de edificações em relação ao seu desempenho térmico, Melo e Lamberts (2008) realizaram estudo partindo do Caso 600 do método BESTEST da ASHRAE *Standard 140* e simulando alternativas de construções de paredes e cobertura de diferentes valores de transmitância e inércia térmica. A análise foi feita para as cidades de Denver, Estados Unidos, e Florianópolis, no Brasil, cujos climas possuem quantidade de graus-hora de resfriamento semelhante e quantidade de graus-hora de aquecimento distinta. Pelos resultados obtidos, Melo e Lamberts (2008) observaram que diferentes valores de transmitância térmica e capacidade térmica dos elementos opacos geraram alterações no valor da carga térmica. Os autores afirmam que, como o clima de Denver possui um inverno rigoroso e verão ameno, o sistema de aquecimento de ar é o mais utilizado durante o ano. Assim, o aumento da transmitância térmica das paredes e cobertura neste clima se reflete em um aumento da carga térmica para manter a temperatura do ambiente dentro do limite adotado. Já para Florianópolis, que possui invernos amenos e verões quentes, o aumento das transmitâncias térmicas das paredes e cobertura permite a dissipação do calor interno para o exterior com maior facilidade, reduzindo a carga térmica. O uso de alta espessura no isolamento térmico do envelope, por sua vez, não permite a dissipação da carga interna e dos ganhos com as janelas para o exterior. Melo e Lamberts (2008) destacam que a orientação da

fachada principal da edificação é de extrema importância ao desempenho térmico, pois, determina maior ou menor incidência solar em cada época do ano. Uma orientação adequada, portanto, pode reduzir a carga térmica incidente em uma edificação.

Além da transmitância, a inércia térmica é uma característica dos sistemas construtivos de grande relevância para o conforto térmico dos ocupantes de uma edificação. Ela promove dois importantes efeitos sobre os fluxos de calor entre o ambiente interno e externo das edificações, reduzindo as amplitudes das temperaturas internas (amortecimento) e atrasando a passagem destas temperaturas externas ao interior (DORNELLES; RORIZ, 2003). Assim, edificações de baixa inércia sofrem maiores variações na temperatura interna, pois acompanham mais rápido as oscilações do ambiente externo.

Dornelles e Roriz (2005) analisaram o uso da inércia térmica em edificações localizadas na cidade de São Carlos, SP. Para o estudo, foram selecionadas três edificações, cujas temperaturas do ar no interior e exterior dos ambientes foram monitoradas. Para a avaliação do desempenho térmico por meio de medição, escolheu-se um dia de referência para o período de verão e de inverno. Pelos resultados obtidos, constatou-se que o ambiente de maior inércia térmica apresentou baixa necessidade de refrigeração e aquecimento no verão. No entanto, o desconforto por frio no inverno foi elevado, o que aumentou a necessidade de utilizar sistemas artificiais de climatização. Tal comportamento deve-se à falta de aquecimento solar passivo nos dias mais frios, relacionado à orientação da residência. Já o ambiente com a mais baixa inércia térmica apresentou elevadas oscilações de temperatura interna em relação à externa. Esse foi o ambiente que obteve maior necessidade total de refrigeração e aquecimento, sendo desconfortável tanto no verão quanto inverno, pois o sistema construtivo de baixa inércia permite altos ganhos de calor solar nos períodos quentes e consideráveis perdas nos dias frios (DORNELLES; RORIZ, 2005). Dornelles e Roriz (2005) concluíram que a utilização apenas da inércia térmica não é suficiente para oferecer condições de conforto térmico no clima de São Carlos, sendo necessário, nos meses mais frios, aliar o uso de inércia térmica ao aquecimento solar passivo e ventilação seletiva, permitindo as trocas de ar nas horas mais quentes do dia e evitando a perda de calor à noite. Nos meses mais quentes, por sua vez, deve-se aliar o uso de alta inércia térmica ao sombreamento de fachadas e aberturas, reduzindo os ganhos de calor solar, e utilizar ventilação seletiva à noite, para permitir trocas de ar e reduzir as temperaturas internas.

A alta inércia também pode ser útil para situações de verão em climas subtropicais. Papst e Lamberts (1999) analisaram três edificações residenciais ocupadas e com diferentes materiais construtivos, padrões de uso e orientação na cidade de Florianópolis – SC, observando a frequência de ocorrência das temperaturas em relação às características construtivas das edificações. Os autores concluíram que, para Florianópolis, apesar do uso de inércia térmica ser solicitado apenas para o inverno, ele nem sempre deve ser descartado para os períodos quentes, pois a residência de maior inércia térmica e

adequada orientação solar foi a que apresentou os melhores resultados durante todo o período analisado, quente e frio.

Goulart (2007) realizou uma análise do uso da inércia térmica para resfriamento no período de verão em residências, no clima de Florianópolis - S.C. Através de simulação computacional, fez-se estudos paramétricos considerando paredes com diferentes valores de inércia térmica, diferentes tipos de cobertura, ventilação noturna, e tamanho e sombreamento de janelas. Notou-se que a ventilação noturna é fundamental para edifícios de maior inércia térmica neste clima, sendo o parâmetro de maior influência para o conforto térmico do interior. O segundo parâmetro de maior impacto foi o uso de sombreamento adequado. Goulart (2007) destaca principalmente que o uso da inércia térmica deve estar atrelado a outras estratégias de projeto.

Em outro estudo sobre o papel da inércia térmica, Granja e Labaki (2004) investigaram o desempenho térmico em regime periódico de duas paredes: uma convencional e outra equivalente de concreto leve, com orientação leste e oeste e desempenhos idênticos em regime permanente. Os efeitos na eficiência energética para uma edificação na região de Campinas, SP, foram comparados. Pode-se afirmar que os dois sistemas de paredes analisados conduzem a padrões distintos de comportamento relativos à onda térmica, ocasionando reações e graus de desconforto ao usuário em diferentes horas do dia, segundo a adoção de um sistema de parede com maior ou menor massa. Assim, paredes leves orientadas a leste podem ter seus picos de carga térmica logo no início do dia, o que pode acarretar em fator de desconforto e de ineficiência energética em edificações com períodos de ocupação neste horário, como salas de aula, por exemplo. Edificações com paredes de massa elevada também podem causar desconforto e determinar consumo desnecessário de energia, como, por exemplo, dormitórios com paredes de orientação oeste. Granja e Labaki (2004) apontam, portanto, que a escolha de sistemas de paredes e também de coberturas deve se basear nos efeitos sobre a capacidade de nivelamento dos picos de carga térmica e sobre a demanda por energia gerada artificialmente para o conforto, guardando relação também com o período de utilização da edificação.

No contexto internacional, Aste, Angelotti e Buzzetti (2009) realizaram um estudo para avaliar o papel da inércia térmica em edifícios residenciais em Milão, no norte da Itália, por meio de simulação computacional. Na primeira fase, foram analisadas várias montagens de parede com a mesma transmitância, mas diferentes propriedades termofísicas dinâmicas. Por meio das simulações, a influência da inércia térmica em paredes na demanda de aquecimento e resfriamento da célula-teste foi avaliada para um conjunto de diferentes parâmetros de projeto: número de superfícies de transferência de calor, presença de sombreamento solar, e parâmetros operacionais – aquecimento, refrigeração e taxas de ventilação. Com base na análise realizada os autores observaram que o uso de paredes de alta inércia térmica em edifícios geralmente resulta em uma

redução da demanda de energia para aquecimento e resfriamento. A diferença entre a demanda de aquecimento de uma parede de baixa inércia em relação a uma de alta inércia pode atingir cerca de 10%, e a diferença entre a demanda de refrigeração de uma parede de baixa inércia em comparação com uma de alta inércia pode chegar a 20%. Como nos demais estudos citados, os autores ressaltam que a influência da inércia térmica no caso de sistemas construtivos de mesma transmitância dependerá dos parâmetros de projeto e operacionais escolhidos para a edificação.

Sobre o papel da absorvância das superfícies externas relacionadas à inércia térmica, Cheng, Ng e Givoni (2005) analisaram o efeito da cor externa do envelope e da utilização de massa térmica sobre o desempenho térmico dos edifícios em clima quente-úmido. A pesquisa foi feita a partir de unidades de testes construídas no Departamento de Arquitetura da Universidade Chinesa de Hong Kong. Segundo Cheng, Ng e Givoni (2005), o resultado deste estudo revela que a sensibilidade da cor do envelope sobre o desempenho de temperaturas internas varia com a radiação solar global e com a massa térmica. Quanto maior o nível de radiação solar, por um lado, e quanto mais leve o edifício, por outro, mais sensível é o desempenho do edifício de acordo com a cor do envelope. Cheng, Ng e Givoni (2005) concluíram que a aplicação de cor na superfície é, de fato, o meio mais simples, eficaz e econômico para reduzir a temperatura interna em clima quente-úmido. A adição da massa térmica também reduz as máximas do interior, no entanto, ao contrário do efeito da cor da superfície, ela também eleva as mínimas. O segundo aspecto da influência da massa térmica é o efeito do atraso térmico, cujas propriedades de armazenamento de calor podem retardar a ocorrência da temperatura interna de pico por várias horas (CHENG; NG; GIVONI, 2005).

3. METODOLOGIA

A metodologia consiste em efetuar simulações computacionais do desempenho térmico de uma tipologia térrea de habitação de baixa renda na cidade de São Carlos, SP, alterando os seguintes parâmetros: transmitâncias e capacidades térmicas (inércia) das paredes externas, transmitâncias das coberturas, cor das superfícies exteriores (paredes e cobertura), aproveitamento da ventilação natural e inserção de ganhos internos (ocupação, iluminação, equipamentos). Dessa forma, é possível verificar o impacto da transmitância do fechamento opaco (paredes e coberturas) no comportamento térmico desta tipologia de edifício.

Para isto, primeiramente foram realizados estudos da influência dos dados de entrada na modelagem pelo *software EnergyPlus*. Em seguida, foi verificado o comportamento térmico da habitação a partir dos valores-limite de U estabelecidos pela NBR 15575 e pelo RTQ-R. Foram feitas simulações variando valores de U e de α e analisando os resultados por meio dos graus-hora (GH, em °Ch) de desconforto anual e por meio da avaliação do dia típico proposta pela NBR 15575. Estudados estes limites existentes, procedeu-se às outras três etapas de simulações variando valores de U e α associados a ganhos internos, ventilação natural e inércia das paredes externas. Nestas três etapas foi analisado o desconforto relativo apresentado pela habitação (ver **Item 4.3**), explorando-se a relação entre as propriedades da envoltória opaca e seu desempenho térmico.

Todos os dados de entrada das simulações e as formas de análise de resultados empregadas na pesquisa são explicados nos próximos itens deste capítulo.

3.1. MODELOS ANALISADOS

3.1.1. TIPOLOGIAS

As tipologias correspondem aos modelos de habitação representativos do que é mais empregado atualmente no estado de São Paulo, tendo sido obtidas junto à Caixa Econômica Federal (CEF) e à Companhia de Desenvolvimento Habitacional e Urbano (CDHU) (**Tabelas 14 e 15, Figura 5**).

Tabela 15: Dados gerais sobre as tipologias

Tipologia	Fonte	Tipo	Fator de forma	Área de parede exposta total (%)	Área de abertura envidraçada total (%)	Área de abertura envidraçada total/área de parede exposta total (%)
A	CEF	Térrea isolada	0,88	78,7	4,4	5,6
B	CEF	Multipavimentos (térreo+3)	0,40 ¹	47,9 ¹	4,8	10,0
			0,44 ²	42,9 ²		11,2

1. Correspondente às duas unidades de cada pavimento tipo que se encontram adjacentes à escada
2. Correspondente às demais unidades do pavimento tipo, que possuem uma parede da sala exposta a mais

Fator de forma calculado como a área de envoltória exposta pelo volume total edificação (idem ao RTQ-R - INMETRO, 2010). Para o edifício multipavimentos, foi simulado o último andar, com a cobertura exposta

O pé-direito considerado para ambas as tipologias foi 2,70 m, valor usualmente empregado (FATTORI, 2011). O cálculo do fator de forma foi realizado segundo o RTQ-R (INMETRO, 2010), sendo que a área da envoltória exposta refere-se à soma da área das paredes externas e das coberturas expostas ao clima externo. Na soma da área das paredes, considerou-se também a área das aberturas, e para o cálculo da área de cobertura foi considerada a inclinação do telhado (e não a área que a cobertura projeta no plano horizontal). Beirais foram desconsiderados.

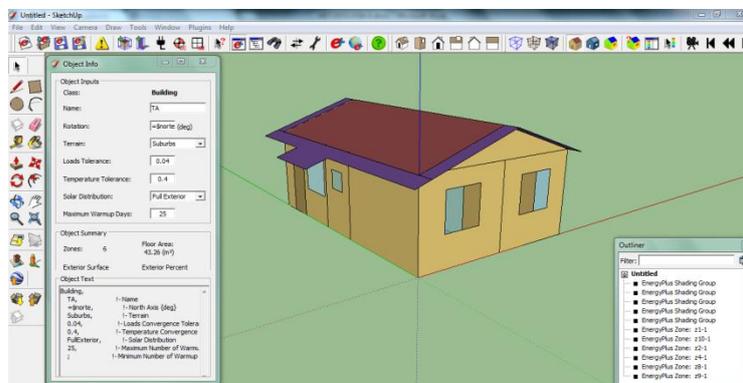


Figura 6: Formato de apresentação do *plug-in Open Studio*

A **Figura 6** mostra a tipologia A modelada no programa *Google SketchUp* (GOOGLE, 2010) através do *plug-in Open Studio* (EERE, 2011). Sob o ponto de vista térmico, uma edificação é vista como um conjunto de zonas térmicas. Uma zona térmica pode ser um único ambiente,

delimitado por paredes, piso e teto, ou um conjunto de vários ambientes que possuem fontes de calor, padrões de uso, condições de ventilação natural e climatização semelhantes. Para as habitações, cada ambiente foi modelado em uma zona térmica, sendo criada também uma zona térmica para o átrio.

3.1.2. ORIENTAÇÃO

Para a orientação dos modelos adotou-se a seguinte convenção: a fachada com a entrada principal foi modelada inicialmente ao norte. No caso do modelo térreo, tal

fachada corresponde à que contém a entrada da sala de estar. Para o modelo multipavimentos, trata-se da fachada que contém a entrada principal do prédio no pavimento térreo (**Tabela 16**). Quando a fachada principal é voltada ao Norte, a orientação é igual a 0°. Quando ela é voltada a leste, a orientação é 90°, e assim por diante, sempre no sentido horário (**Tabela 16**).

Tabela 16: Orientações das tipologias

ORIENTAÇÕES TA			
N=0°	N=90°	N=180°	N=270°
ORIENTAÇÕES TB			
N=0°	N=90°	N=180°	N=270°

Fonte: Adaptado de Fattori, 2011

3.2. PARÂMETROS ANALISADOS

3.2.1. ENVOLTÓRIA

A seguir estão definidos os dados sobre a envoltória.

3.2.1.1. PAREDES EXTERNAS

Para a configuração das vedações verticais da envoltória buscou-se referências com a Caixa Econômica Federal (CEF) e com a Companhia de Desenvolvimento

Habitacional e Urbano (CDHU). O sistema mais utilizado, segundo eles, é o bloco de concreto 14x19x39cm, com revestimento externo e interno em argamassa.

A partir dos objetivos da pesquisa, foram elaborados outros sistemas construtivos, buscando-se obter diversos valores de U para análise:

- 1) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (3cm) + Tijolo maciço (10cm)
U=0,96 W/m².K e CT= 149 KJ/m².K
- 2) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (1cm) + Tijolo maciço (10cm)
U=1,85 W/m².K e CT= 149 KJ/m².K
- 3) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + Tijolo maciço (10cm)
U=2,40 W/m².K e CT= 149 KJ/m².K
- 4) Tijolo maciço (10cm) sem revestimento
U=3,70 W/m².K e CT= 149 KJ/m².K
- 5) Painel de concreto leve moldado in loco (7 cm)
U=4,54 W/m².K e Ct=141 KJ/m².K

3.2.1.2. COBERTURA

Quanto às vedações horizontais da envoltória, a predominância é pela utilização de lajes mistas e telhas cerâmicas para casas e sobrados, e lajes mistas e telha de fibrocimento para os edifícios multipavimentos (FATTORI, 2011; RIZZO, 2011).

Para a pesquisa, foram elaborados os seguintes tipos de coberturas:

- 1) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (2cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm)
U=1,00 W/m².K e CT= 264 KJ/m².K
- 2) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (1cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm)
U=1,34 W/m².K e CT= 264 KJ/m².K
- 3) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm)
U=1,61 W/m².K e CT= 264 KJ/m².K
- 4) Laje de concreto (12cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm)
U=2,01 W/m².K e CT= 264 KJ/m².K
- 5) Argamassa (2,5cm) + isolamento (poliestireno expandido) 0,5cm + laje de concreto 10cm + argamassa 2,5cm
U=2,30 W/m².K e CT= 270 kJ/m².K

3.2.1.3. COR DAS SUPERFÍCIES EXTERIORES

Para a cor das paredes externas, partindo-se dos valores indicados pela NBR 15575 para o procedimento de simulação (além de absorvância=0,3 para cores claras, usar absorvância=0,5 para cores médias, e absorvância=0,7 para cores escuras), foram adotados os seguintes valores:

- cor branco gelo, absorvância solar de 0,30 e absorvância visível de 0,27 (cores claras). Dados retirados de Dornelles (2008);
- cor "camurça", absorvância solar de 0,53 e absorvância visível de 0,56 (cores médias). Dados retirados de Dornelles (2008).;
- cor "concreto", absorvância solar de 0,72 e absorvância visível de 0,72 (cores escuras). Dados retirados de Dornelles (2008).
- Além destes valores, foram especificados ainda as absorvâncias de 0,6 e 0,9, para abranger uma faixa ampla de valores.

As cores das coberturas apresentam as seguintes absorvâncias à radiação solar:

- absorvância de 0,75. Valor de absorvância retirado de ABNT (2005) para telhas de barro;
- absorvância de 0,50. Valor de absorvância retirado de Melo (2005) para telhas de fibrocimento;
- foram empregadas ainda duas opções de absorvância: 0,3 e 0,9, buscando-se abranger opções de cores claras a escuras.

3.2.1.4. PAREDES INTERNAS

As paredes internas em todos os modelos são compostas por bloco estrutural de concreto 9x19x39cm, revestidas em ambos os lados com argamassa, seguindo o padrão da CEF (FATTORI, 2011).

3.2.2. VENTILAÇÃO MÍNIMA: CONDIÇÕES DE INFILTRAÇÃO DE AR

Para a especificação das condições de infiltração de ar externo à edificação, foi adotado o recomendado no procedimento de simulação da NBR15575: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho (ABNT, 2010), que determina uma taxa de ventilação mínima de 1 ren/hora em cada ambiente da habitação. O ático não apresenta infiltração.

3.2.3. APROVEITAMENTO DA VENTILAÇÃO NATURAL

Nas simulações com aproveitamento da ventilação natural, foi considerado o seguinte:

- Taxa de 7 renovações /hora, disponível todos os dias, das 7h as 22 h, e acionada quando tem-se a seguinte situação:

Temperatura externa < Temperatura interna e Temperatura interna > 20°C

No restante do período, das 22h as 7h, é considerada taxa de infiltração de 1 renovação/hora nos ambientes.

3.2.4. GANHOS INTERNOS

Para as cargas internas de ocupação, iluminação e equipamentos, os padrões foram retirados do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2010). Na descrição de seu método de simulação para determinação da eficiência da envoltória, o RTQ-R especifica os perfis (dias da semana e horários) de ocupação, iluminação e uso de equipamentos para edifícios de habitação naturalmente ventilados, a serem adotados nas simulações.

Foram consideradas duas pessoas por dormitório, e o número de pessoas na sala como a correspondência do total de ocupantes dos dormitórios, conforme **Tabela 17**:

Tabela 17: Padrão de ocupação RTQ-R

	QUARTO 1	QUARTO 2	SALA
Pessoas	2	2	(2+2=) 4

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Para configurar a ocupação de pessoas no modelo é necessário determinar a taxa metabólica das pessoas ao longo do dia. Isso depende da atividade desempenhada em cada ambiente. Segundo o RTQ-R (INMETRO, 2010), que por sua vez baseou-se nos valores da ASHRAE Handbook of Fundamentals (2009), adotou-se (**Tabela 18**):

Tabela 18: Atividades dos usuários RTQ-R

Ambiente	Atividade	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido por área de pele = 1,80 m ² (W)	Fração radiante do calor sensível
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108	0,30
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81	0,30

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Quanto ao padrão de uso, a modelagem considera dois padrões, um para os dias de semana e um para finais de semana. O período de ocupação dos ambientes segue a **Tabela 19** seguinte:

Tabela 19: Padrão de uso RTQ-R

ZONA	DURANTE SEMANA	FIM DE SEMANA	FRAÇÃO*	ENERGIA
Q1 e Q2	até às 07:00		1	81
	até às 20:00		0	81
	até às 21:00		0.5	81
	até às 24:00		1	81
		até às 09:00	1	81
		até às 10:00	0.5	81
		até às 21:00	0.5	81
		até às 24:00	1	81
SALA	até às 13:00		0	108
	até às 18:00		0.25	108
	até às 19:00		1	108
	até às 21:00		0.5	108
	até às 24:00		0	108
		até às 10:00	0	108
		até às 11:00	0.25	108
		até às 12:00	0.75	108
		até às 13:00	0	108
		até às 14:00	0.75	108
		até às 17:00	0.5	108
		até às 19:00	0.25	108
	até às 21:00	0.5	108	
	até às 24:00	0	108	

* fração do total de pessoas

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

A modelagem do padrão de iluminação também apresenta dois padrões de utilização: para os dias da semana e para o fim de semana. Os valores 100 representam horários de iluminação em uso, e os valores 0 representam iluminação desligada (**Tabela 20**):

Tabela 20: Padrão de uso de iluminação RTQ-R

HORÁRIO	QUARTOS		SALA	
	Durante semana	Fim de semana	Durante semana	Fim de semana
1h	0	0	0	0
2h	0	0	0	0
3h	0	0	0	0
4h	0	0	0	0
5h	0	0	0	0
6h	0	0	0	0
7h	100	0	0	0
8h	0	0	0	0
9h	0	100	0	0
10h	0	0	0	0
11h	0	0	0	100
12h	0	0	0	100
13h	0	0	0	0
14h	0	0	0	0
15h	0	0	0	0
16h	0	0	0	0
17h	0	0	100	100
18h	0	0	100	100
19h	0	0	100	100
20h	0	0	100	100
21h	100	100	100	100
22h	100	100	0	0
23h	0	0	0	0
24h	0	0	0	0

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Para estes ambientes, a densidade de potência de iluminação segue a **Tabela 21**:

Tabela 21: Potência de iluminação RTQ-R

Ambiente	DPI (W/m ²)
DORMITÓRIO	5,0
SALA	6,0

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

Seguindo a indicação do RTQ-R, nos modelos será feita a modelagem de cargas internas de equipamentos elétricos apenas para a sala, sendo (**Tabela 22**):

Tabela 22: Padrão de equipamentos RTQ-R

Zona	Potência (W/m ²)	Durante semana	Fim de semana	Fração* energia
SALA	1,5	até às 24:00	até às 24:00	1

* fração do total de energia dos equipamentos

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2010

3.3. DADOS DE ENTRADA: “TESTES DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA MODELAGEM PARA A SIMULAÇÃO”

A seguir tem-se um resumo dos principais dados de entrada (**Tabela 23**). Para estas simulações, as soluções construtivas adotadas seguem padrões usuais do mercado para tipologias habitacionais de interesse social explicados anteriormente (FATTORI, 2011; RIZZO, 2011).

Tabela 23: Principais dados de entrada

PARÂMETROS	TA	TB
Clima	São Carlos	
Arquivo climático	Arquivo Epw de Roriz, 2012	
Orientação em relação ao Norte	Etapa 1	N=0°
	Etapa 2	N=0°, N=90°, N=180°, N=270°
	Demais etapas	Análise de Graus-hora: N=0° Análise do Dia típico de verão e inverno: N=0°
Absortância das paredes externas e internas	cor branco gelo absortância solar = 0,30 / absortância visível = 0,27 (Fonte: Domelles, 2008)	
Solução construtiva das paredes externas (Ordem dos materiais do exterior para o interior)	argamassa (2,5 cm) + bloco de concreto furado de 14 cm + argamassa (2,5 cm) U=2,76 W/m ² .K e CT= 266 KJ/m ² .K	
Absortância das coberturas	0,75 (telha cerâmica – Fonte: ABNT, 2005)	0,53 (telha fibrocimento – Fonte: Uemoto, Sato e John (2010))
Solução construtiva das coberturas (Ordem dos materiais do exterior para o interior)	telha cerâmica (1 cm) + laje cerâmica pré-moldada (12 cm) U=1,78 W/m ² .K e CT= 189 KJ/m ² .K	telha fibrocimento (0,8 cm) + laje cerâmica pré-moldada (12 cm) U=1,80 W/m ² .K e CT= 181 KJ/m ² .K
Solução construtiva das paredes internas	argamassa (2,5 cm) + bloco de concreto furado de 9 cm + argamassa (2,5 cm) U=2,27 W/m ² .K e CT= 206 KJ/m ² .K	
Piso ⁴	brita (3cm) + concreto (8 cm) + argamassa (2,5 cm) + revestimento cerâmico (0,4 cm) (Fonte: FATTORI, 2012)	
Janelas ⁵	vidro incolor, 4 mm	
Porcentagem de área envidraçada	Janelas do projeto original Nos quartos: veneziana na metade das janelas (1 folha), a outra metade com vidro (1 folha)	
Sombreamento ⁶	Beirais de 50 cm de extensão na TA (segundo projeto)	Sem beirais

⁴ A configuração do piso usado em todas as simulações é dada por Fattori (2012), seguindo o padrão aplicado na CEF: 3 cm de brita + 8 cm de concreto + 2 cm de revestimento de argamassa + revestimento cerâmico e=0,5 cm.

⁵ Para a modelagem, as aberturas mantêm-se no padrão apresentado nos projetos da CEF. O vidro utilizado é o de 4mm incolor, com fator solar de 0,87.

⁶ Foram consideradas apenas as venezianas dos dormitórios de ambas as tipologias, e os beirais da cobertura, com extensão de 50 cm além dos limites do telhado e nas fachadas indicadas no projeto da tipologia A. A tipologia multipavimentos (TB) não apresenta beirais.

PARÂMETROS	TA						TB					
Taxa de Infiltração	1 ren/h em cada ambiente e no ático											
Aproveitamento da ventilação natural	Sem aproveitamento											
Carga interna	Sem ganhos internos											
Temperatura do solo (°C)	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1
Venezianas	Venezianas em alumínio com espessura de 2mm nos quartos (duas folhas de veneziana, uma folha em vidro) Uma das folhas da veneziana é fechada na frente da janela de vidro, no período noturno, das 22h às 06h. Absortância solar para o alumínio (total e visível): total 0.7 / visível 0.7											
Caixilhos	Caixilharia em alumínio Absortância solar para o alumínio (total e visível): total 0.7 / visível 0.7 Emissividade da superfície: 0.9 A caixilharia foi considerada como uma moldura ao redor de toda a janela, com largura de 6.50 cm Na janela da cozinha foi inserido também um divisor vertical, e na janela da sala, um divisor horizontal, do mesmo material da caixilharia e mesma largura											
Notas	No caso da TB, foi analisada uma unidade correspondente ao último andar, com a cobertura exposta.											

3.4. DADOS DE ENTRADA: "AVALIAÇÃO DOS VALORES-LIMITE DE TRANSMITÂNCIA ESTABELECIDOS PELA NBR 15575 E PELO RTQ-R"

A **Tabela 24** a seguir resume os principais dados de entrada das simulações e suas variações. À exceção das soluções definidas para paredes e coberturas, os demais parâmetros fixos correspondem aos valores mais usuais para este tipo de habitação no país, conforme já citado.

Tabela 24: Principais parâmetros das simulações

PARÂMETROS VARIADOS			
Orientação em relação ao norte	0° - análise do dia típico de verão e análise pelo método dos graus-hora 90° - análise do dia típico de inverno		
Absortância solar total da superfície exterior das paredes (a_p)	a_{p1} 0,30	a_{p2} 0,56	a_{p3} 0,72
Absortância solar total da cobertura (a_c)	a_{c1} 0,30	a_{c2} 0,90	
Soluções construtivas das paredes exteriores (P) (ordem dos materiais do exterior para o interior)	P1 Tijolo maciço (10cm) sem revestimento $U=3,70 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $HC= 149 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$		
	P2 Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + tijolo maciço (10cm) $U=2,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $HC= 149 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$		
	P3 Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (1cm) + tijolo maciço (10cm) $U=1,85 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e $HC= 149 \text{ kJ/m}^2\cdot\text{K}$		

PARÂMETROS VARIADOS	
Soluções construtivas das coberturas (Co) (ordem dos materiais do exterior para o interior)	Co1 Argamassa (2,5cm) + isolamento (poliestireno expandido) 0,5cm + laje de concreto 10cm + argamassa 2,5cm U=2,30 W/m ² .K e HC= 270 kJ/m ² .K
	Co2 Telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0,8cm) + isolamento de poliestireno expandido (1 cm) + laje de concreto (12cm) U=1,34 W/m ² .K e HC= 264 kJ/m ² .K
	Co3 Telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0,8cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + laje de concreto (12cm) U=1,61 W/m ² .K e HC= 264 kJ/m ² .K
PARÂMETROS FIXOS	
Tipo de vidro das janelas	vidro incolor, 4 mm Transmitância à radiação solar: 0,84
Solução construtiva das paredes interiores	argamassa (2.5 cm) + bloco de concreto furado de 9 cm + argamassa (2.5 cm) U=2,27 W/m ² .K; HC=206 kJ/m ² .K
Ganhos internos	Sem ganhos internos
Infiltração de ar	1 ren/h em cada ambiente e no ático

3.5. DADOS DE ENTRADA: “ANÁLISES PARAMÉTRICAS DE DESEMPENHO TÉRMICO DA TIPOLOGIA ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DOS VALORES DE TRANSMITÂNCIA DA ENVOLTÓRIA OPACA”

3.5.1. SÉRIE 1

Para o primeiro grupo de simulações foi considerado o modelo térreo, com variação de cinco transmitâncias para as paredes, quatro transmitâncias para coberturas e três valores de absorvância para cada uma das transmitâncias (**Tabela 25**). Nesta primeira etapa não foram incluídos ganhos internos ou ventilação natural, seguindo-se o procedimento padrão adotado na NBR 15575 (ABNT, 2013).

Tabela 25: Etapa 1 das simulações paramétricas

PARÂMETROS	DADOS
Geometria	modelo A Modelo térreo - todas as fachadas voltadas ao exterior área total da unidade - 44,50 m ² / área útil- 37,11 m ²
Orientação em relação ao norte	TA: norte a 0°- análise graus-hora
Porcentagem de área envidraçada	janelas do projeto original nos quartos, considerou-se metade da área da janela sendo vidro e a outra metade sendo veneziana de alumínio. A outra folha da veneziana é fechada na frente da janela de vidro, no período noturno, das (22h às 6h)
Sombreamento	TA: beiral com 50 cm em 3 fachadas (é o padrão desta habitação / na quarta fachada não há beiral, pois a casa é encostada ao muro)

PARÂMETROS	DADOS
Absortância solar (total e visível) e emissividade da superfície exterior das paredes	total 0.3, 0.6 e 0.9 visível 0.3, 0.6 e 0.9 emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade da cobertura	total 0.3, 0.6 e 0.9 visível 0.3, 0.6 e 0.9 emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade das superfícies interiores	paredes, teto e piso total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade das portas e veneziana	Portas total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9 veneziana total e visível 0.7
Soluções construtivas das paredes exteriores	5 opções de paredes: 6) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (3cm) + Tijolo maciço (10cm) U=0,96 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 7) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (1cm) + Tijolo maciço (10cm) U=1,85 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 8) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + Tijolo maciço (10cm) U=2,40 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 9) Tijolo maciço (10cm) sem revestimento U=3,70 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 10) Painel de concreto leve moldado in loco (7 cm) U=4,54 W/m ² .K e Ct=141 KJ/m ² .K
Soluções construtivas das coberturas	4 opções de coberturas: 6) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (2cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=1,00 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K 7) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (1cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=1,34 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K 8) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=1,61 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K 9) Laje de concreto (12cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=2,01 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K U calculado para fluxo descendente (resistência da camada de ar ventilada igual a da camada de ar não ventilada, para o verão – que se considerou corresponder a fluxo descendente).
Janelas	vidro incolor, 4 mm
Paredes interiores	Argamassa (2.5 cm), bloco de concreto furado de 9 cm, argamassa (2.5 cm)

PARÂMETROS	DADOS											
Piso	brita, 3 cm concreto, 8 cm argamassa, 2.5 cm revestimento cerâmico 0,5 cm											
Densidade de carga interna (W/m ²) e período de ocupação	sem ganhos internos											
Taxa de infiltração	constante, em todos os ambientes que possuam janelas voltadas ao exterior: 1 ren/hr Sem renovação no ático da cobertura											
Temperatura do solo	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
	22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1

3.5.2. SÉRIE 2

Para o segundo grupo de simulações também foi considerado o modelo térreo, com variação de três transmitâncias para as paredes, duas transmitâncias para coberturas e dois valores de absorvâncias para cada uma. Para esta etapa foram incluídos ganhos internos (ver **Item 3.2.4**) e ventilação natural correspondente a 7 ren/h nos ambientes, conforme tabela a seguir (**Tabela 26**).

Tabela 26: Etapa 2 das simulações paramétricas

PARÂMETROS	DADOS											
Geometria	modelo A todas as fachadas voltadas ao exterior área total da unidade - 44,50 m ² / área útil- 37,11 m ²											
Orientação em relação ao norte	TA: norte a 0°- análise graus-hora											
Porcentagem de área envidraçada	janelas do projeto original nos quartos, metade da área da janela é vidro. A outra metade é veneziana de alumínio. A outra folha da veneziana é fechada na frente da janela de vidro, no período noturno, das (22h às 6h)											
Sombreamento	TA: beiral com 50 cm em 3 fachadas (é o padrão desta habitação / na quarta fachada não há beiral, pois a casa é encostada ao muro)											
Absorvância solar (total e visível) e emissividade da superfície exterior das paredes	total 0.3, 0.9 visível 0.3, 0.9 emissividade 0.9											
Absorvância solar (total e visível) e emissividade da cobertura	total 0.3, 0.9 visível 0.3, 0.9 emissividade 0.9											
Absorvância solar (total e visível) e emissividade das superfícies interiores	paredes, teto e piso total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9											

PARÂMETROS	DADOS												
Absortância solar (total e visível) e emissividade das portas e veneziana	Portas total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9 veneziana total e visível 0.7												
Soluções construtivas das paredes exteriores	3 opções de paredes: 1) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (3cm) + Tijolo maciço (10cm) U=0,96 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 2) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + Tijolo maciço (10cm) U=2,40 W/m ² .K e CT= 149 KJ/m ² .K 3) Painel de concreto leve moldado in loco (7 cm) U=4,54 W/m ² .K e Ct=141 KJ/m ² .K												
Soluções construtivas das coberturas	2 opções de coberturas: 1) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (2cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=1,00 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K 2) Laje de concreto (12cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=2,01 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K U calculado para fluxo descendente (resistência da camada de ar ventilada = a da camada de ar não ventilada, para o verão (que se considerou corresponder a fluxo descendente). O modelo é simulado considerando-se cada ambiente como uma zona térmica.												
Janelas	vidro incolor, 4 mm												
Paredes interiores	argamassa (2.5 cm), bloco de concreto furado de 9 cm, argamassa (2.5 cm)												
Piso	brita, 3 cm + concreto, 8 cm + argamassa, 2.5 cm + revestimento cerâmico 0,5 cm												
Densidade de carga interna (W/m ²) e período de ocupação	Conforme apresentado Item 3.2.4 Ganhos Internos												
Taxa de ventilação/infiltração	Todos os dias, das 7 as 22 hrs: 7 renovações /hora, só ventila quando text<tint e tint>20 graus Todos os dias, das 22 as 7 hrs: 1 ren/hora												
Temperatura do solo	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
	22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1	

3.5.3. SÉRIE 3

No terceiro grupo foram utilizadas duas paredes distintas, de alta inércia, e dois valores de U para coberturas, considerando o modelo térreo. Esta etapa manteve os

ganhos internos (ver especificações no **Item 3.2.4**) e ventilação natural da Etapa 2, conforme mostra a tabela a seguir (**Tabela 27**).

Tabela 27: Etapa 3 das simulações paramétricas

PARÂMETROS	DADOS
Geometria (ver desenho abaixo)	modelo A todas as fachadas voltadas ao exterior área total da unidade - 44,50 m ² / área útil- 37,11 m ²
Orientação em relação ao norte	TA: norte a 0°- análise graus-hora
Porcentagem de área envidraçada	janelas do projeto original nos quartos, metade da área da janela é vidro. A outra metade é veneziana de alumínio. A outra folha da veneziana é fechada na frente da janela de vidro, no período noturno, das (22h às 6h)
Sombreamento	TA: beiral com 50 cm em 3 fachadas (é o padrão desta habitação / na quarta fachada não há beiral, pois a casa é encostada ao muro)
Absortância solar (total e visível) e emissividade da superfície exterior das paredes	total 0.3, 0.9 visível (idem) emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade da cobertura	total 0.3, 0.9 visível (idem) emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade das superfícies interiores	paredes, teto e piso total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9
Absortância solar (total e visível) e emissividade das portas e veneziana	Portas total 0.3 visível 0.27 emissividade 0.9 veneziana total e visível 0.7
Soluções construtivas das paredes exteriores	2 opções de paredes: 1) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (3cm) + Painel de concreto leve moldado in loco (20cm) U=0,92 W/m².K e CT= 403 KJ/m ² .K 2) Argamassa (2,5cm) + isolamento de poliestireno expandido (0,5cm) + Tijolo maciço (10cm) U=2.17 W/m².K e CT= 403 KJ/m ² .K • Estas soluções foram escolhidas em função de possuírem diferentes valores de transmitância mas valores de capacidade térmica iguais e altos

PARÂMETROS	DADOS																								
Soluções construtivas das coberturas	2 opções de coberturas: 1) Laje de concreto (12cm) + isolamento de poliestireno expandido (2cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=1,00 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K 2) Laje de concreto (12cm) + telha de fibrocimento (laje e cobertura) (0.8cm) U=2,01 W/m ² .K e CT= 264 KJ/m ² .K U calculado para fluxo descendente (resistência da camada de ar ventilada = a da camada de ar não ventilada, para o verão (que se considerou corresponder a fluxo descendente). O modelo é simulado considerando-se cada ambiente como uma zona térmica.																								
Janelas	vidro incolor, 4 mm																								
Paredes interiores	argamassa (2.5 cm), bloco de concreto furado de 9 cm, argamassa (2.5 cm)																								
Piso	brita, 3 cm concreto, 8 cm argamassa, 2.5 cm revestimento cerâmico 0,5 cm																								
Densidade de carga interna (W/m ²) e período de ocupação	Conforme apresentado no Item 3.2.4 Ganhos Internos																								
Taxa de ventilação/infiltração	Todos os dias, das 7 as 22 hrs: 7 renovações /hora ▪ esta taxa de ventilação só é acionada quando tem-se a seguinte situação: Temperatura externa < Temperatura interna e Temperatura interna > 20°C Todos os dias, das 22 as 7 hrs: 1 ren/hora																								
Temperatura do solo	<table border="1"> <thead> <tr> <th>J</th> <th>F</th> <th>M</th> <th>A</th> <th>M</th> <th>J</th> <th>J</th> <th>A</th> <th>S</th> <th>O</th> <th>N</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>22.4</td> <td>23.1</td> <td>22.5</td> <td>21.4</td> <td>18.7</td> <td>18</td> <td>18.1</td> <td>20.1</td> <td>20.4</td> <td>22.7</td> <td>23.1</td> <td>23.1</td> </tr> </tbody> </table>	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1
J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D														
22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1														

3.6. DADOS CLIMÁTICOS

3.6.1. ARQUIVO CLIMÁTICO TRY

A partir da análise de dados meteorológicos de um determinado local é selecionado o ano que melhor representa o clima para a composição do arquivo climático de referência (TRY – *Test Reference Year*). Esse arquivo reúne informações de 8760 horas de dados como temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, radiação solar, direção e velocidade do vento, entre outros.

O arquivo climático empregado nas simulações desta pesquisa foi elaborado por Roriz (2012a), cujo trabalho de discussão do zoneamento bioclimático brasileiro (RORIZ, 2012b; RORIZ 2012c) levou à análise de dados de 610 municípios levantados através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a formulação de arquivos epws.

Como em algumas simulações também foi adotado o método proposto pela NBR 15575 (ABNT, 2013), foi necessário definir os dias típicos de verão e de inverno. Isto foi realizado a partir da média das temperaturas máximas e mínimas das respectivas semanas típicas de cada período identificadas por Roriz (2012a) no arquivo climático de São Carlos – 17 a 23 de fevereiro para o verão e 3 a 9 de agosto para o inverno. Os demais dados necessários para a caracterização do dia típico (radiação, nebulosidade, umidade, etc) também foram tomados a partir da média dos dados das semanas típicas.

3.6.2. CLIMA DA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP

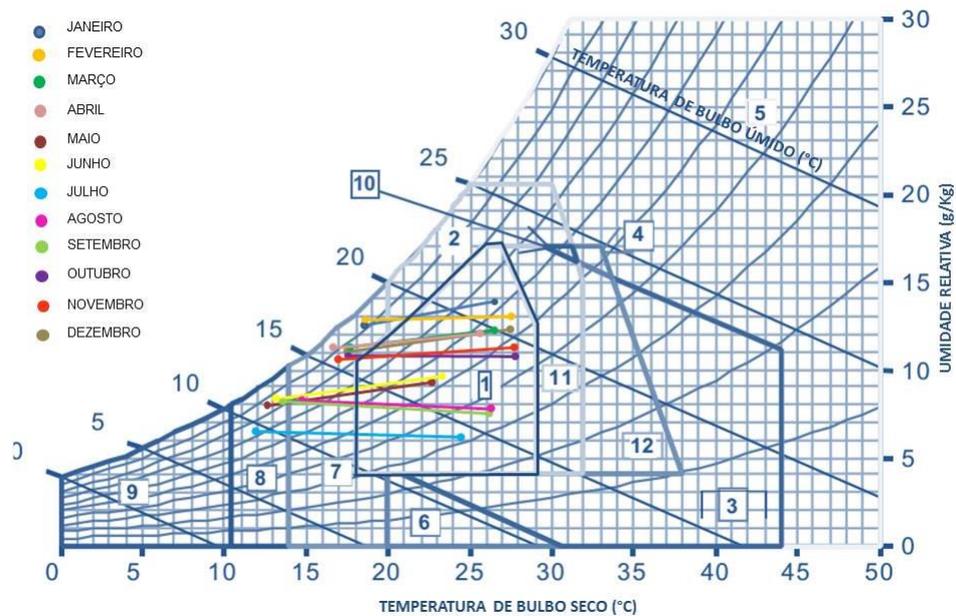
A cidade de São Carlos, SP, localiza-se na latitude de $-22^{\circ} 01' 03''$, longitude de $-47^{\circ} 53' 27''$, a uma altitude de 854m. Apresenta clima subtropical, com verão quente e úmido e inverno frio e seco. É característica do clima também grande amplitude térmica.

Os dados climáticos de São Carlos foram plotados no diagrama bioclimático de Givoni para países em desenvolvimento, para verificação das necessidades climáticas das edificações (**Figura 7**). Para tal, foi usado o mesmo ano climático típico de São Carlos usado nas simulações, através do qual foram obtidas as médias mensais das temperaturas máximas e mínimas diárias e suas umidades relativas correspondentes, conforme tabela a seguir (**Tabela 28**):

Tabela 28: Dados de temperaturas e umidade para a cidade de São Carlos

	TEMPERATURA MÁXIMA (°C)	UMIDADE RELATIVA (%)	TEMPERATURA MÍNIMA (°C)	UMIDADE RELATIVA (%)
JAN	26.3	62.3	18.3	91.0
FEV	27.5	56.7	18.5	92.4
MAR	26.5	57.5	17.6	89.8
ABR	25.5	59.5	16.6	91.9
MAIO	22.7	53.8	12.7	88.3
JUN	23.1	52.7	13.1	88.4
JUL	24.4	31.6	12.0	74.9
AGO	26.1	37.0	14.8	78.9
SET	26.0	36.0	13.8	82.0
OUT	27.9	46.3	17.6	84.2
NOV	27.8	48.1	17.0	88.9
DEZ	27.4	52.2	17.4	89.12
MÉDIA	25.9	49.5	15.8	86.6

Fonte: Adaptado de RORIZ, 2012a



- 1- ZONA DE CONFORTO
- 2- VENTILAÇÃO
- 3- RESFRIAMENTO EVAPORATIVO
- 4- MASSA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO
- 5- AR CONDICIONADO
- 6- UMIDIFICAÇÃO
- 7- MASSA TÉRMICA E AQUECIMENTO SOLAR
- 8- AQUECIMENTO SOLAR PASSIVO
- 9- AQUECIMENTO ARTIFICIAL
- 10- VENTILAÇÃO E MASSA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO
- 11- VENTILAÇÃO + MASSA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO + RESFRIAMENTO EVAPORATIVO
- 12- MASSA TÉRMICA PARA RESFRIAMENTO + RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Figura 7: Análise do arquivo climático epw pelo diagrama de Givoni

A carta indica que São Carlos encontra-se na zona de conforto em grande parte do ano. O clima abrange também a zona de massa térmica e aquecimento solar, indicando um período de baixas temperaturas. Esta característica é acentuada em alguns meses do período frio: maio, junho, julho e setembro, onde atinge-se também a zona de aquecimento solar passivo.

Para a zona de massa térmica e aquecimento solar passivo, situada entre temperaturas de 14°C a 20°C, recomenda-se adotar componentes construtivos com maior inércia térmica, além de aquecimento solar passivo e isolamento térmico, para evitar perdas de calor (LAMBERTS; MARINOSKI, 2007).

E na zona de aquecimento solar passivo estão as condições climáticas de baixa temperatura. Recomenda-se que a edificação tenha áreas envidraçadas voltadas para o sol e aberturas reduzidas nas fachadas que não recebem insolação (LAMBERTS; MARINOSKI, 2007).

3.6.3. ANÁLISE DO CLIMA ATRAVÉS DE ÍNDICES DE CONFORTO TÉRMICO

Os índices de conforto delimitam uma temperatura de referência, a partir da qual o conforto térmico dentro de um ambiente seria alcançado para a maioria de seus usuários. Para a análise do clima da cidade de São Carlos apresentada no **Item 3.6.2**, foram utilizados três critérios: índice de conforto da ASHRAE-55, índice de conforto baseado em Givoni e índice de conforto baseado em temperaturas fixas ao longo de todo ano. Sabe-se que estes índices não se direcionam à análises diretas do clima, mas eles foram utilizados apenas como forma de balizar os resultados das simulações, buscando-se identificar qual deles melhor refletia as condições climáticas da cidade. Os três índices encontram-se descritos nos itens a seguir.

3.6.3.1. ÍNDICE DE CONFORTO DA ASHRAE-55

A norma ASHRAE 55-2004 "*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*" apresenta um índice baseado na teoria adaptativa de conforto térmico proposta por Brager e De Dear (2001)⁷, que leva em conta a média diária externa da temperatura efetiva do lugar para estabelecer se um ambiente está confortável ou não.

Os níveis de conforto da ASHRAE são dados por temperaturas que dependem da média da temperatura externa do ar, sem limitações para valores de umidade e velocidade do ar, sendo:

$$T_n = 17,8 + 0,31 \times T_{Emed}$$

Onde:

T_n (°C) = Temperatura operativa interna ideal, ou de "neutralidade térmica". A Norma indica a possibilidade de substituição da temperatura operativa pela temperatura do ar, caso haja pouca diferença entre as temperaturas superficiais e a temperatura do ar.

T_{Emed} (°C) = Média mensal da temperatura do ar exterior, sendo a equação válida para T_{Emed} entre 10.0 e 33.5 °C.

Em torno da temperatura neutra, a ASHRAE estabelece um intervalo de temperaturas confortáveis, cujo limite superior é dado por $T_n + \text{Tolerância}$ e o inferior $T_n - \text{Tolerância}$. Para satisfazer 90% dos usuários, a tolerância é de 2,5 °C, e para atender a 80% das pessoas, porcentagem mínima para o ambiente ser considerado confortável, a tolerância é de 3,5 °C.

⁷ O índice de conforto proposto por Brager e De Dear (2001) é válido para ocupantes em atividades sedentárias, com taxas metabólicas entre 1.0 e 1.3 met, e com livre escolha de vestimenta.

3.6.3.2. ÍNDICE DE CONFORTO BASEADO EM GIVONI

Givoni (1992) estabelece uma zona de conforto adaptada para países de clima quente e úmido, delimitada na carta psicrométrica (ver **Item 3.6.2**). A partir dos valores-limite de temperatura de conforto indicadas na carta, adotou-se a faixa de 25°C a 29°C para o período de verão (outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril, maio), e de 18°C a 25°C para o período de inverno (junho, julho, agosto, setembro).

3.6.3.3. ÍNDICE DE CONFORTO BASEADO EM TEMPERATURAS FIXAS AO LONGO DE TODO ANO

Procurou-se também analisar o clima através de uma faixa fixa anual de conforto. Após uma busca em diversos autores (GOULART; 1993; SZOKOLAY; 1987; MOURSHED, 2011; ORTIZBEVIÀ et al, 2012; PAPAKOSTAS; KYRIAKIS, 2005; PAPAKOSTAS; MAVROMATIS; KYRIAKIS, 2010; BOLATTÜRK, 2008; DOMBAYCI, 2009; BÜYÜKALACA; BULUT; YILMAZ, 2001), adotou-se a temperatura de 18°C como limite mínimo, baseado nas indicações de Szokolay (1987), e 26°C para temperatura máxima, por entender-se que tais temperaturas encontram-se adequadas como limites inferior e superior quando analisamos as temperaturas médias para o clima de São Carlos.

3.6.3.4. RESULTADOS

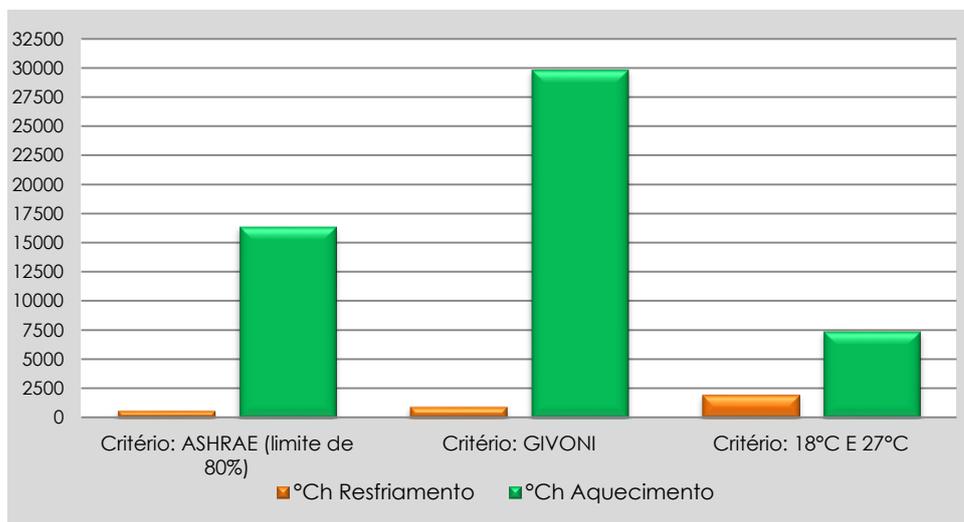
A predominância do frio no clima de São Carlos, indicada na carta bioclimática, é notada também ao se calcular os graus-hora de desconforto anuais para a cidade, utilizando-se três diferentes valores-limite (Tabela 20) e a partir de seus dados climáticos – mesmo arquivo climático já citado, de Roriz (2012a):

1. Índice de conforto adaptativo da ASHRAE-55, com a faixa de conforto para atender a 80% dos usuários (ver limites na **Tabela 30**);
2. Índice de Givoni (1992) para países em desenvolvimento (ver limites na **Tabela 30**);
3. Faixa fixa de conforto o ano todo. Adotou-se a temperatura de 18°C para temperatura mínima, baseado nas indicações de Szokolay (1987), e 27°C para temperatura máxima, baseado na ASHRAE-55.

Os resultados obtidos a partir das análises são apresentados na **Tabela 29**:

Tabela 29: Graus-hora de desconforto anual para São Carlos

MÉTODO	°Ch calor	°Ch frio
ASHRAE (80%)	635.8	16461.8
GIVONI	972,6	29866,5
18°C E 27°C	1977	7457.7

**Gráfico 1:** Graus-hora de resfriamento e aquecimento em São Carlos, SP

As temperaturas limites para cada mês segundo estes índices foram (**Tabela 30**):

Tabela 30: Faixas de conforto mensais para a cidade de São Carlos

FAIXAS DE CONFORTO MÊS A MÊS		ASHRAE-55		GIVONI		TEMPERATURA FIXA	
Mês	Temperatura do ar média mensal (°C)	Limite mínimo (°C)	Limite máximo (°C)	Limite mínimo (°C)	Limite máximo (°C)	Limite mínimo (°C)	Limite máximo (°C)
Janeiro	21,7	21,0	28,0	25,0	29,0	18,0	27,0
Fevereiro	22,5	21,3	28,3	25,0	29,0	18,0	27,0
Março	21,6	21,0	28,0	25,0	29,0	18,0	27,0
Abril	20,5	20,7	27,7	25,0	29,0	18,0	27,0
Mai	17,3	19,7	26,7	25,0	29,0	18,0	27,0
Junho	17,4	19,7	26,7	18,0	25,0	18,0	27,0
Julho	17,5	19,7	26,7	18,0	25,0	18,0	27,0
Agosto	19,9	20,5	27,5	18,0	25,0	18,0	27,0
Setembro	19,4	20,3	27,3	18,0	25,0	18,0	27,0
Outubro	22,4	21,2	28,2	25,0	29,0	18,0	27,0
Novembro	21,8	21,1	28,0	25,0	29,0	18,0	27,0
Dezembro	21,7	21,1	28,0	25,0	29,0	18,0	27,0

Nota-se que os métodos sempre apresentam mais graus-hora de desconforto por frio que por calor, sendo que as diferenças quanto à quantidade de graus-hora apresentados se devem às diferentes faixas de conforto em cada mês. Portanto, percebe-se que esta é uma característica do clima de São Carlos, que apresenta um período frio bem demarcado, e cujo clima tende a ser mais ameno do que quente – justificando a presença de graus-hora de desconforto por frio maiores que os de desconforto por calor. Isto ajudará a entender os resultados das simulações paramétricas da presente pesquisa.

3.7. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

3.7.1. PROGRAMA DE SIMULAÇÃO

O programa de simulação computacional de desempenho termo-energético de edifícios escolhido para a pesquisa foi o *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia Norte-Americano (EERE, 2012). A escolha pelo *software* foi devido à gratuidade do mesmo e à grande aceitação no meio acadêmico, sendo utilizado como base da maioria de estudos de desempenho térmico publicados em periódicos internacionais (é amplamente utilizado por pesquisadores da área do mundo todo). As simulações foram feitas na versão 7.1.0.012 do programa. Através de arquivos climáticos de dados horários, o *EnergyPlus* calcula as temperaturas internas em edifícios, bem como as cargas de aquecimento e resfriamento para o dimensionamento dos sistemas de condicionamento de ar, verificando o consumo de energia resultante, e as cargas térmicas advindas dos componentes construtivos. O programa possui uma grande variedade de dados de saída, os quais podem ser horários ou referentes a períodos pré-estabelecidos, como dias típicos. O *EnergyPlus* tem sido intensivamente testado e validado, e as análises através do procedimento descrito na ASHRAE 140 (ASHRAE, 2004) mostraram que os resultados encontram-se dentro dos limites de erro previstos.

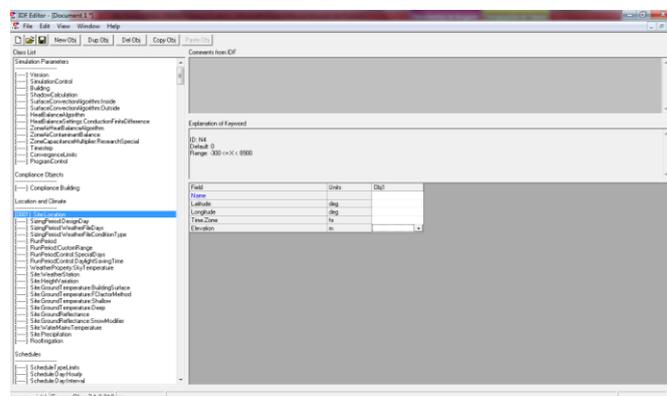


Figura 8: Formato de apresentação do IDF Editor

Para a simulação, o *EnergyPlus* utiliza como dados de entrada parâmetros que descrevem o edifício: sua geometria e todos os dados de materiais construtivos, bem como todas as variáveis internas (ocupação, iluminação, equipamentos, padrões de uso) e dados referentes ao sistema de ar condicionado. Além disso, é necessária também a inserção das variáveis ambientais, isto é, os dados climáticos do local

onde o edifício se insere. Essas variáveis arquitetônicas, internas e do sistema de ar condicionado são inseridas através do arquivo de dados de entrada IDF, com extensão .idf (*input data file*). Desta forma, o arquivo idf contém todos os dados necessários para a simulação, à exceção dos dados climáticos. Estes são inseridos através do arquivo EPW, com extensão .epw (*EnergyPlus weather file*).

3.8. FORMAS DE ANÁLISES DOS RESULTADOS

3.8.1. GRAUS-HORA DE DESCONFORTO ANUAL (GH)

A análise dos resultados das simulações foi feita através do parâmetro "graus-hora" (GH, em °Ch) de desconforto por frio ou por calor. Esta análise foi feita para o ano típico.

O parâmetro graus-hora de desconforto é definido como a somatória da diferença entre a temperatura operativa horária e os limites superior ou inferior de conforto. Quando a temperatura encontra-se acima do limite superior, trata-se de graus-hora de calor – indicando a necessidade de retirar calor do ambiente. Quando a temperatura é inferior ao limite inferior de conforto, trata-se de graus-hora de frio – indicando a necessidade de aquecer o ambiente. Foi adotada a temperatura de 18°C para o limite inferior e de 26°C para o limite superior. Para esta análise foi utilizada a temperatura operativa de cada ambiente. No caso da tipologia habitacional, os graus-hora de desconforto representam a soma dos valores encontrados para os ambientes de longa permanência: quartos e sala.

3.8.2. DESCONFORTO ANUAL RELATIVO

O desconforto anual relativo por calor ou por frio é dado como os graus-hora de resfriamento ou aquecimento na habitação, respectivamente, em função dos graus-hora referentes ao clima em questão. Em ambos os casos, para os graus-hora do clima e da habitação, a faixa de conforto adotada foi a mesma: entre 18°C e 26°C, por entender que foram estes os limites mais coerentes para as temperaturas máximas e mínimas encontradas no arquivo climático da cidade de São Carlos, SP. Pela análise do arquivo climático, os valores encontrados para São Carlos foram: GH de desconforto por calor (ou GH de resfriamento): 1977°Ch; e GH de desconforto por frio (ou GH de aquecimento): 7457.7°Ch. Os graus-hora de resfriamento ou aquecimento da habitação correspondem à média dos valores anuais dos três ambientes de maior permanência (sala e quartos). Este índice foi utilizado apenas nos **Itens 4.2 e 4.3**.

3.8.3. TEMPERATURAS PARA O DIA TÍPICO DE VERÃO E INVERNO DADAS PELA NBR 15575

Foi realizada também análise pela NBR 15575, que determina os valores máximos e mínimos que a temperatura do ar interno de cada ambiente deve atingir no dia típico de verão e no de inverno. Estas temperaturas são baseadas na temperatura máxima externa no verão, e na temperatura mínima externa no inverno. Para a análise são utilizados os dados da temperatura do ar de cada zona.

A partir dos resultados das simulações, são feitas comparações entre a temperatura externa e a temperatura interna máxima e mínima dos ambientes de maior permanência (dormitórios e salas), para os dias típicos de verão e inverno. No caso de São Carlos (Zona bioclimática 4), tem-se os seguintes níveis de desempenho (**Tabela 31**):

Tabela 31: Desempenho térmico mínimo, intermediário e superior para a Zona 4

	Nível de Desempenho	Temperaturas exigidas para a Zona Bioclimática 4
Verão	Mínimo/M	$T_i, \text{máx} \leq T_e, \text{máx}$
	Intermediário/I	$T_i, \text{máx} \leq (T_e, \text{máx} - 2 \text{ }^\circ\text{C})$
	Superior/S	$T_i, \text{máx} \leq (T_e, \text{máx} - 4 \text{ }^\circ\text{C})$
Inverno	Mínimo/M	$T_i, \text{mín} \leq (T_e, \text{mín} + 3 \text{ }^\circ\text{C})$
	Intermediário/I	$T_i, \text{mín} \leq (T_e, \text{mín} + 5 \text{ }^\circ\text{C})$
	Superior/S	$T_i, \text{mín} \leq (T_e, \text{mín} + 7 \text{ }^\circ\text{C})$

Notas

$T_i, \text{máx}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius

$T_e, \text{máx}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius

$T_i, \text{mín}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius

$T_e, \text{mín}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. TESTES DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DA MODELAGEM PARA A SIMULAÇÃO

4.1.1. INTRODUÇÃO

O uso de simulação computacional em projetos de edifícios tem se intensificado nas últimas décadas. Segundo Westphal (2007), o aumento do interesse por edificações e sistemas mais eficientes, visando diminuir custos de operação, aliado à busca por uma eficiência energética voltada para o preenchimento de rótulos de sustentabilidade, traz a simulação como um meio para antecipar resultados do comportamento do edifício ainda em projeto, ou para melhorar um desempenho existente. Dentro deste contexto, o emprego da simulação computacional tem sido incorporado em normas e regulamentos voltados ao desempenho térmico de diversas tipologias de edifícios em inúmeros países.

Uma vez que a simulação voltada ao desempenho térmico de edifícios tem se tornado uma prática comum e utilizada em normas, regulamentos e outros referenciais da área, faz-se necessário que os parâmetros a serem utilizados na modelagem estejam definidos de forma clara, permitindo a compreensão dos resultados. Deve-se evitar que a escolha dos dados de entrada fique a critério do especialista designado para esta função – o que pode levar à interpretações errôneas ou à manipulações para se obter o nível de desempenho desejado.

Em simulações de habitações de interesse social, pelas reduzidas dimensões dos ambientes nestas tipologias e pelas características de baixas cargas internas de iluminação e equipamentos, é grande a influência de aspectos da modelagem que muitas vezes não são percebidos em simulações de edifícios mais complexos – maiores, com cargas internas mais elevadas ou com outros padrões de ocupação.

O objetivo deste capítulo é avaliar a influência de certos parâmetros de modelagem no desempenho térmico das tipologias escolhidas para as simulações paramétricas. Foram escolhidos os parâmetros que forneciam mais de uma opção de valores ou de forma de entrada dos dados, ficando a critério do usuário do programa a adoção de um ou de outro.

4.1.2. MÉTODOS

Foi verificado o impacto dos seguintes parâmetros nas simulações das tipologias escolhidas:

- temperatura do solo;
- medidas externas ou internas das tipologias na modelagem;
- caixilhos nas janelas expostas ao exterior;
- venezianas nas janelas dos dormitórios; e
- beirais.

As simulações foram realizadas para a tipologia A (TA) e tipologia B (TB).

A seguir tem-se um roteiro das simulações (**Tabela 32**).

Tabela 32: Roteiro de cada etapa das simulações

Etapas	Item verificado	Tipologia simulada	Dados de entrada	Demais parâmetros
1	Temperatura do solo	TA	Dados da Tabela 23 , sendo a temperatura do solo utilizada explicada no item 4.13.1 dos resultados	<ul style="list-style-type: none"> • Orientação Norte=0° • Modelagem com medidas externas da geometria • Com caixilhos • Com venezianas • Com beirais conforme projeto
2	Definição da orientação mais crítica das tipologias para realizar os testes, com as temperaturas do solo dadas na <u>Etapa 1</u>	TA TB	Dados da Tabela 23	<ul style="list-style-type: none"> • Orientação Norte=0°, 90°, 180° e 270° • Modelagem com medidas externas da geometria • Com caixilhos • Com venezianas • Com beirais conforme projeto
3	Caso base de cada tipologia, com as orientações definidas na <u>Etapa 2</u>	TA TB		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com medidas <u>externas</u> da geometria • Com caixilhos • Com venezianas • Com beirais conforme projeto
4	Medidas da modelagem: modelou-se a tipologia a partir de suas medidas internas, desconsiderando-se a espessura das paredes ¹	TA TB		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com <u>medidas internas</u> da geometria • Com caixilhos • Com venezianas • Com beirais conforme projeto
5	Caixilhos: excluiu-se o caixilho das janelas expostas ao exterior da modelagem	TA TB		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com medidas externas da geometria • <u>Sem caixilhos</u> • Com venezianas • Com beirais conforme projeto
6	Venezianas: excluíram-se as venezianas das janelas dos dormitórios	TA TB		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com medidas externas da geometria • Com caixilhos • <u>Sem venezianas</u> • Com beirais conforme projeto
7	Beirais: excluíram-se os beirais da modelagem	TA		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com medidas externas da geometria • Com caixilhos • Com venezianas • <u>Sem beirais</u>

Etapas	Item verificado	Tipologia simulada	Dados de entrada	Demais parâmetros
8	Exclusão de caixilhos, venezianas e beirais do caso base, simultaneamente (beirais apenas para TA)	TA TB	Dados da Tabela 23	<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com medidas externas da geometria • <u>Sem caixilhos</u> • <u>Sem venezianas</u> • <u>Sem beirais</u>
9	Solução final, adotada após a análise dos resultados das etapas anteriores	TA TB		<ul style="list-style-type: none"> • Modelagem com <u>medidas intermediárias</u> da geometria • <u>Sem caixilhos</u> • <u>Com venezianas</u> • <u>Com beirais</u> conforme projeto (apenas TA)

Notas

As variações não foram cumulativas. A cada novo teste um único parâmetro do caso base foi variado.

¹ A alternativa de modelagem pelo eixo das paredes não foi testada, pois optou-se por fazer os extremos, modelagem pelas medidas internas ou externas da tipologia, que resultaria na maior diferença entre os resultados.

Para esta etapa, a análise dos resultados foi feita de duas formas:

1) através do parâmetro "graus-hora" (°Ch) de desconforto anual por frio ou por calor;

2) através da análise pelo dia típico, proposta pela NBR 15575.

As análises de graus-hora de desconforto e dos dias típicos foram feitas para os ambientes de permanência prolongada das habitações: salas e quartos.

4.1.3. IMPACTO DA TEMPERATURA DO SOLO NOS MODELOS

Segundo Sorgato (2009), a temperatura do solo é um parâmetro importante no resultado final das trocas de calor do ambiente, principalmente nas simulações de edifícios térreos, uma vez que influencia a troca de calor piso-solo.

Para a definição das temperaturas a serem usadas nas simulações, foi utilizada apenas a tipologia de habitação térrea. Este modelo foi simulado considerando-se três opções:

- situação 1: temperatura do solo igual à temperatura média do ar exterior
- situação 2: temperatura do solo obtida por meio do programa Slab do *EnergyPlus*, de acordo com o procedimento descrito a seguir.
- situação 3: temperatura obtida pelo mesmo programa Slab, de acordo com o procedimento descrito na sequência.

Os procedimentos adotados para se obter a temperatura do solo para as situações 2 e 3 foram muito semelhantes, apenas com uma ligeira diferença.

Em ambos os casos, primeiro o modelo térreo (com as características de referência) foi simulado adotando-se a temperatura mensal do solo igual a temperatura média do ar (na situação 2) ou a temperatura do solo medida a 0,5 m de profundidade, disponível no arquivo .epw (na situação 3) . Depois disso, a temperatura média do ar no interior da sala foi usada como uma entrada para o programa Slab. A ferramenta *Slab*, programa auxiliar vinculado ao *EnergyPlus*, calcula a temperatura média do solo mensal para o clima escolhido, com base nos valores médios de temperaturas internas e externas da edificação. A nova temperatura do solo obtida com o programa foi então reinserida no arquivo .idf do modelo térreo, e a habitação foi novamente simulada. A temperatura média do ar interior obtida nesta etapa foi utilizada para executar o programa Slab e uma nova temperatura mensal do solo foi obtida. Continuou-se o processo até a convergência da temperatura do solo.

Nas três situações, limitou-se a temperatura mínima a 18°C – isto é, quando a temperatura do solo foi menor que 18°C, foi adotada a temperatura de 18°C.

A **Tabela 33** mostra os valores mensais de temperatura do solo nos três casos (situações 1, 2 e 3, respectivamente).

Tabela 33: Temperaturas finais do solo obtidas para cada situação

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Situação 1	21.7	22.5	21.6	20.5	18	18	18	19.8	19.5	22.3	21.8	21.7
Situação 2	21.6	22.3	21.7	20.8	18	18	18	19.4	19.6	21.8	22.1	22.1
Situação 3	22.4	23.1	22.5	21.4	18.7	18	18.1	20.1	20.4	22.7	23.1	23.1

A seguir (**Tabela 34**), tem-se as temperaturas do solo a 0.50 m de profundidade utilizadas (segundo o arquivo climático .epw para São Carlos):

Tabela 34: Temperaturas do solo a 0,50m de profundidade de acordo com arquivo climático

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
22.7	22.2	21.3	20.5	19	18.1	17.9	18.4	19.3	20.5	21.7	22.5

4.1.3.1. RESULTADOS

As temperaturas do solo empregadas nos testes foram simuladas para a TA no norte 0°. A seguir são apresentados os resultados obtidos (**Tabela 35**):

Tabela 35: Resultados para os testes de temperatura do solo

GRAUS-HORA						
	SALA		QUARTO 1		QUARTO 2	
	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO
Situação 1	420.7	1097.6	324.5	1358.5	373.8	1343.3
Situação 2	408.2	1098.1	310.5	1359.4	360.3	1344.6
Situação 3	581.9	969.5	444.1	1213.3	506.8	1201.4
* Se GH= 0: não foi acusado desconforto						
DIA TÍPICO VERÃO: $T_{i,max} \leq 26,9$ INVERNO: $T_{i,min} \geq 17,9^{\circ}\text{C}$						
	SALA		QUARTO 1		QUARTO 2	
	VERÃO $T_{i,max} - T_{e,max}$	INVERNO $T_{i,min} - T_{e,min}$	VERÃO $T_{i,max} - T_{e,max}$	INVERNO $T_{i,min} - T_{e,min}$	VERÃO $T_{i,max} - T_{e,max}$	INVERNO $T_{i,min} - T_{e,min}$
Situação 1	+0.5	+4.5	+0.1	+4.1	+0.1	+4.0
Situação 2	+0.4	+4.3	0.0	+4.0	+0.1	+3.9
Situação 3	+0.7	+4.6	+0.3	+4.3	+0.3	+4.2
<p>NOTAS</p> <p>A temperatura mostrada refere-se à diferença entre a temperatura interna dos ambientes e a temperatura exigida pela Norma, especificada no cabeçalho da tabela. Assim, valores negativos no verão e valores positivos no inverno indicam conformidade em relação à norma.</p> <p>$T_{i,max}$ = temperatura interna máxima $T_{e,max}$ = temperatura externa máxima $T_{i,min}$ = temperatura interna mínima $T_{e,min}$ = temperatura externa mínima</p> <p> Não atende ao desempenho mínimo especificado  Desempenho mínimo  Desempenho intermediário  Desempenho superior</p>						

Nota-se que as temperaturas dadas nas situações 1 e 2, por serem mais baixas, apresentam valores altos de graus-hora de frio e baixos valores para os graus-hora de calor. Percebe-se também uma diferença maior entre estes valores. Já na situação 3 os valores encontram-se mais equilibrados, e condizentes com as condições climáticas de São Carlos.

Assim, as temperaturas adotadas para as simulações foram as dadas na situação 3.

4.1.4. IMPACTO DOS PARÂMETROS: MEDIDAS INTERNAS, CAIXILHOS, VENEZIANAS E BEIRAS

4.1.4.1. DEFINIÇÃO DA ORIENTAÇÃO PARA ANÁLISE

Para a realização dos testes, identificou-se a orientação do caso base com maior graus-hora de aquecimento e resfriamento e a orientação com os dias típicos de verão e inverno mais críticos (maior temperatura interna para o verão e menor temperatura interna

para o inverno). O caso base considerou as medidas externas da edificação e a inclusão de todos os elementos analisados: caixilhos, venezianas e beirais (se especificados em projeto). A **Tabela 36** apresenta essa soma dos graus-hora para cada orientação analisada, tanto para cada ambiente considerado (sala, quartos 1 e 2), quanto para os três somados. A **Tabela 37** mostra as temperaturas obtidas para os dias típicos.

Tabela 36: GH de desconforto em cada orientação - TA

Orientação	Ambiente	°Ch calor	°Ch frio	Soma do ambiente (°Ch)	Soma total em cada orientação (°Ch)
0°	Sala	492	1003.9	1495.9	4796.1
	Quarto 1	381.7	1248.3	1630	
	Quarto 2	430.9	1239.3	1670.2	
90°	Sala	457.9	1110.7	1568.6	4756.8
	Quarto 1	455.7	1061.2	1516.9	
	Quarto 2	436.2	1235.1	1671.3	
180°	Sala	440.3	1172.5	1612.8	4353.2
	Quarto 1	444.8	935.9	1380.7	
	Quarto 2	400.5	959.2	1359.7	
270°	Sala	487.6	1067.5	1555.1	4681
	Quarto 1	458.4	1153.2	1611.6	
	Quarto 2	492.9	1021.4	1514.3	

 Pior situação no somatório da unidade por orientação

Tabela 37: Temperaturas máximas e mínimas em cada orientação – TA

Orientação	Ambiente	Dia típico verão	Dia típico inverno
0°	Sala	27.5	19.5
	Quarto 1	27.1	19.1
	Quarto 2	27.2	19.0
90°	Sala	27.3	19.2
	Quarto 1	28.4	19.6
	Quarto 2	28.2	19.2
180°	Sala	27.4	19.2
	Quarto 1	27.2	19.7
	Quarto 2	27.1	19.8
270°	Sala	28.2	19.4
	Quarto 1	27.3	19.1
	Quarto 2	27.5	19.5
Pior situação para o dia típico de inverno e verão		VERÃO 28.4°C no quarto 1, orientação 90°	INVERNO 19.0°C no quarto 2, orientação 0°

Nota-se que a orientação que apresentou maior número de graus-hora de desconforto para a TA, considerando-se a soma total na unidade, foi N=0° (4796.1°C/h). Assim, foi esta a orientação utilizada nas simulações seguintes para a análise de graus-hora da TA. Já nos dias típicos, a pior situação ocorreu com o norte a 0° no quarto 2 no inverno, e com o norte a 90° no quarto 1 no verão. Estas situações correspondem ao especificado pela NBR 15575, que recomenda:

- verão: janela do dormitório ou sala voltada para oeste e a outra parede exposta voltada ao norte (situação do quarto 1, N=90°);
- inverno: janela do dormitório ou sala voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste (situação do quarto 2, N=0°).

Foram estas, portanto, as orientações e os ambientes utilizados nos testes seguintes para as análises dos dias típicos da unidade.

A **Tabela 38** apresenta os resultados obtidos para a TB, onde se considerou a soma de todo o andar (soma das salas e quartos das quatro unidades do andar). A **Tabela 39** mostra as temperaturas obtidas para os dias típicos.

Tabela 38: GH de desconforto em cada orientação – TB

Orientação	Unidade de apartamento (A, B, C, D)	Ambiente	°Ch calor	°Ch frio	Soma do ambiente	Soma por unidade
0°/180°	A / 0° = C / 180°	Sala	1085.9	1510.4	2596.3	8633.6
		Quarto 1	709.7	2295.7	3005.4	
		Quarto 2	754.4	2277.5	3031.9	
	B / 0° = D / 180°	Sala	1244.6	1060.5	2305.1	7003
		Quarto 1	1050.1	1261	2311.1	
		Quarto 2	1029.2	1357.6	2386.8	
	C / 0° = A / 180°	Sala	1286.6	1069.3	2355.9	6998.6
		Quarto 1	837.5	1372.4	2209.9	
		Quarto 2	1033.5	1399.3	2432.8	
	D / 0° = B / 180°	Sala	1310.4	1401.9	2712.3	8800.6
		Quarto 1	887.3	2097.6	2984.9	
		Quarto 2	1025.5	2077.9	3103.4	
Soma por andar em cada orientação						31435.8

Orientação	Unidade de apartamento (A, B, C, D)				Ambiente	
90°/270°	A / 90° = C / 270°	Sala	1367.3	1178.6	2545.9	8054.9
		Quarto 1	888.7	1963.5	2852.2	
		Quarto 2	1011.2	1645.6	2656.8	
	B / 90° = D / 270°	Sala	1646.9	1112.8	2759.7	8536.5
		Quarto 1	1302.2	1695.2	2997.4	
		Quarto 2	1328.9	1450.5	2779.4	
	C / 90° = A / 270°	Sala	1445.4	1612.7	3058.1	9191.7
		Quarto 1	1079.9	1865.8	2945.7	
		Quarto 2	1060.3	2127.6	3187.9	
	D / 90° = B / 270°	Sala	1401.7	1606.8	3008.5	9205.2
		Quarto 1	1144.2	1851.7	2995.9	
		Quarto 2	1055	2145.8	3200.8	
	Soma por andar em cada orientação					34988.3
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 10px; background-color: #c00000; margin-right: 5px;"></div> Piores situações no somatório da unidade e no somatório por andar </div>						

Tabela 39: Temperaturas máximas e mínimas em cada orientação – TB

Orientação	Unidade de apartamento (A, B, C, D)	Ambiente	Dia típico verão	Dia típico inverno
0°/180°	A / 0° = C / 180°	Sala	28.1	20.6
		Quarto 1	26.8	18.9
		Quarto 2	27.1	19.2
	B / 0° = D / 180°	Sala	28.3	21.4
		Quarto 1	27.5	21.1
		Quarto 2	27.6	21.1
	C / 0° = A / 180°	Sala	28.2	21.3
		Quarto 1	27.0	21.0
		Quarto 2	27.5	20.8
	D / 0° = B / 180°	Sala	28.3	20.6
		Quarto 1	27.2	19.1
		Quarto 2	27.6	19.2
90°/270°	A / 90° = C / 270°	Sala	29.4	21.5
		Quarto 1	28.8	20.0
		Quarto 2	29.0	20.6
	B / 90° = D / 270°	Sala	29.1	21.7
		Quarto 1	28.4	20.2
		Quarto 2	28.4	20.9
	C / 90° = A / 270°	Sala	28.9	20.4
		Quarto 1	28.1	19.7
		Quarto 2	27.8	19.2
	D / 90° = B / 270°	Sala	29.5	20.4
		Quarto 1	29.5	20.0
		Quarto 2	29.0	19.4
Pior situação para o dia típico de inverno e verão			VERÃO 29.5°C na sala e no quarto 1 da unidade D, orientação 90° (corresponde à mesma situação na unidade B, norte 270°)	INVERNO 18.9°C no quarto 1 da unidade A, orientação 0° (que corresponde à mesma situação na unidade C, norte 180°)

Para a análise da TB, a orientação com maior número de graus-hora de desconforto por andar foi N=90° (34988.3°C/h), que, devido à simetria do projeto, corresponde também ao N=270°. Pelo dia típico da NBR 15575, a temperatura máxima para o dia típico de verão foi 29,5°C para a sala e para o quarto 1 da unidade D na orientação N=90°. Esta situação corresponde à unidade B com norte a 270°, e corresponde ao especificado na norma: janela voltada para oeste e a outra parede exposta voltada ao norte. Já a temperatura mínima para o inverno foi 18,9°C para o quarto 1 da unidade A na orientação N=0°C (que corresponde também à unidade C com norte a 180°). Tal orientação também atende à norma: janela voltada para sul e a outra parede exposta voltada para leste. Assim, comparando-se os resultados, optou-se por realizar as simulações com N=90° na unidade D

para a análise de graus-hora de desconforto e também para o dia típico de verão (verificando o quarto 1 da unidade D), e a orientação com $N=0^\circ$ para a análise do dia típico de inverno (verificando o quarto 1 da unidade A).

4.1.4.2. HABITAÇÃO TÉRREA

A **Tabela 40** apresenta os resultados da simulação da habitação térrea, na orientação adotada ($N=0^\circ$). São apresentados os resultados em sete situações:

- situação 1: com medidas externas, caixilhos, venezianas e beirais
- situação 2: **com medidas internas**, caixilhos, venezianas e beirais
- situação 3: com medidas externas, **sem caixilhos**, com venezianas e beirais
- situação 4: com medidas externas, caixilhos, **sem venezianas** e com beirais
- situação 5: com medidas externas, caixilhos, com venezianas e **sem beirais**
- situação 6: com medidas externas, **sem caixilhos, sem venezianas e sem beirais**
- situação 7: **com medidas intermediárias**, sem caixilhos, **com venezianas e beirais**.

Esses resultados se referem à porcentagem de graus-hora de resfriamento e aquecimento para cada ambiente (sala e quartos) em relação ao caso base (situação 1). Os dias típicos se referem à análise da orientação 0° no quarto 2 para o inverno, e à orientação 90° no quarto 1 para o verão. A temperatura apresentada nas tabelas refere-se à diferença entre a temperatura interna dos ambientes e a temperatura exigida pela Norma, segundo especificado no cabeçalho. Assim, valores negativos no verão e valores positivos no inverno indicam conformidade em relação à norma.

Tabela 40: TA - Resultados para os testes: medidas da geometria, caixilhos, venezianas e beirais

GRAUS-HORA (em % a partir do resultado do caso base)						
	SALA		QUARTO 1		QUARTO 2	
	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO
Situação 1	492	1003.9	381.7	1248.3	430.9	1239.3
Situação 2	+5.7%	-0.3%	+4.2%	+1.1%	+4.5%	+0.8%
Situação 3	+2.7%	-2.1%	+0.6%	-0.4%	+0.6%	-0.5%
Situação 4	+3.2%	-1.3%	+13.3%	-2.6%	+13.7%	-2.7%
Situação 5	+9.2%	-0.2%	+4.7%	+0.5%	+4.2%	+0.5%
Situação 6	+16.6%	-3.7%	+20.0%	-2.8%	+19.9%	-2.9%
Situação 7	+3.6%	-5.7%	+1.2%	-2.8%	+0.6%	-3.1%
DIA TÍPICO VERÃO: $T_{i, \max} \leq 26,9$ INVERNO: $T_{i, \min} \geq 17,9^{\circ}\text{C}$						
	Quarto 1 $T_{e, \max} - T_{i, \max}$			Quarto 2 $T_{e, \min} - T_{i, \min}$		
Situação 1	+1.5			+4.1		
Situação 2	+1.6			+4.2		
Situação 3	+1.5			+4.2		
Situação 4	+1.5			+4.2		
Situação 5	+1.6			+4.1		
Situação 6	+1.6			+4.2		
Situação 7	+1.5			+4.3		
NOTAS						
Conforme descrito na Metodologia, a temperatura mostrada refere-se à diferença entre a temperatura interna dos ambientes e a temperatura exigida pela Norma, especificada no cabeçalho da tabela. Assim, valores negativos no verão e valores positivos no inverno indicam conformidade em relação à norma.						
$T_{i, \max}$ = temperatura interna máxima						
$T_{e, \max}$ = temperatura externa máxima						
$T_{i, \min}$ = temperatura interna mínima						
$T_{e, \min}$ = temperatura externa mínima						
 Não atende ao desempenho mínimo especificado						
 Desempenho mínimo						
 Desempenho intermediário						
 Desempenho superior						

Os resultados indicaram uma maior divergência entre as situações analisadas nos valores de graus-hora do que nas temperaturas dos dias típicos. A diferença máxima nos dias típicos foi de 0.2°C (entre a situação 1 e a situação 7, no inverno), enquanto que nos graus-hora, chegou a 20% para o desconforto por calor (situação 6). Essa diferença deve-se ao fato de que a influência de um determinado parâmetro é somada ao longo de todo o ano quando se trata da primeira análise, o que conseqüentemente já era de se esperar que resultasse em um impacto maior.

Com relação ao dia típico, nota-se que os parâmetros variados nas situações analisadas não fizeram diferença no estabelecimento do nível de desempenho pela NBR

15575: todos os casos obtiveram o nível mínimo de desempenho no inverno e não atingiram o desempenho adequado no verão, independentemente das alterações feitas.

A partir da observação dessas diferenças entre os graus-hora, verificou-se que os parâmetros que mais influenciam nas simulações para avaliação do desempenho térmico de habitações sociais são: escolha das medidas da geometria para a modelagem, venezianas nos dormitórios e beirais, conforme o projeto. Todos estes parâmetros apresentaram diferenças acima de 5% em ao menos um dos ambientes analisados, em relação ao caso base (situação 1). Identificou-se que as melhores alternativas são: modelar a geometria a partir das medidas do eixo das paredes, e modelar venezianas e beirais quando previstos em projeto. Como a tipologia analisada apresenta estes elementos, foi realizado um último teste utilizando estes parâmetros (situação 7: medidas intermediárias, venezianas e beirais), comparando-o também com o caso base (situação 1) e com o caso modelado com medidas externas, sem caixilhos, sem venezianas, e sem beirais (situação 6). Apesar da maior diferença verificada entre as situações extremas (situações 1 e 6), a situação 7 também apresentou um dos ambientes com diferença acima de 5% em relação ao caso base.

4.1.4.3. HABITAÇÃO MULTIFAMILIAR

A **Tabela 41** apresenta os resultados da simulação da habitação multipavimentos, na orientação adotada (N=270°). São apresentados os resultados em seis situações:

- situação 1: com medidas externas, caixilhos e venezianas
- situação 2: **com medidas internas**, caixilhos e venezianas
- situação 3: com medidas externas, **sem caixilhos** e com venezianas
- situação 4: com medidas externas, caixilhos e **sem venezianas**
- situação 5: com medidas externas, **sem caixilhos e sem venezianas**
- situação 6: **com medidas intermediárias**, sem caixilhos, e **com venezianas**.

Esses resultados se referem à porcentagem de graus-hora de resfriamento e aquecimento para cada ambiente (sala e quartos) da unidade D em relação ao caso base (situação 1). A temperatura apresentada nas análises do dia típico, conforme mencionado, refere-se à diferença entre a temperatura interna dos ambientes e a temperatura exigida pela Norma. Os ambientes avaliados foram o quarto 1 na unidade D e o quarto 1 na unidade A, para verão e inverno, respectivamente. Valores negativos no verão e valores positivos no inverno indicam conformidade em relação à norma.

Tabela 41: TB - Resultados para os testes: medidas da geometria, caixilhos, venezianas e beirais

GRAUS-HORA (em % a partir do resultado do caso base)						
	SALA		QUARTO 1		QUARTO 2	
	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO	°Ch CALOR	°Ch FRIO
Situação 1	1401.7	1606.8	1144.2	1851.7	1055	2145.8
Situação 2	-2.8%	-2.8%	+0.8%	-1.1%	+1.5%	-1.3%
Situação 3	+3.2%	-1.7%	+1.5%	-0.9%	+1.3%	-0.9%
Situação 4	+8.6%	-4.7%	+20.4%	-7.1%	+21.2%	-7.1%
Situação 5	+12.0%	-6.3%	+22.3%	-8.1%	+22.9%	-8.0%
Situação 6	+1.7%	-4.7%	+1.5%	-2.6%	+1.7%	-1.7%
DIA TÍPICO VERÃO: $T_{i, \max} \leq 26, 9^{\circ}\text{C}$ INVERNO: $T_{i, \min} \geq 17, 9^{\circ}\text{C}$						
	Quarto 1 Te máx - Ti máx			Quarto 2 Te mín - Ti mín		
Situação 1	+2.6			+4.0		
Situação 2	+2.7			+3.9		
Situação 3	+2.7			+4.0		
Situação 4	+2.9			+4.1		
Situação 5	+3.0			+4.1		
Situação 6	+1.0			+5.1		
NOTAS						
Conforme descrito na Metodologia, a temperatura mostrada refere-se à diferença entre a temperatura interna dos ambientes e a temperatura exigida pela Norma, especificada no cabeçalho da tabela. Assim, valores negativos no verão e valores positivos no inverno indicam conformidade em relação à norma.						
$T_{i, \max}$ = temperatura interna máxima						
$T_{e, \max}$ = temperatura externa máxima						
$T_{i, \min}$ = temperatura interna mínima						
$T_{e, \min}$ = temperatura externa mínima						
 Não atende ao desempenho mínimo especificado						
 Desempenho mínimo						
 Desempenho intermediário						
 Desempenho superior						

Na análise da habitação multifamiliar, as diferenças entre as diversas situações testadas foram maiores que no caso da tipologia térrea, tanto na análise de graus-hora quanto na análise pelos dias típicos. Foram observadas mudanças maiores, em termos de valores, nos graus-hora de desconforto por calor e nas temperaturas do dia típico de verão, em detrimento aos graus-hora de frio e temperaturas do dia típico de inverno. Na análise dos graus-hora de desconforto a diferença máxima chegou a 22.9% para os graus-hora de calor (situação 5). Nas temperaturas dos dias típicos, a diferença máxima foi de 1.6°C para o verão (entre a situação 1 e a situação 6). Entre estas mesmas situações (1 e 6), verificou-se inclusive mudança na avaliação de desempenho (de mínimo para intermediário) no inverno, onde a diferença foi de 1.1°C.

Nesta análise, verificou-se que o parâmetro que mais influenciou nas simulações foi a veneziana nos dormitórios (situação 4), que apresentou diferenças acima de 5% na maioria

dos ambientes analisados em relação ao caso base (situação 1). A partir disso, a situação 5, com exclusão de venezianas e de caixilhos, também apresentou diferenças maiores que 5% em todas as situações – porém, tal diferença deve-se mais às venezianas que aos caixilhos, cuja análise individual na situação 3 atingiu no máximo 3.2% em um único ambiente. O teste feito com as medidas intermediárias e com uso de venezianas (situação 6), não apresentou diferenças significativas em relação à situação 1, porém, apresentou alteração no nível de desempenho pela avaliação do dia típico de inverno, comprovando a importância da escolha das medidas da geometria para a modelagem e dos elementos de sombreamento – venezianas – nos resultados das simulações.

4.2. AVALIAÇÃO DOS VALORES-LIMITE DE TRANSMITÂNCIA ESTABELECIDOS PELA NBR 15575 E PELO RTQ-R

4.2.1. INTRODUÇÃO

A nova norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013) e o regulamento RTQ-R (INMETRO, 2010) apresentam os mesmos valores-limite para as propriedades da envoltória de habitações em cada zona bioclimática brasileira. O objetivo deste capítulo é analisar a coerência destes valores na avaliação do conforto térmico de uma habitação, investigando se eles correspondem ao real desempenho desse tipo de edifício. Para isto, será aplicado tanto o método da NBR 15575 quanto uma simulação usual quantificando os graus-hora de desconforto anual.

No procedimento simplificado da NBR 15575 e na parte de pré-requisitos exigidos pelo RTQ-R, verifica-se o atendimento aos valores de transmitância térmica (U), absorvância solar (α) e capacidade térmica (C) para os sistemas de vedações verticais externas e para o sistema de cobertura. Nota-se que na lógica adotada pela norma e pelo regulamento, melhores níveis de desempenho relacionam-se a baixos valores de U e de absorvância solar (α). A seguir, são colocados os valores para a zona bioclimática 4, à qual São Carlos pertence (**Tabela 42**).

Tabela 42: Propriedades térmicas de paredes e coberturas segundo a NBR 15575 e o RTQ-R

			$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
Paredes (Desempenho Mínimo/M)	U (W/m ² .K)	M	$\leq 3,7$	$\leq 2,5$
	CT (KJ/m ² .K)		≥ 130	
Coberturas (Desempenho Mínimo/M, Intermediário/I ou Superior/S)	U (W/m ² .K)	M	$\leq 2,3$	$\leq 1,5$
		I	$\leq 1,5$	$\leq 1,0$
		S	$\leq 1,0$	$\leq 0,5$

Notas

Paredes são classificadas apenas no nível mínimo de desempenho

4.2.2. MÉTODOS

Foi analisado o desempenho térmico da tipologia A a partir dos dois procedimentos indicados na norma – simplificado e de simulação, independente do edifício ter ou não atendido ao método simplificado (ver **Item 2.2.2**).

Para avaliar a coerência entre os métodos, o procedimento de simulação foi feito considerando variações nos valores de transmitância e absorvância. Os valores foram escolhidos de forma a abranger todas as faixas que a norma considera para a zona bioclimática 4.

Complementando a avaliação estipulada pela NBR 15575, também foi realizada uma análise pelo método de graus-hora de desconforto por calor e frio baseada no desempenho anual da habitação, em contrapartida à verificação dos dias típicos. Os limites de conforto definidos foram 18°C e 26°C (ver **item 3.6.2 e 3.6.3**).

Para esta análise, avaliou-se a orientação com maior número de graus-hora de desconforto total, somando-se os três ambientes de longa permanência (sala e quartos). Esta avaliação prévia trouxe como resultado a orientação à 0°, para a qual foram analisados os demais resultados.

4.2.2.1. PAREDES COM DIFERENTES VALORES DE U E ABSORTÂNCIAS

No **Gráfico 2** é mostrado o resultado referente às simulações de acordo com o procedimento de simulação da norma, que considera o dia típico de verão, e no **Gráfico 3**, o resultado referente a essas mesmas simulações, feitas para um ano típico. No **Gráfico 2** tem-se no eixo y a T_i , máx do dia típico de verão do quarto 1 (quarto mais quente no verão, com pior exposição solar), em função de diferentes transmitâncias e absorvâncias das paredes da habitação. Em todas as combinações apresentadas nesses gráficos, a cobertura foi mantida com $U=1,61$ e $\alpha=0,3$. São indicados no gráfico os níveis de desempenho que essa habitação teria, de acordo com os critérios da norma, apresentada na metodologia. O mesmo tipo de gráfico é apresentado no **Gráfico 3**, com os graus-hora de calor anuais representados no eixo y. Esses graus-hora correspondem à soma dos graus-hora de calor anuais dos ambientes de maior permanência (o critério foi apresentado na metodologia). Nesse caso, não se tem os níveis de desempenho, pois esse não é um método regulamentado pela norma.

No **Gráfico 2** observa-se que não foi atingido o desempenho mínimo nos casos com valores mais altos de absorvância e U. Esses resultados seguem o mesmo padrão dos limites da tabela do método simplificado (**Tabela 36**), onde, a partir de um valor de absorvância, são aceitas paredes com U somente abaixo de certos limites. No entanto, os limites encontrados para essa situação, diferem um pouco do estabelecido na NBR 15575 e no RTQ-R. Os resultados para a simulação do ano típico apresentam o mesmo padrão de gráfico.

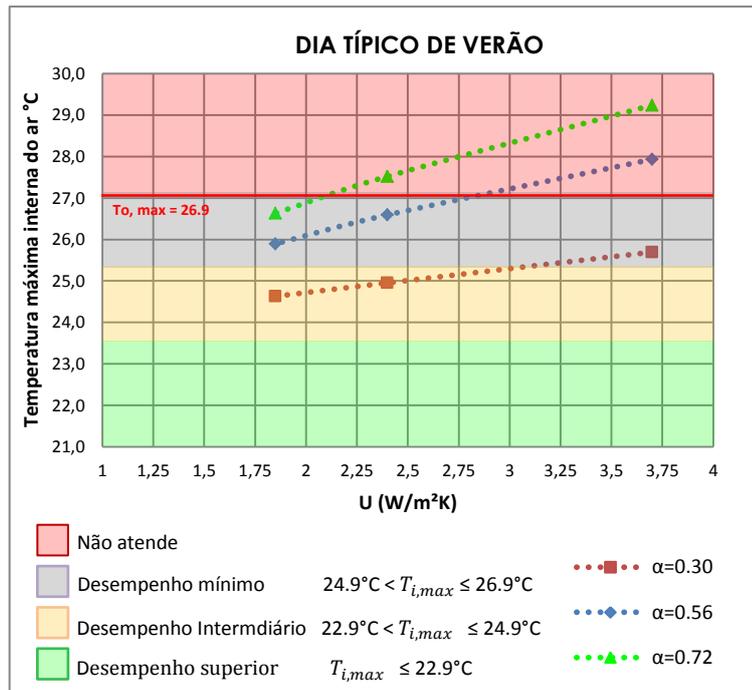


Gráfico 2: Avaliação das paredes pelo dia típico de verão

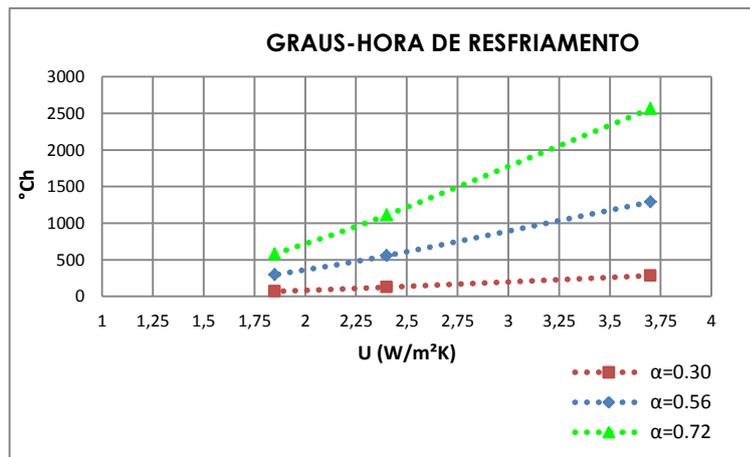


Gráfico 3: Avaliação das paredes pelos graus-hora anuais de calor

Os **Gráficos 4 e 5** apresentam a $T_{i, \text{mín.}}$ do dia típico de inverno do quarto 2 (quarto mais frio no inverno e com pior exposição) e os graus-hora de frio dos ambientes de maior permanência, para as mesmas situações das figuras correspondentes ao dia típico de verão e graus-hora de calor. Verifica-se que o desempenho mínimo ou intermediário foi atingido em todas as situações analisadas. De forma análoga ao verão, paredes com maior U possuem pior desempenho (temperaturas mais baixas no inverno). No entanto, com relação à cor, o resultado foi o oposto do observado para o verão: quanto maior a absorvância, melhor o desempenho. Resultados similares foram obtidos pelo método de análise anual. Ou seja, os dados para o inverno não vão de encontro ao que é prescrito pelo método simplificado da NBR 15575 e nem pelos pré-requisitos do RTQ-R.

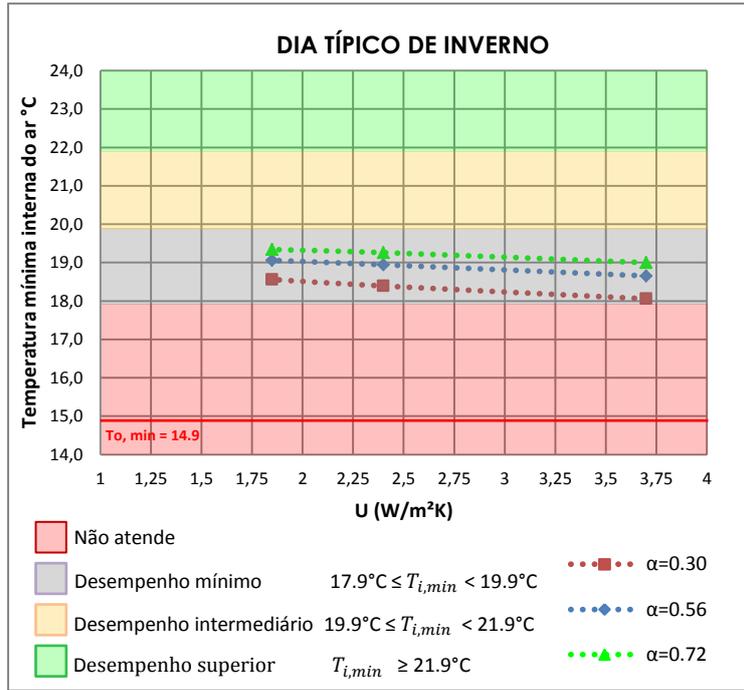


Gráfico 4: Avaliação das paredes pelo dia típico de inverno

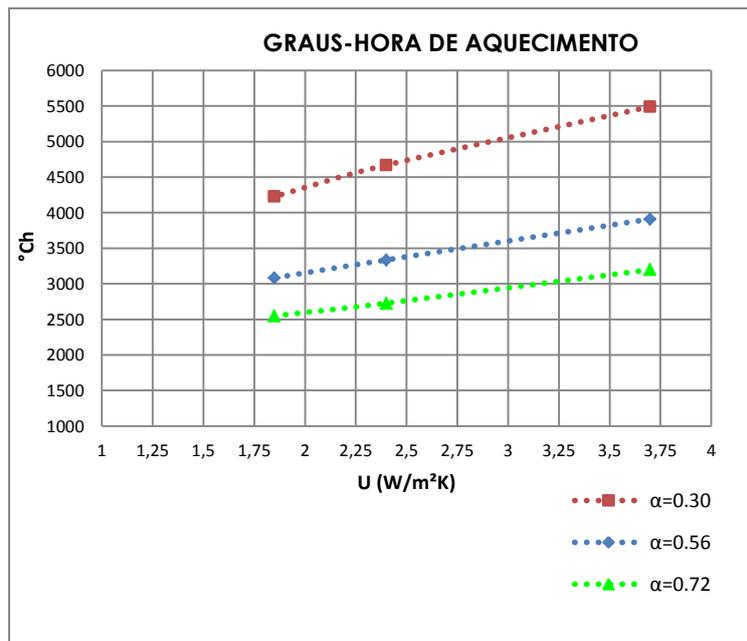


Gráfico 5: Avaliação das paredes pelos graus-hora anuais de frio

4.2.2.2. COBERTURAS COM DIFERENTES VALORES DE U E ABSORTÂNCIAS

De forma análoga às paredes, os **Gráficos 6, 7, 8 e 9** referem-se à variação de transmitâncias e absorvâncias da cobertura, para esses mesmos dias típicos e ano típico. Nesses casos, a parede foi mantida com $U=2,4$ e $\alpha=0,3$ para todas as combinações.

Os resultados para o dia típico de verão são muito similares aos das paredes, e vão de encontro à lógica da tabela de limites para as propriedades térmicas do método

simplificado: quanto maior a absorvância e o U, pior o desempenho. Também de forma similar, os limites não correspondem exatamente aos estabelecidos pela norma. Também os resultados para a simulação do ano típico apresentam o mesmo padrão de gráfico.

Quanto ao desempenho no inverno para o dia típico, esse apresentou resultados distintos aos das paredes: valores mais altos de U associados à valores também altos de absorvância apresentaram melhor desempenho. No entanto, se estes mesmos valores estiverem associados à baixas absorvâncias, apresentam baixo desempenho, contrariando a lógica do método simplificado. Os resultados observados para a análise do ano típico por sua vez diferem-se do observado no dia típico, e são similares aos resultados das paredes para a mesma situação: coberturas com maior transmitância apresentam pior desempenho. Também com relação à cor, assim como para as paredes no inverno, maiores valores de absorvância possuem melhor desempenho, confirmando que os dados para o inverno divergem do que é prescrito pelo método simplificado.

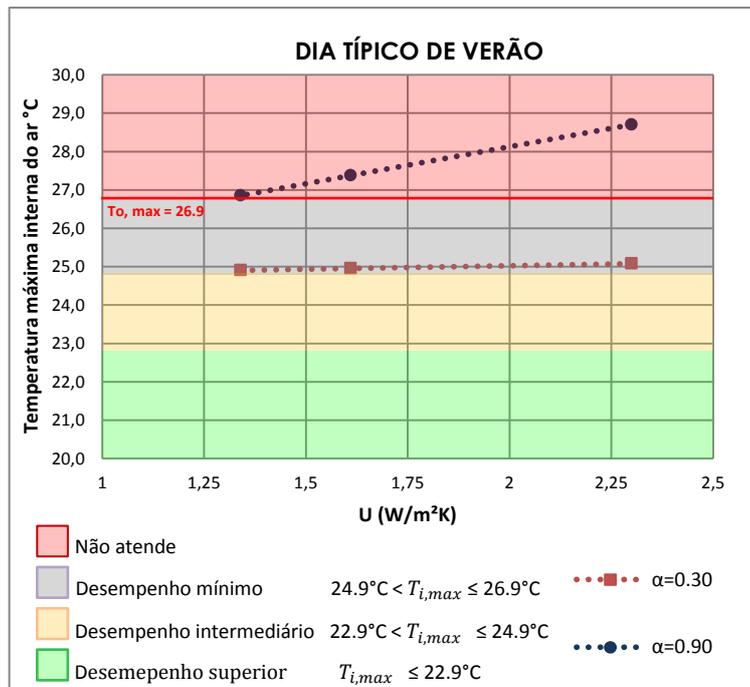


Gráfico 6: Avaliação das coberturas pelo dia típico de verão

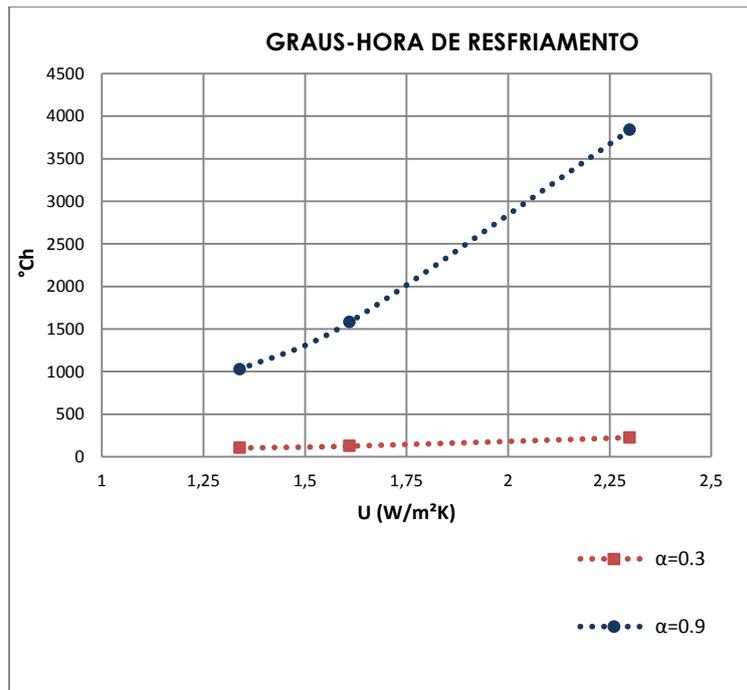


Gráfico 7: Avaliação das coberturas pelos graus-hora anuais de calor

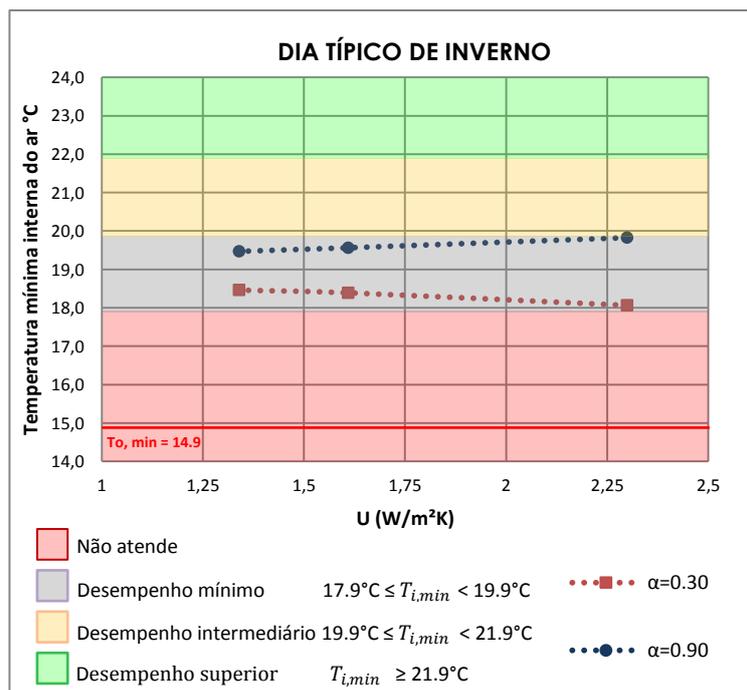


Gráfico 8: Avaliação das coberturas pelo dia típico de inverno

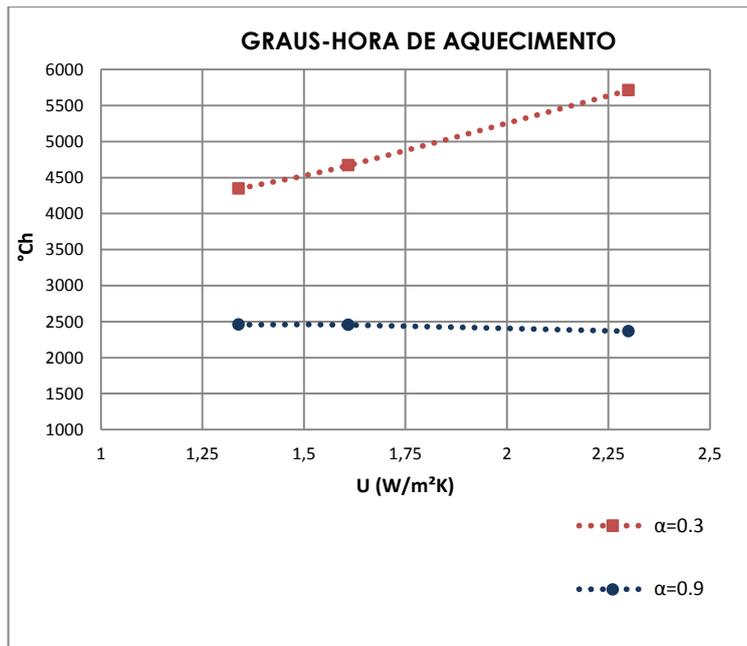


Gráfico 9: Avaliação das coberturas pelos graus-hora anuais de frio

4.2.2.3. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO E SIMPLIFICADO DA NBR 15575

A **Tabela 43** a seguir apresenta os níveis de desempenho obtidos pelo procedimento simplificado, comparando-os aos resultados do procedimento de simulação da NBR 15575. Na análise pelo procedimento simplificado, a transmitância, a absortância e a capacidade térmica das paredes e da cobertura devem obedecer a certos limites. Estes limites coincidem com os limites prescritos pelo regulamento RTQ-R. Ou seja, pelo procedimento simplificado é avaliado somente o desempenho das paredes e coberturas. Nos casos estudados, verifica-se que caso as paredes ou a cobertura apresentem absortância acima de 0,6 (cores escuras) e a sua transmitância térmica esteja acima de 3,7 (para as paredes) ou 1,61 (para as coberturas), o desempenho mínimo não é atendido. Quando isso ocorre, a norma exige que seja feito o procedimento de simulação, quando então é avaliado o desempenho da habitação como um todo. Caso contrário, não é necessário simular o edifício.

Tabela 43: Atendimento aos métodos simplificado e de simulação da NBR 15575

Propriedades térmicas do envelope – Paredes e Coberturas (U, a)	Avaliação pelo Procedimento Simplificado		Avaliação pelo Procedimento de Simulação Computacional	
	Desempenho		Desempenho	
	Paredes ¹	Coberturas	Inverno	Verão
a. P1, $a_{p1} + Co2, a_{c1}$ (3.7, 0.3) + (1.61, 0.3)	M	M	M	M
b. P2, $a_{p1} + Co2, a_{c1}$ (2.4, 0.3) + (1.61, 0.3)	M	M	M	M
c. P3, $a_{p1} + Co2, a_{c1}$ (1.85, 0.3) + (1.61, 0.3)	M	M	M	M
d. P1, $a_{p2} + Co2, a_{c1}$ (3.7, 0.56) + (1.61, 0.3)	M	M	M	Não atende
e. P2, $a_{p2} + Co2, a_{c1}$ (2.4, 0.56) + (1.61, 0.3)	M	M	M	M
f. P3, $a_{p2} + Co2, a_{c1}$ (1.85, 0.56) + (1.61, 0.3)	M	M	I	M
g. P1, $a_{p3} + Co2, a_{c1}$ (3.7, 0.72) + (1.61, 0.3)	Não atende	M	M	Não atende
h. P2, $a_{p3} + Co2, a_{c1}$ (2.4, 0.72) + (1.61, 0.3)	M	M	I	Não atende
i. P3, $a_{p3} + Co2, a_{c1}$ (1.85, 0.72) + (1.61, 0.3)	M	M	I	Não atende
j. P2, $a_{p1} + Co1, a_{c1}$ (2.4, 0.3) + (2.3, 0.3)	M	M	M	M
k. P2, $a_{p1} + Co2, a_{c1}$ (2.4, 0.3) + (1.61, 0.3)	M	M	M	M
l. P2, $a_{p1} + Co3, a_{c2}$ (2.4, 0.3) + (1.34, 0.3)	M	I	M	M
m. P2, $a_{p1} + Co1, a_{c2}$ (2.4, 0.3) + (2.3, 0.9)	M	Não atende	I	Não atende
n. P2, $a_{p1} + Co2, a_{c2}$ (2.4, 0.3) + (1.61, 0.9)	M	Não atende	I	Não atende
o. P2, $a_{p1} + Co3, a_{c2}$ (2.4, 0.3) + (1.34, 0.9)	M	M	I	Não atende

1 De acordo com a Norma, no procedimento simplificado as paredes são classificadas apenas como desempenho mínimo ou não atende

■ Desempenho mínimo não atendido pelo método simplificado ou pelo método de simulação

▭ Desempenho obtido pelo método simplificado superior ao obtido pelo método de simulação

Métodos simplificados alternativos à simulação estão presentes nas normas de vários países, com o intuito de facilitar as análises de modelos de edifícios que possuam características padrão. Dessa forma, o desempenho de edifícios mais simples pode ser rapidamente avaliado, sendo a análise por simulação uma forma mais precisa de indicar o desempenho da habitação, utilizada somente quando necessário. Espera-se, portanto, coerência entre esses métodos, de modo que o método simplificado represente de forma fidedigna o desempenho do edifício, ou seja, caso o modelo seja simulado, que seu desempenho seja igual ou superior à avaliação fornecida pelo método simplificado.

Essa coerência entre ambos os métodos foi sempre observada quando o desempenho do edifício não foi atendido pelo procedimento simplificado (casos em destaque, na

Tabela 43). Nota-se que, em todos esses casos, ao se simular esses edifícios, obteve-se também o não atendimento aos critérios no verão (desempenho igual ao do método simplificado), e desempenho mínimo ou intermediário no inverno (desempenho superior ao do método simplificado). Porém, há este conflito entre os dias típicos, onde um período atende à norma e outro não – tal situação de não adequação das residências brasileiras no verão é prevista pela norma, que propõe nova simulação para o verão conforme mencionado no **item 2.2.2**. Além disto, há outras situações nas quais a coerência entre os métodos não foi observada. Nesses casos (em destaque na tabela) o desempenho foi atendido pelo método simplificado, para posteriormente ser inferior ou não ter sido atendido pelo método de simulação. Esse tipo de resultado, também observado em outras situações (Brito et al. 2008), indica que há problemas no método simplificado da norma. Acredita-se que a avaliação de uma habitação apenas pelas propriedades térmicas de sua envolvente, sem considerar outros aspectos que influenciam no seu desempenho térmico, é, a princípio, uma forma falha de análise. Isso se enquadra mesmo no caso de habitações de interesse social, que obedecem a padrões muito restritos e possuem características arquitetônicas muito semelhantes entre si. Afinal, estes resultados, referentes a uma habitação social muito simples, demonstram que os limites estabelecidos pela NBR 15575 não representam de forma coerente o que ocorre na simulação. Além disso, é importante ressaltar que a norma é válida para qualquer tipo de edifício habitacional, onde as diferenças de desempenho devido a outros fatores, como a porcentagem de área envidraçada, poderiam originar até maiores incoerências.

No caso do regulamento RTQ-R, que segue os valores prescritos pela NBR 15575, vale o mesmo questionamento, se é válido o estabelecimento de parâmetros que interdependem e são influenciados ainda por outros fatores para avaliar o desempenho da habitação.

4.3. DESEMPENHO DA TIPOLOGIA ESCOLHIDA EM FUNÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA ENVOLTÓRIA OPACA – TRANSMITÂNCIA, ABSORTÂNCIA E CAPACIDADE TÉRMICA

Conforme mostrado no capítulo anterior, verifica-se que os limites máximos para as propriedades térmicas da envoltória muitas vezes não são suficientes para garantir um bom desempenho da habitação. Como forma de analisar as simulações paramétricas desvinculadas destes valores, de modo a não limitá-la, foi feita uma avaliação a partir dos graus-hora de desconforto anual.

Foram definidas três séries de simulações paramétricas envolvendo variações na transmitância e absorvância térmicas de paredes externas e coberturas, na capacidade térmica das paredes externas, nos ganhos internos e na ventilação natural. Maiores informações sobre os dados de entrada adotados encontram-se no **Item 3**.

4.3.1. SÉRIE 1

Para o primeiro grupo de simulações foi considerado o modelo térreo com variações de transmitância e absorvância térmicas para as paredes e coberturas. Nesta primeira etapa não foram incluídos ganhos internos ou ventilação natural, da mesma forma que o indicado pelo procedimento de simulação da NBR 15575 (ABNT, 2013).

Os gráficos a seguir (**Gráficos 10 a 13**) representam o grau de desconforto anual devido ao frio ou ao calor, em função da transmitância térmica dos fechamentos (paredes ou cobertura). Nos **Gráficos 10 e 11** tem-se no eixo x o U das paredes exteriores, e no eixo y, tanto o desconforto ao longo do ano por calor (**Gráfico 10**) quanto o desconforto por frio (**Gráfico 11**). O desconforto por calor ou por frio é dado como os graus-hora de resfriamento ou aquecimento na habitação⁸, respectivamente, em função dos graus-hora referentes ao clima em questão. Cada curva corresponde à tipologia térrea com variados valores de U e α da cobertura e α das paredes. De forma análoga, os **Gráficos 12 e 13** apenas se diferenciam por apresentarem no eixo x o U da cobertura. São representados nos gráficos apenas os valores extremos de absorvância (0,3 e 0,9) tanto de paredes como de coberturas. Valores intermediários apresentam padrões semelhantes e encontram-se em anexo (ver **Apêndice C**).

⁸ Os graus-hora de resfriamento ou aquecimento da habitação correspondem à média dos valores anuais dos três ambientes de maior permanência (sala e quartos).

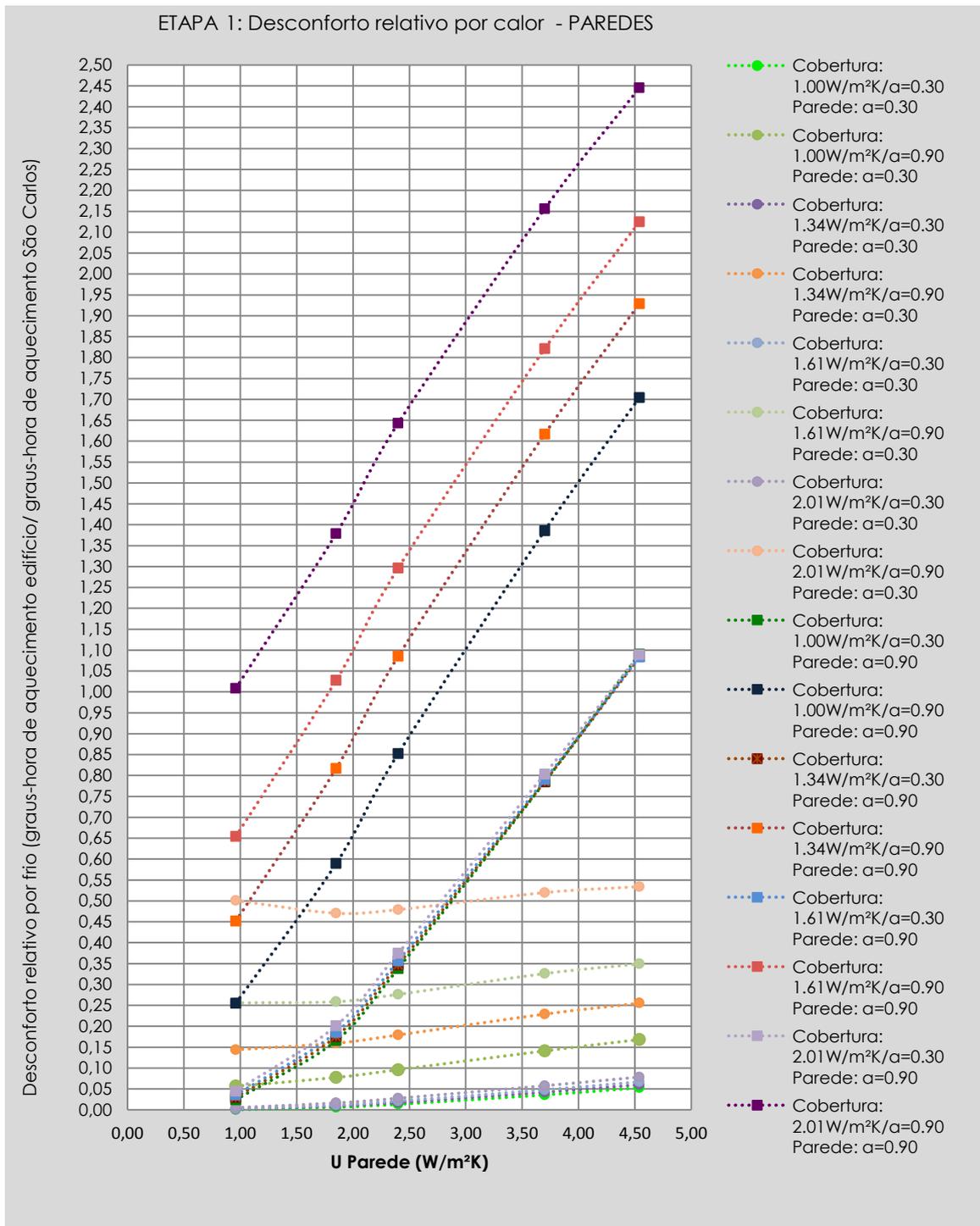


Gráfico 10: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas – Desconforto relativo por calor

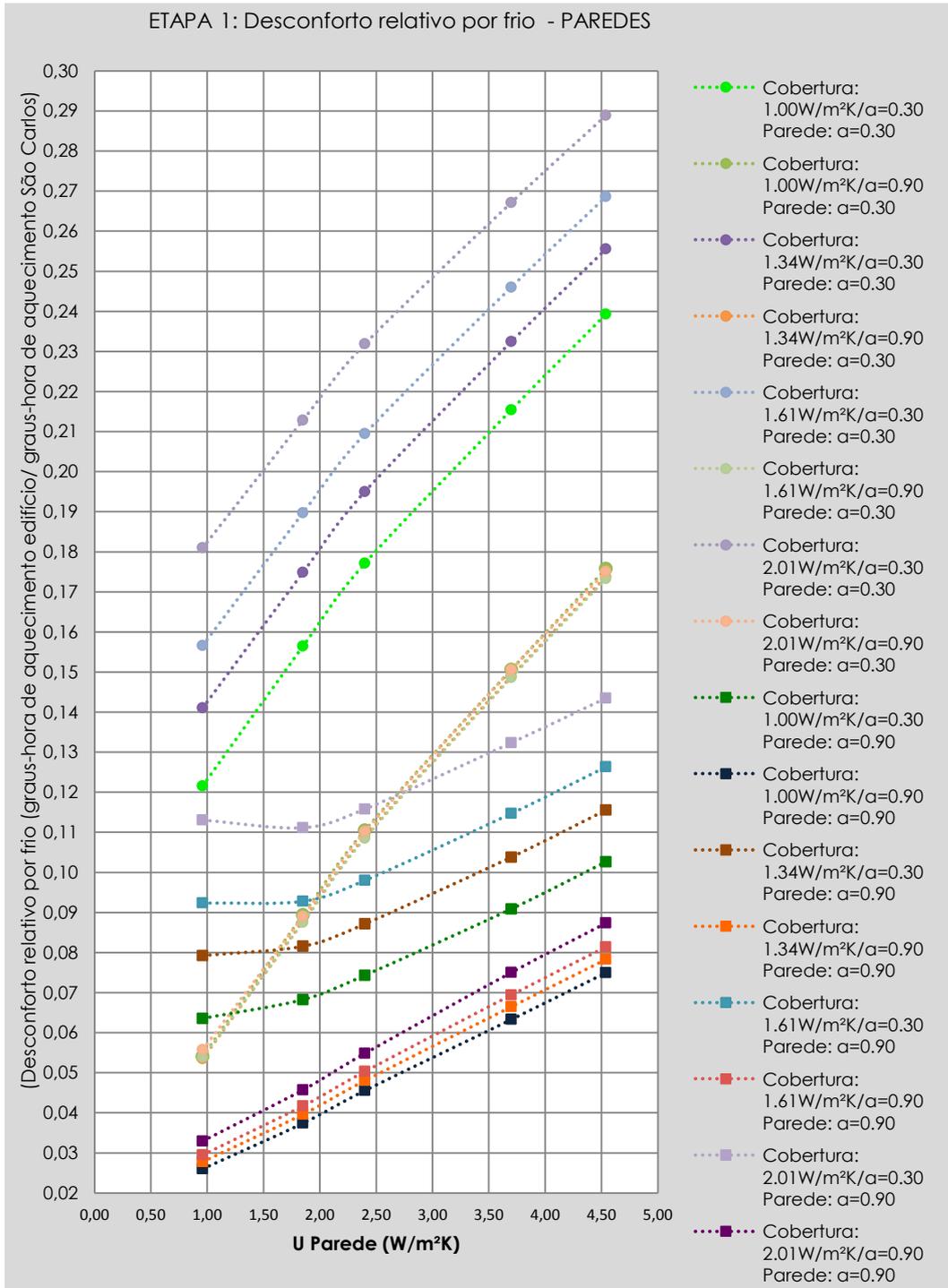


Gráfico 11: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio

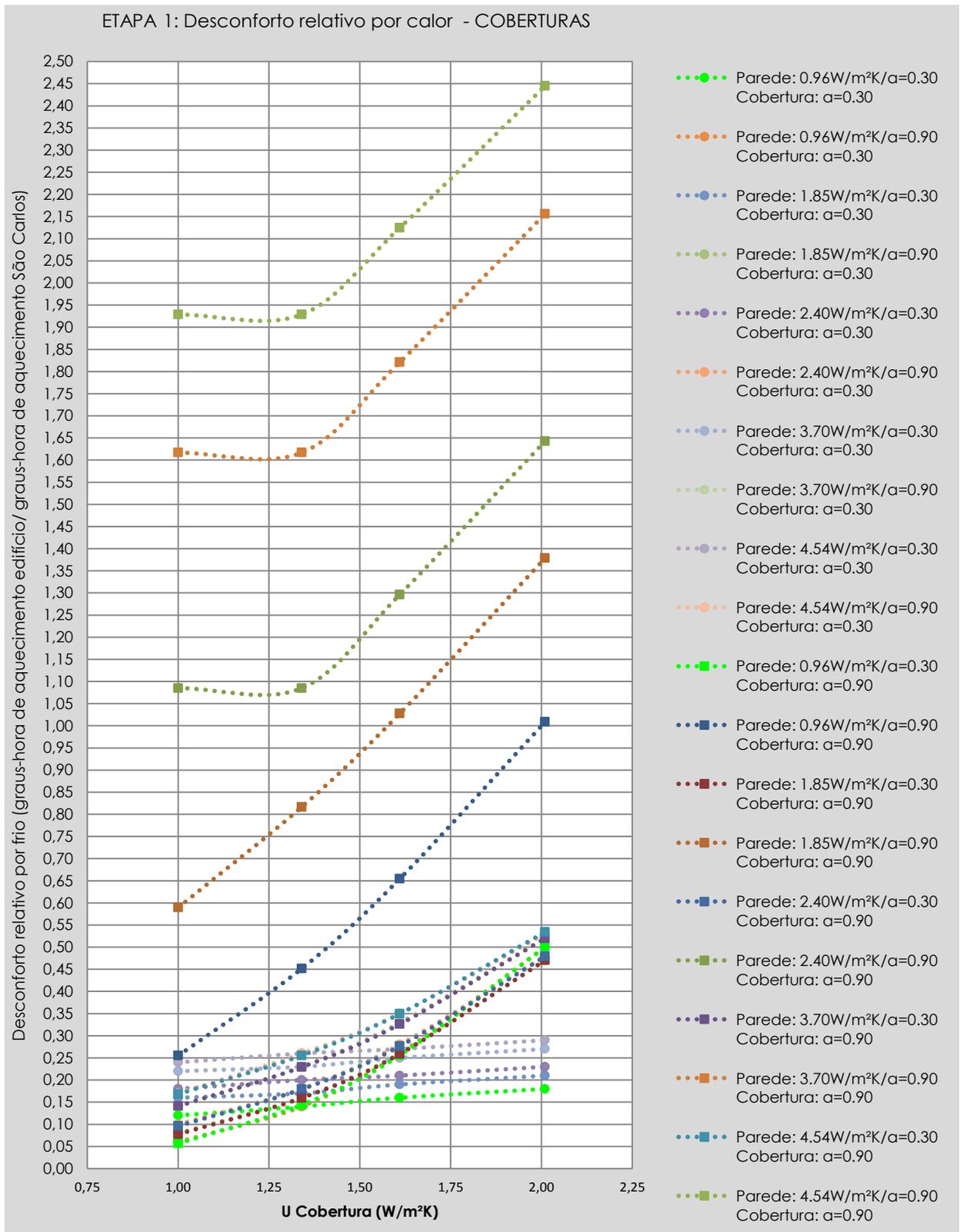


Gráfico 12: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor

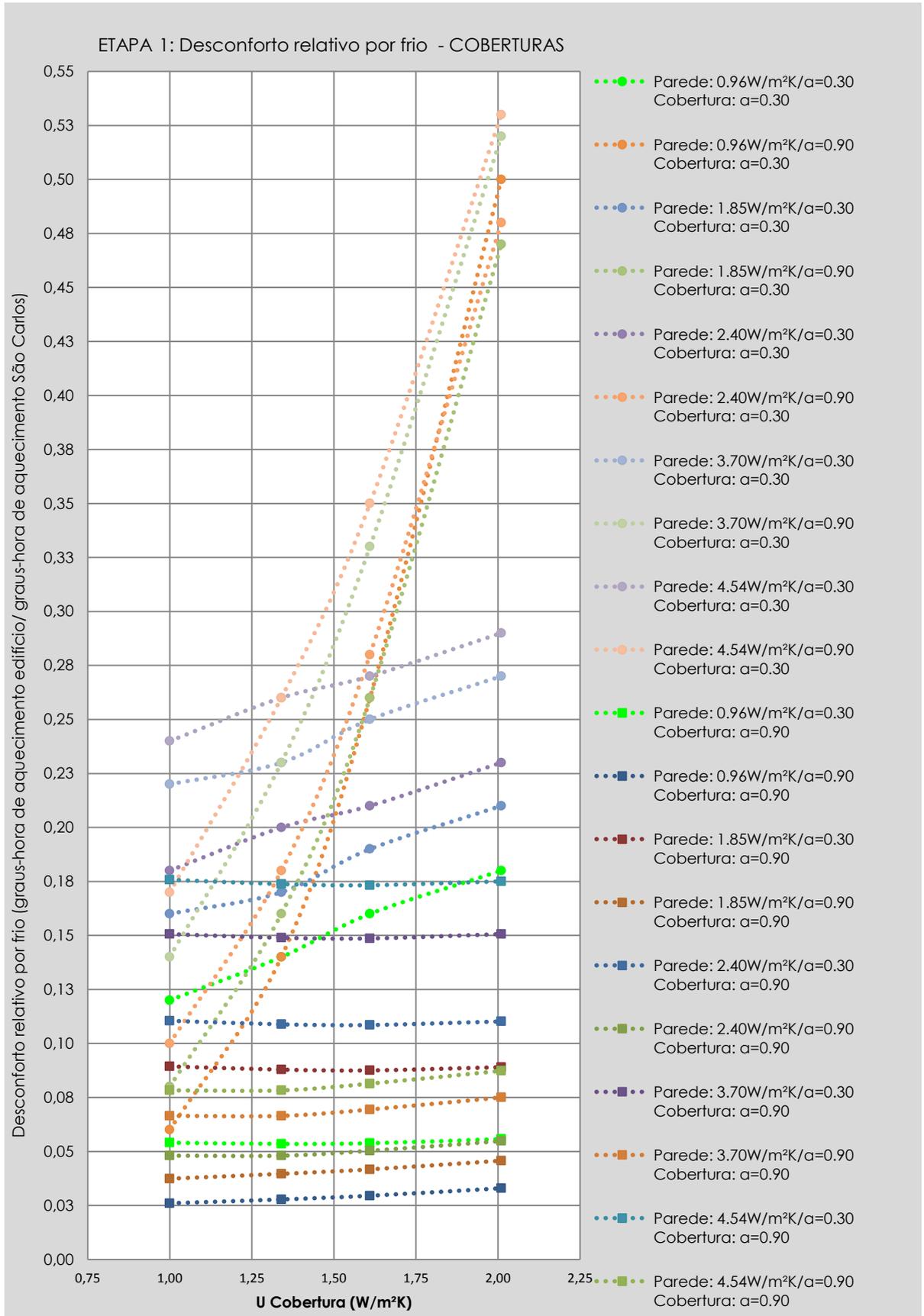


Gráfico 13: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio

Os resultados indicam o seguinte:

- a maior parte das curvas é crescente, ou seja, quanto maior o valor de U das paredes exteriores ou da cobertura, pior o desempenho térmico da habitação (maior o desconforto, tanto por frio quanto por calor). Somente no **Gráfico 13** há algumas curvas que se aproximam de uma reta, indicando ausência de impacto da variação do U. Em nenhuma situação notou-se curvas decrescentes. Isto vai ao encontro à ideia geral presente nas regulamentações atuais, de que quanto maior a transmitância, pior o desempenho.
- no entanto, há diferença na inclinação dessas curvas. Por exemplo, nos **Gráficos 10 e 12**, que se referem ao *desconforto por calor*, nota-se dois grupos distintos de curvas. As curvas mais inclinadas, ou seja, as que indicam maior impacto no desconforto devido ao aumento do U das paredes (Gráfico 10) ou das coberturas (Gráfico 12), são justamente as que correspondem às paredes ou coberturas com maior absorvância (0.90). Nesses casos, devido à elevada absorção de calor na superfície exterior opaca, uma envoltória com maior U acarreta num aumento considerável da transmissão de calor para o interior, consequentemente aquecendo o ambiente interno. Já o grupo de curvas dessas mesmas figuras com menor inclinação se referem à envoltória com menor absorvância (0.30). Nessas situações, é menor o impacto do aumento do U da envolvente. Ou seja, ainda há um aumento da transmissão de calor para o interior quando a transmitância é aumentada, mas como os ganhos de calor na superfície exterior opaca são menores, o impacto acaba por ser também menor.
- é interessante também observar que esse fenômeno se inverte nos **Gráficos 11 e 13**, que se referem ao desconforto por frio: o grupo de curvas de maior inclinação corresponde às paredes ou coberturas de cores mais claras, enquanto que o outro grupo, às paredes ou coberturas de cores mais escuras.

O que se conclui é que o impacto do aumento do U é função de uma série de parâmetros combinados. Nessas situações, para a mesma tipologia, verifica-se que há uma influência combinada do U e do α da cobertura e da parede da habitação em seu desempenho. Esse tipo de resultado mostra que a adoção de critérios que estabeleçam valores de U limites não corresponde à realidade do comportamento térmico do edifício.

4.3.2. SÉRIE 2

Para o segundo grupo de simulações foram consideradas variações de transmitâncias e absortâncias para as paredes e coberturas e foram acrescentados ganhos internos (ocupação, iluminação e equipamentos) e ventilação aos modelos, conforme padrão descrito anteriormente (ver **Item 3**).

Na sequência, os **Gráficos 14 a 17** mostram os resultados de desconforto anual por frio ou calor, em função da transmitância térmica das paredes ou coberturas. Os gráficos apresentam o mesmo padrão mostrado na série 1. Nos **Gráficos 14 e 15**, o eixo x representa a transmitância da parede, e no eixo y tem-se o desconforto por calor ou por frio. Já os **Gráficos 16 e 17**, seguindo esta linha de raciocínio, referem-se aos resultados das coberturas em função de paredes distintas.

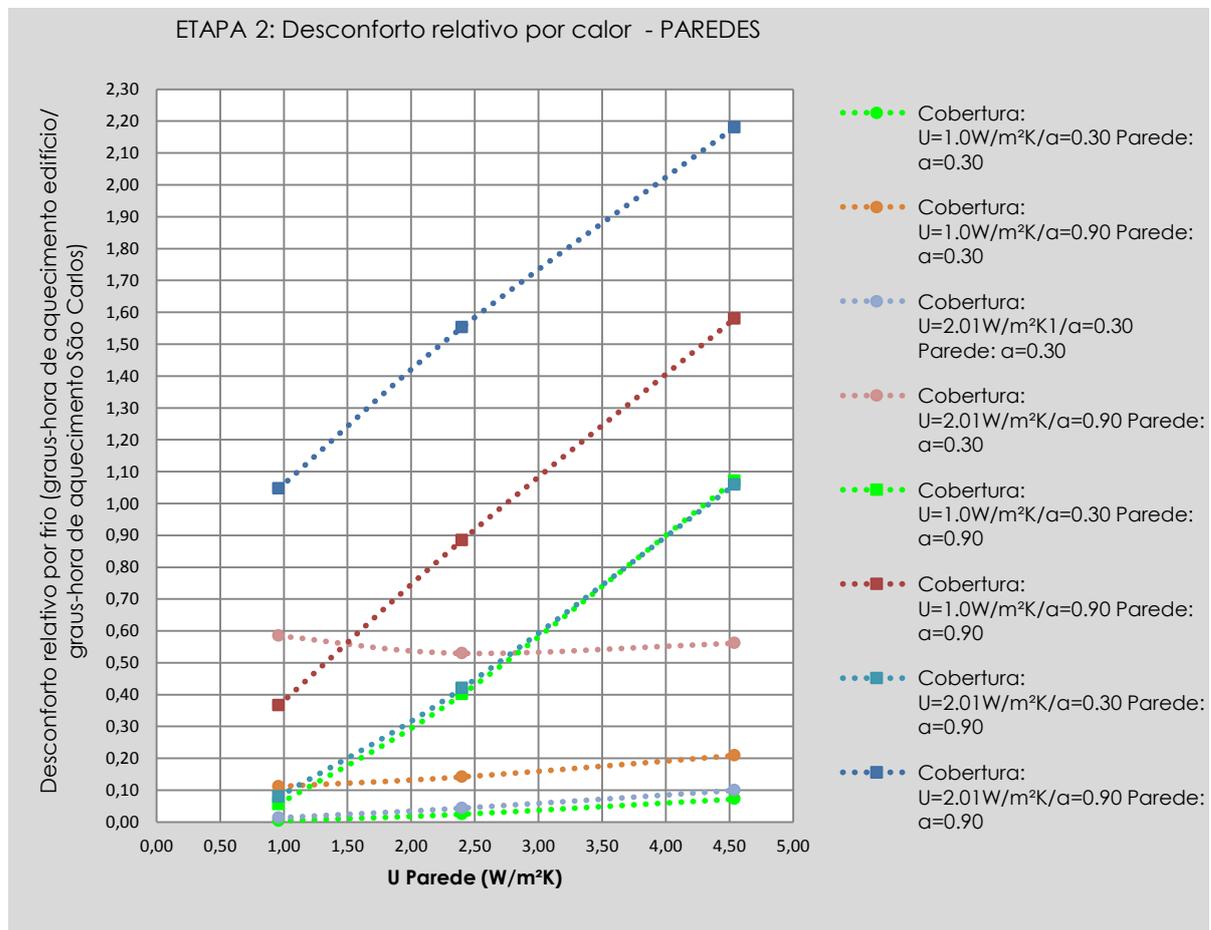


Gráfico 14: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor

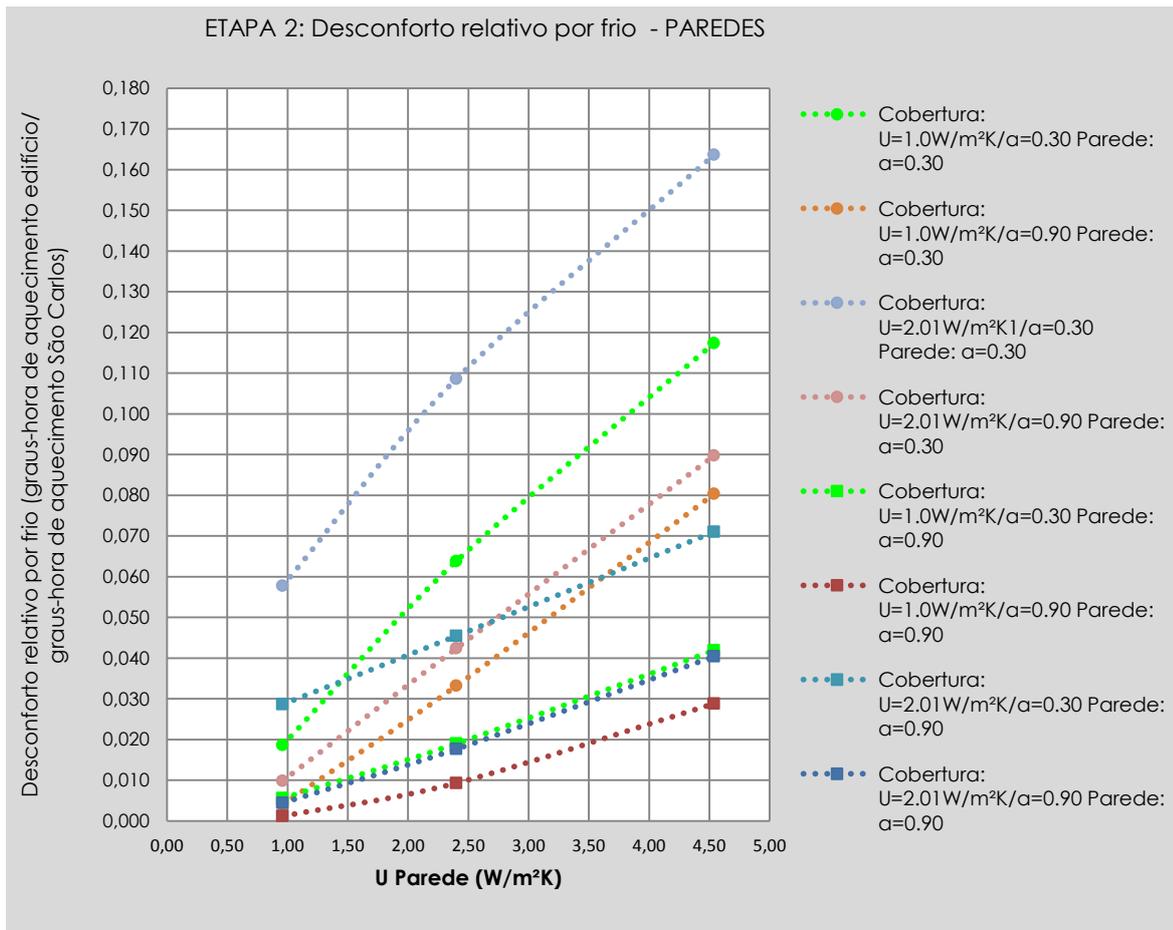


Gráfico 15: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio

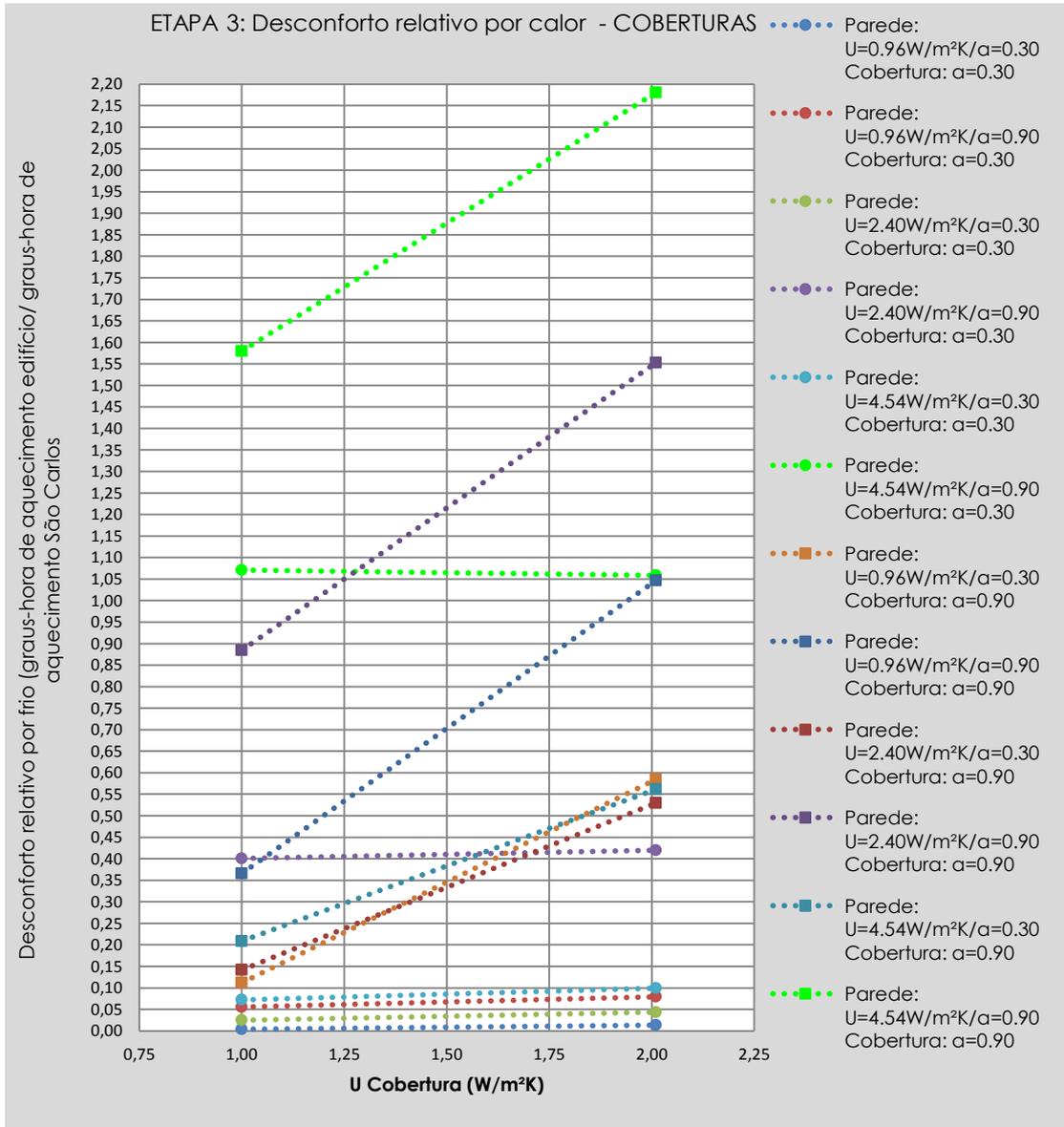


Gráfico 16: Etapa 2 - TA - Coberturas com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor

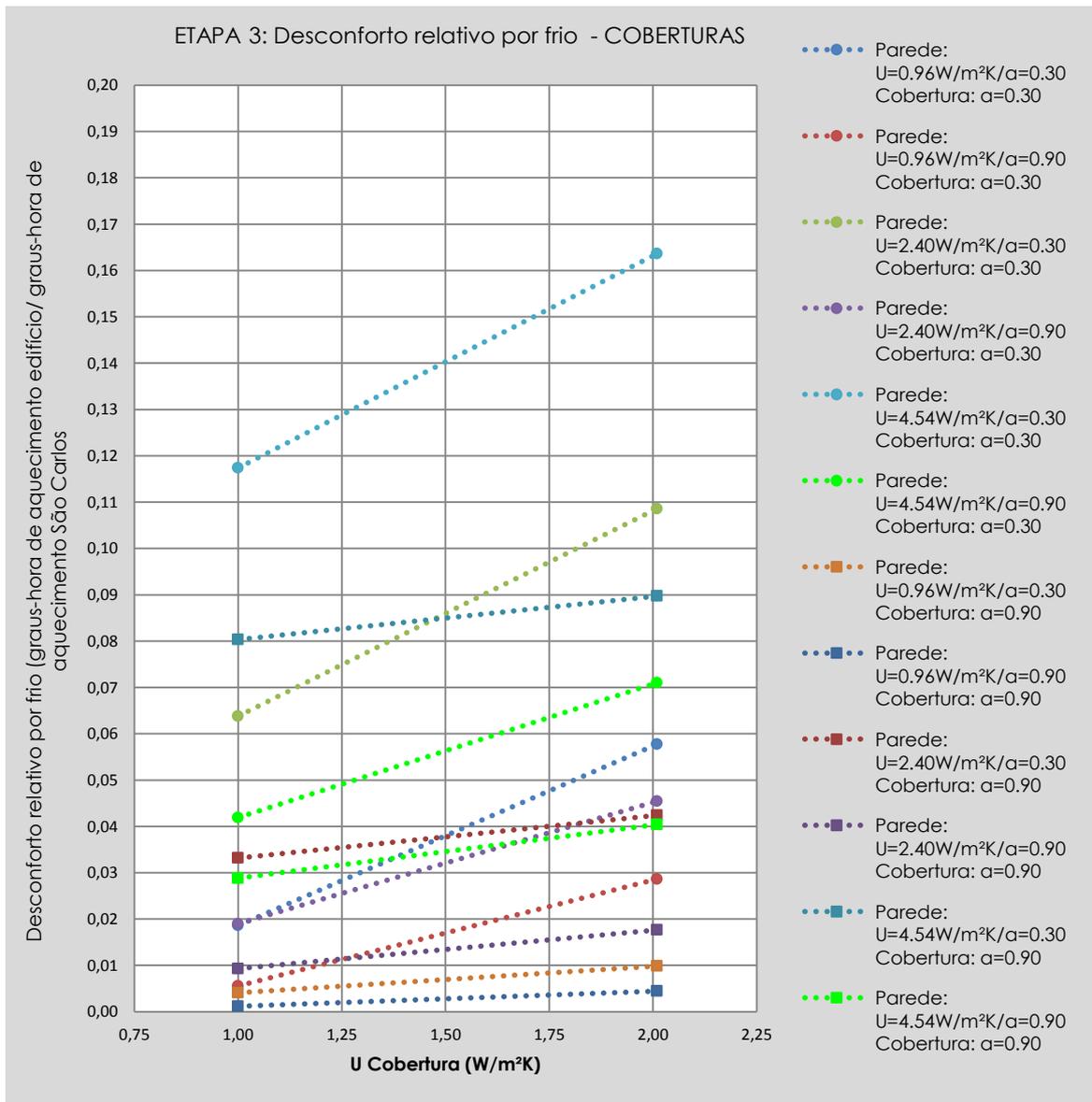


Gráfico 17: Etapa 2 - TA - Coberturas com $\alpha=0,30$ e $\alpha=0,90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio

Também neste caso o mesmo padrão de resultados já comentados na série 1 se repete para as situações avaliadas, e o menor valor de transmitância de paredes e coberturas traz, em geral, melhores resultados de desempenho, seguindo a lógica da norma e do regulamento. Notam-se ainda os dois grupos distintos de inclinação das curvas: no caso do desconforto por calor, o menor impacto devido a alterações no U da envoltória está associado às paredes ou coberturas de menor absorvância ($\alpha=0,3$), enquanto que no desconforto por frio, menor desconforto está atrelado à maiores valores de absorvância ($\alpha=0,9$).

Para esta etapa, porém, notou-se uma diminuição em geral nos valores de desconforto, possivelmente devido aos ganhos internos.

4.3.3. SÉRIE 3

Nesta terceira etapa foram testadas duas situações com paredes de alta inércia associadas a três tipos de coberturas, considerando ainda os ganhos internos e a ventilação da etapa anterior.

Os **Gráficos 18 a 21** apresentam o desempenho da habitação, seguindo o padrão dos gráficos anteriores. Os **Gráficos 18 e 19** mostram no eixo y o desconforto por calor e por frio, respectivamente, tendo no eixo x os valores de transmitância das paredes. Os Gráficos **20 e 21** apresentam o desconforto por calor e por frio (eixo y) em relação a diferentes valores de U das coberturas (eixo x), na mesma lógica adotada nas séries 1 e 2.

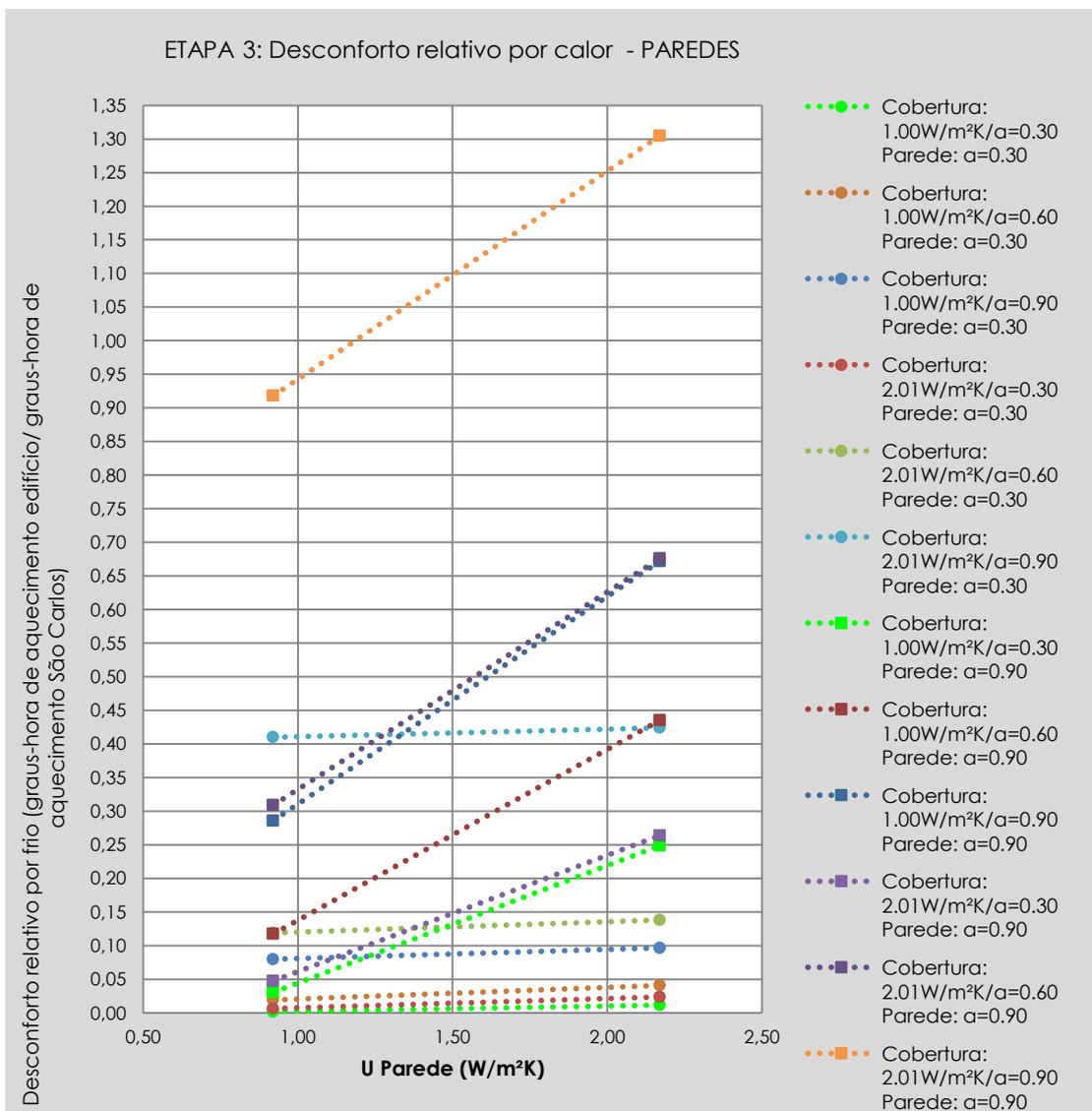


Gráfico 18: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor

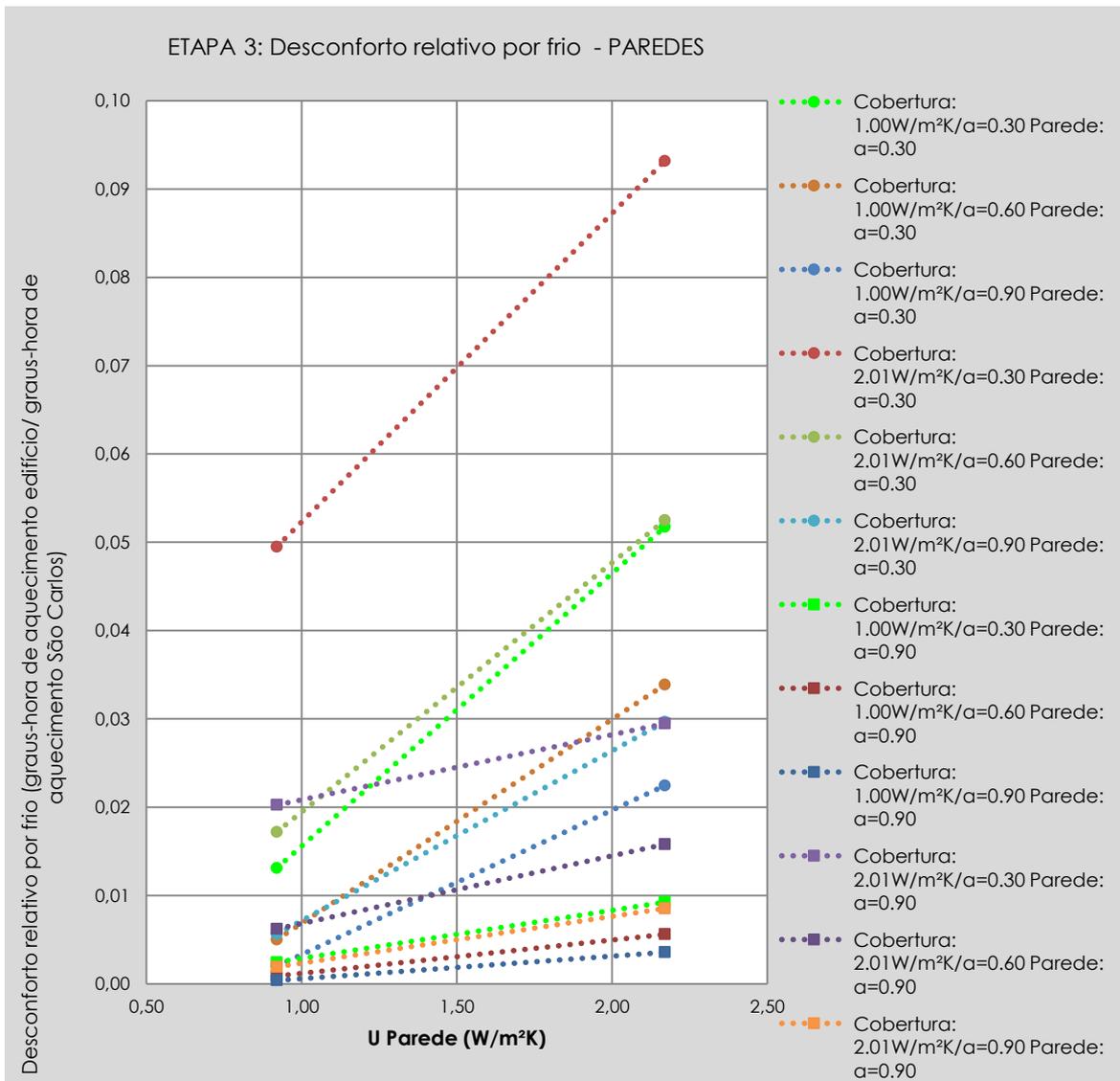


Gráfico 19: Etapa 2 - TA - Paredes com $\alpha=0.30$ e $\alpha=0.90$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio

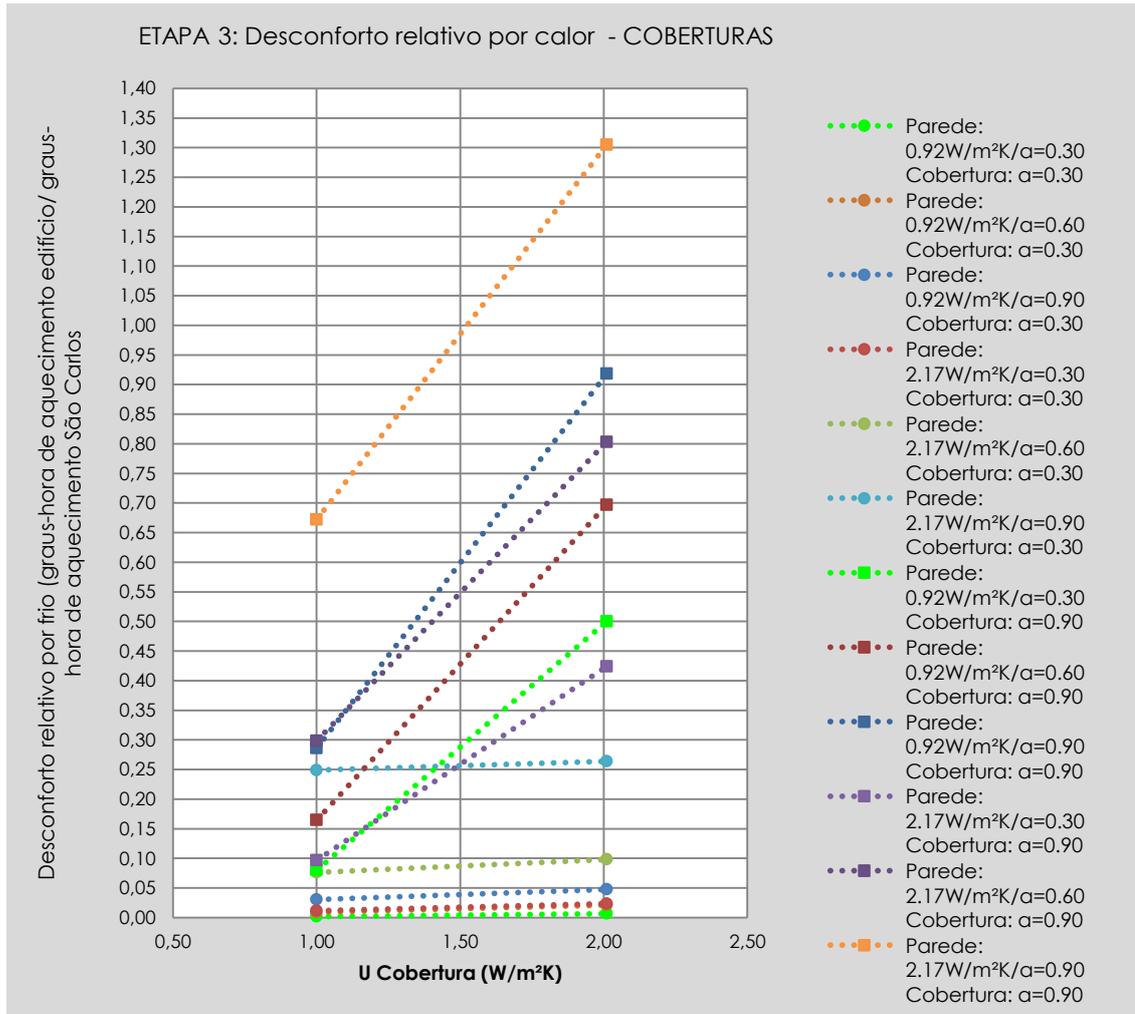


Gráfico 20: Etapa 3 - TA - Coberturas com $\alpha = 0.30$ e $\alpha = 0.90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor

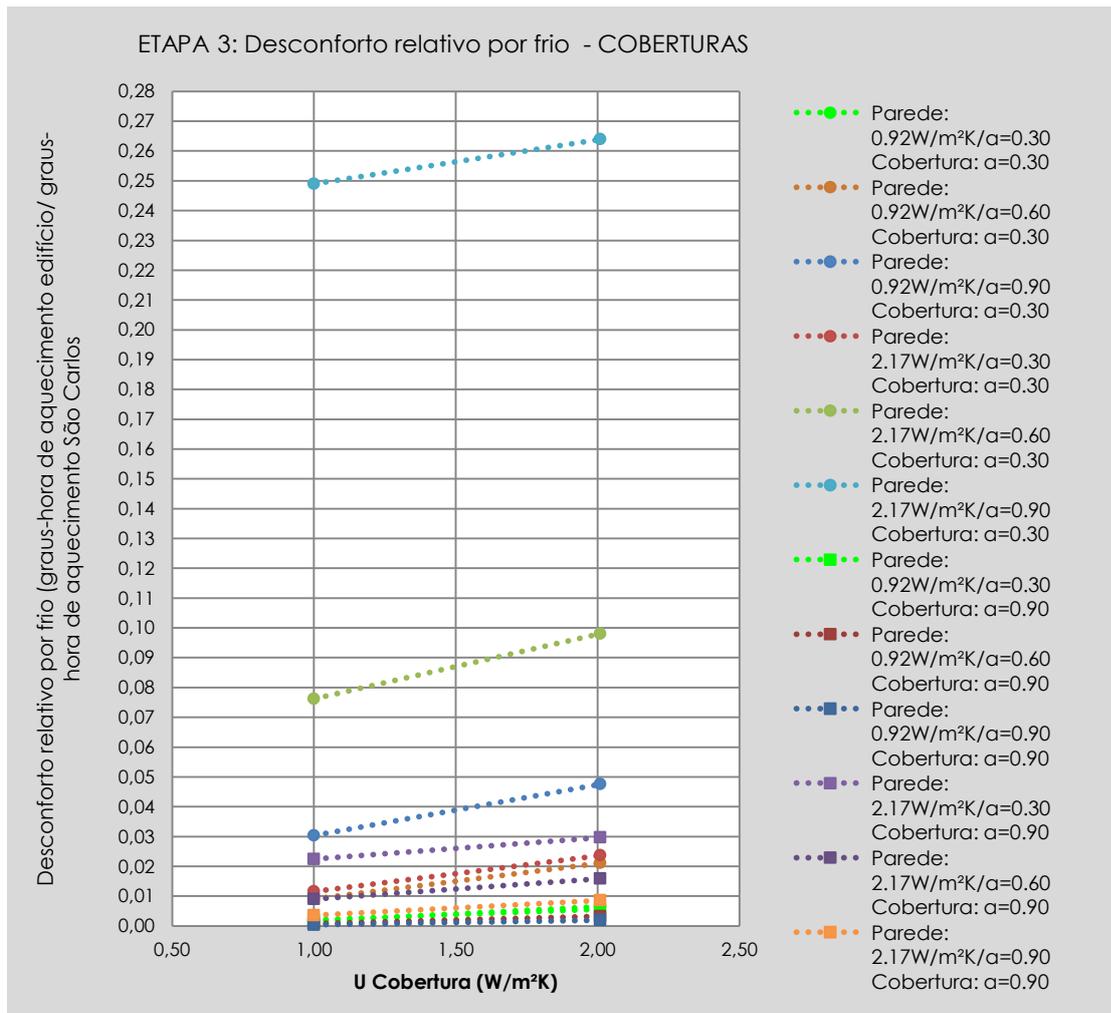


Gráfico 21: Etapa 3 - TA - Coberturas com $\alpha=0,30$ e $\alpha=0,90$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio

Para esta etapa os valores de desconforto encontrados seguiram o padrão das séries 1 e 2. O pior desempenho nestas simulações paramétricas também se associa ao maior valor de U e de absorvância da envoltória, no caso do desconforto por calor, ou ao maior valor de U e menor valor de absorvância, para o desconforto por frio. O que se pode destacar é que os valores do desconforto por calor e por frio apresentaram em geral valores menores que as etapas anteriores, tanto nos gráficos referentes às paredes como para os de coberturas. Tal comportamento se deve provavelmente à maior inércia da envoltória, que garante menor oscilação da temperatura interna.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho parte do questionamento sobre o papel da envoltória opaca no desempenho térmico de uma tipologia de habitação de interesse social. Neste modelo de edificação, as características construtivas e suas respectivas propriedades térmicas são parâmetros importantes para o conforto ambiental do usuário, já que são projetos que dificilmente contam com sistemas de condicionamento artificial de ar.

Atualmente, há duas normas e um regulamento no Brasil que abrangem o tema de desempenho térmico de habitações. Estes documentos prescrevem propriedades para a envoltória, delimitando, principalmente, valores de transmitância, absorvância e capacidade térmica.

A presente pesquisa analisa, por meio de simulação computacional no *software EnergyPlus*, a influência conjugada da transmitância térmica da envoltória opaca (paredes e coberturas) e de outros parâmetros (cor das superfícies exteriores, inércia das paredes externas, e ventilação natural) no desempenho térmico de edifícios habitacionais de interesse social. Foi escolhido, a partir de levantamentos de dados em órgãos de financiamento públicos e privados, um modelo unifamiliar térreo para análise no clima da cidade de São Carlos, SP.

O estudo se estruturou em três etapas principais de desenvolvimento.

A primeira etapa concentrou-se na definição dos parâmetros de entrada para simulação dos modelos, para que os mesmos representassem o melhor possível a situação real dos projetos de habitações de baixa renda em São Carlos. Estes estudos foram feitos para um modelo térreo e um modelo multipavimentos, por meio de simulação no *software EnergyPlus*. Nas análises feitas, três parâmetros avaliados resultaram em maior impacto no comportamento térmico das tipologias escolhidas, seja nos valores de graus-hora de desconforto anuais, seja na avaliação pelos dias típicos: 1) as medidas utilizadas para a modelagem, 2) a inserção de beirais e 3) o uso de venezianas – os dois últimos parâmetros considerados elementos de sombreamento. Nota-se que, no caso da tipologia térrea, estes três parâmetros apresentaram grandes impactos nos graus-hora, principalmente os de desconforto por calor. No caso da tipologia multipavimentos, como não apresenta beirais, o uso das venezianas foi o maior impactante. Ou seja, a inserção das medidas de modelagem no caso de edificações menores, como habitações, e o uso de elementos de sombreamento, exercem influência no resultado das simulações. Destaca-se que este cuidado é importante para o procedimento da simulação computacional no caso destas tipologias, onde a envoltória desempenha papel fundamental (uma vez que dificilmente se tem condicionamento de ar artificial), e que, conforme apresentado, o resultado pode sofrer variações a partir da inserção ou eliminação de certos parâmetros.

Em uma segunda etapa, procedeu-se à análise dos valores-limite de transmitância da envoltória prescritos pela norma NBR 15575, voltada ao desempenho térmico das habitações, e pelo regulamento RTQ-R, etiquetagem de edificações residenciais. Esta análise foi feita através de simulação computacional para o modelo de habitação térrea. Nos resultados, constatou-se a dificuldade em fixar valores limite de U para paredes e para coberturas, uma vez que o comportamento térmico das habitações depende da combinação deste com outros parâmetros, como a absorvância da envoltória. Além disso, a avaliação de um edifício somente por sua superfície opaca fica limitada, pois há outros aspectos que deveriam ser considerados, como a área envidraçada.

Na terceira e última etapa, foram efetuadas simulações paramétricas em três séries de estudos, utilizando novamente o modelo de habitação térrea. De forma geral, a base das variações para estas séries foram a transmitância e a absorvância das paredes e coberturas, aliadas ao aproveitamento da ventilação natural, aos ganhos internos e à inércia das paredes. O intuito destas simulações foi verificar a influência dos parâmetros citados no comportamento térmico da tipologia estudada, sempre em função dos valores de U do fechamento opaco – paredes e coberturas. De modo geral, as análises demonstraram que a lógica seguida pela norma NBR 15575 e pelo regulamento RTQ-R está correta: quanto maior o valor de U, pior será o desempenho térmico da envoltória. Percebe-se, no entanto, que o impacto no desconforto por calor ou por frio, devido ao aumento do U das paredes, por exemplo, é bastante variável, podendo ou não ser significativo, de acordo com a combinação dos outros parâmetros envolvidos: absorvância da envoltória exterior e U da cobertura. O mesmo tipo de resultado foi encontrado com relação ao impacto devido à variação da transmitância da cobertura. Não é possível, portanto, trabalhar com a fixação de valores-limite de U para o fechamento opaco.

Finalmente, não foi possível estabelecer valores específicos de transmitância das paredes e coberturas para o tipo de projeto analisado, devido à complexidade observada nos resultados. A recomendação, portanto, é que seja sempre feita a avaliação de desempenho através de simulação computacional, considerando dessa forma a combinação de todos os parâmetros envolvidos.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para estudos futuros, sugere-se a avaliação de um número maior de tipologias habitacionais, em diferentes zonas bioclimáticas, obtendo um conjunto amplo de resultados que confirme as tendências observadas. Este conjunto de simulações poderia ser útil para a construção de um modelo de regressão devidamente validado, nos moldes dos já desenvolvidos no RTQ-R, mas que contemplasse a transmitância e a absorvância das paredes e da cobertura, o que não ocorre atualmente. Dessa forma, possivelmente a delimitação de valores-limite de U não seria mais necessária, limitando-se, ao invés disso, o

nível de desempenho (desconforto). Uma equação desse tipo permitiria também mais facilmente a otimização da envoltória, de forma a se avaliar a relação custo-benefício da adoção de um U mais baixo. Atenta-se ainda que, devido ao grande impacto observado da absorvância da envoltente exterior, e à facilidade de alteração desse parâmetro ao longo da vida útil do edifício, as normas e regulamentos deveriam contemplar essa questão.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2010.

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

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ANSI/ASHRAE Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.

_____. **ANSI/ASHRAE Standard 140**: Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. Atlanta, 2004.

_____. **ASHRAE Handbook of Fundamentals**. Atlanta, 2009.

ASSEM, E. O. Correlating thermal transmittance limits of walls and roofs to orientation and solar absorption. In: **Energy and Buildings**, v. 43, n. 11, p. 3173-3180, 2011. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811003495>>. Acesso em: 10 jan. 2012.

ASTE, N.; ANGELOTTI, A.; BUZZETTI, M. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings. In: **Energy and Buildings**, v. 41, n. 11, p. 1181-1187, 2009. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880900125X>>. Acesso em : 09 jan. 2012.

BADESCU, V.; SICRE, B. Renewable energy for passive house heating: Part I. Building description. In: **Energy and Buildings**, v. 35, n.11, p. 1077-1084, dec. 2003 (a).

_____. Renewable energy for passive house heating: II. Model. In: **Energy and Buildings**, v. 35, n.11, p. 1085-1096, dec. 2003 (b).

BATISTA, J. O.; LAMBERTS, R.; WESTPHAL, F. S. Avaliação de desempenho térmico de componentes construtivos utilizando o *EnergyPlus*. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 8, Maceió, 2005. **Anais eletrônicos...**Maceió: ENCAC, p. 145-154, 2005.

BOGO, A. J. Limitações quanto aos parâmetros de desempenho térmico e estratégias bioclimáticas recomendadas pela norma brasileira de desempenho térmico de habitações de interesse social. In **NUTAU 2008**: Seminário Internacional: O espaço sustentável – Inovações em edifícios e cidades. São Paulo, 2008.

BRASIL. **Código de Processo Civil**. Colaboração de Antonio L. de Toledo Pinto, Márcia V. dos Santos Windt e Lívia Céspedes. 31. ed. São Paulo: Saraiva, 2004. 1072p.

BRITO, A. C. et al. Contribuições para o aprimoramento da NBR 15.575 referente ao método simplificado de avaliação de desempenho térmico de edifícios. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XIV, 2012, Juiz de Fora. **Anais...** Juiz de Fora: ENTAC, 2012.

CHENG, V.; NG, E.; GIVONI, B. Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate. In: **Solar Energy**, v.78, n.1, p. 528- 534, 2005.

CHVATAL, K. M. S. **Relação entre o nível de isolamento térmico da envolvente dos edifícios e o potencial de sobreaquecimento no verão**. Tese (Doutorado – Pós-graduação em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Portugal, 2007.

_____. The effect on energy consumption of buildings with higher thermal resistance in hot climates. In: **Renewable Energy 2010 Conference**, 2010, Yokohama, Japan. Proceedings... Yokohama: Renewable Energy 2010, 2010.

CHVATAL, K. M. S.; CORVACHO, M. H. P. The impact of increasing the building envelope insulation upon the risk of overheating in summer and an increased energy consumption. In **Journal of Building Performance Simulation**, 2009.

CHVATAL, K. M. S.; ROSSI, M. M. The effect of distinct ventilation strategies on thermal performance of buildings with high thermal resistance in Brazil. In: **RoomVent**, 2011, Trondheim, Noruega. Proceedings... Trondheim: RoomVent, 2011.

DILKIN, P.; SCHNEIDER, P. S. Revisão de Normas Térmicas para Edificações Térreas Residenciais. In: **V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 1999, Fortaleza, 1999.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: métodos de determinação e base de dados para tintas látex acrílica e PVA**. 2008. 160p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Efeitos da inércia térmica sobre as temperaturas internas de edificações na cidade de São Carlos, SP. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 8, Maceió, 2005. **Anais eletrônicos...**Maceió: ENCAC, p. 586-594, 2005.

_____. Inércia térmica, conforto e consumo de energia em edificações na cidade de São Carlos, SP. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 7, Curitiba, 2003. **Anais eletrônicos...**Curitiba: ENCAC, p. 369-376, 2003.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus**. Version 7.1.0.012. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2012 (a). Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/>>. Acesso em: 22 jun. 2012.

_____. **Input-Output Reference**: the encyclopedic reference to *EnergyPlus* input and output. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, may 2012 (b).

_____. **Open Studio**. Version 1.0.7.390. US: Department of Energy Efficiency and Renewable Energy, Office of Building Technologies, 2012 (c). Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/EnergyPlus/openstudio.cfm>>. Acesso em: 21 fev. 2012.

FATTORI, S. S. Correspondência pessoal recebida nos dias 27 de maio e 22 de agosto de 2011.

_____. Correspondência pessoal recebida no dia 03 de julho de 2012.

GIGLIO, T. G. F.; BARBOSA, M. J. Aplicação de métodos de avaliação do desempenho térmico para analisar painéis de vedação em madeira. In: **Ambiente Construído**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 6, n. 3, p. 91-103, jul. / set. 2006.

GIVONI, B. Man, climate and architecture. **London**: Applied Science Publishers, 1976.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. In: **Energy and building**, vol 18, July/92, p 11-23, 1992.

GOOGLE. **Google SketchUp**. Version 8.0.0.4811. [S.l.]: Google, 2010. Disponível em: <<http://sketchup.google.com/intl/pt-BR/product/newin8.html>>. Acesso em: 14 mar. 2011.

GOULART, S. G. V. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

GOULART, S. G. V. O emprego da inércia térmica como técnica de resfriamento para edificações em Florianópolis, SC. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 9, Ouro Preto, 2007. **Anais eletrônicos...**Ouro Preto: ENCAC, p. 825-834, 2007.

GRANJA, A. D.; LABAKI, L. C. Influence of external surface colour on the periodic heat flow through a flat solid roof with variable thermal resistance. In: **International Journal of Energy Research**, 27, (8), p. 771–779, 2003.

_____. Paredes orientadas a leste e a oeste: uma abordagem crítica em relação ao conforto e à eficiência energética. In: **Ambiente Construído**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. v.4, n. 4 p. 65-75, out. / dez. 2004.

INMETRO - INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **RTQ-R** - Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética em edificações residenciais. Rio de Janeiro, 2010.

KRÜGER, E.; GIVONI, B. Thermal monitoring and indoor temperature predictions in a passive solar building in an arid environment. In: **Building and Environment**, v.43, n.11, p. 1792-1804, nov. 2008.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Analysis Bio**. Versão 2.1.5. Florianópolis: LabEEE, 2009. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-bio>>. Acesso em 21 mar. 2011.

_____. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**. Florianópolis: LabEEE, 2010. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/catalogo_caixa_v4.PDF>. Acesso em 05 fev. 2012.

LOURA, R. M.; ASSIS, E. S.; BASTOS, L. E. G. Análise comparativa entre resultados de desempenho térmico de envoltórias de edifício residencial gerados por diferentes normas brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, XI., 2011, Búzios. **Anais eletrônicos...**Búzios: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2011. 1 CD-ROM.

MARQUES, A. M. **Desempenho térmico de edificações unifamiliares de interesse social: estudo de casos em Imbituba** – SC. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise da influência do desempenho térmico dos fechamentos opacos através do balanço térmico. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 12, Fortaleza, 2008. **Anais...**Fortaleza: ENTAC, 2008.

OROSA, J. A.; OLIVEIRA, A. C. A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment. In: **Renewable Energy**, v. 37, n. 1, p. 89-96, 2012. ISSN 0960-1481. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148111003016>>. Acesso em : 06 jan. 2012.

PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Desempenho térmico de 3 edificações residenciais em Florianópolis – SC. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 5, Fortaleza, 1999. **Anais...**Fortaleza: ENCAC, [S.n.] 1999.

PEREIRA, C. D.; GHISI, E. The influence of the envelope on the thermal performance of ventilated and occupied houses. In: **Energy and Buildings**, v. 43, n. 12, p. 3391-3399, 2011. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778811003884>>. Acesso em : 13 jan. 2012.

RIZZO, I. Correspondência pessoal recebida no dia 10 de junho de 2011.

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. Relatório Interno, 2012 (a). Disponível em: <<http://www.labeeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 12 maio 2012.

RORIZ, M. **Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, 2012 (b). Disponível em: <http://www.labeeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimatico.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2012.

RORIZ, M. **Segunda proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático do Brasil**. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações. São Carlos, 2012 (c). Disponível em: <http://roriz.dominio temporario.com/doc/Zoneamento_Bioclimatico_Prop2.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2012.

RORIZ, M; CHVATAL, K.; CAVALCANTI, F. S. Sistemas construtivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, 10, Natal, 2009. **Anais eletrônicos...**Natal: ENCAC, 2009.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados in loco: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos**. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2008.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A. Habitações térreas e multipavimentos de interesse social: avaliação de desempenho térmico para tipologias com vedações em alvenaria de blocos

cerâmicos e de concreto. In: **Pesquisa em Arquitetura e Construção** – PARC/FEC UNICAMP. FEC UNICAMP: Campinas, nov. 2009.

SENA, C. B. **Análise comparativa entre o Método de Mahoney Tradicional e o Método de Mahoney Nebuloso para caracterização do clima no projeto arquitetônico**. Tese (Mestrado – Pós-graduação em Engenharia da Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SINDUSCON – SINDICATO DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL. **Comissão de Estudos decide novo prazo para finalização da revisão da Norma de Desempenho**. Disponível em <http://www.sinduscon-pr.com.br/principal/pub/Image/20120112080137informativo_sinduscon_01_dezembro_2011.pdf?PHPSESSID=58bda3d21503579d15e89853f905e9e0>. Acesso em: 17 jun. 2012.

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

SPECHT, L. P. et al. Análise da transferência de calor em paredes compostas por diferentes materiais. In: **Ambiente Construído**. Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v. 10, n. 4, p. 7-18, out. / dez. 2010.

UEMOTO, K. L.; SATO, N. M. N.; JOHN, V. M. Estimating thermal performance of cool colored paints. In: **Energy and Buildings**, v. 42, n. 1, p. 17-22, 2010. ISSN 0378-7788. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001546>>. Acesso em : 01 set. 2012.

UNITED NATIONS. **Design of low-cost housing and community facilities**: climate and house design. Department of Economic and Social Affairs. New York, v.1, p 25-42, 1971.

VIEIRA, C. C. **Conforto térmico e iluminação natural no edifício administrativo da Escola de Engenharia de São Carlos/USP – O Bloco E1**. Dissertação (Mestrado – Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BOLATTÜRK, A. Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. In: **Building and Environment**, v. 43, n. 6, p. 1055-1064, jun. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036013230700090X>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

BÜYÜKALACA, O.; BULUT, H.; YILMAZ, T. Analysis of variable-base heating and cooling degree-days for Turkey. In: **Applied Energy**, v. 69, n. 4, p. 1807-1812, aug. 2001. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261901000174>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

DOMBAYCI, O. A. Degree-days maps of Turkey for various base temperatures. In: **Building and Environment**, v. 34, n. 11, p. 1807-1812, nov. 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544209003156>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. In: **Energy and Buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877889290047K#>>. Acesso em : 11 mar. 2012.

LAMBERTS, R.; MARINOSKI, D. L. **Desempenho térmico de edificações**. 5^a ed . Florianópolis: LabEEE, 2007. Apostila.

MOURSHED, M. The impact of the projected changes in temperature on heating and cooling requirements in buildings in Dhaka, Bangladesh. In: **Applied Energy**, v. 88, n. 11, p. 3737-3746, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261911003199>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

ORTIZBEVIÀ, M. J. et al. Evolution of heating and cooling degree-days in Spain: Trends and interannual variability. In: **Global and Planetary Change**, v. 92-93, p. 236-247, jul. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921818112001075> >. Acesso em : 07 ago. 2012.

PAPAKOSTAS, K.; KYRIAKIS, N. Heating and cooling degree-hours for Athens and Thessaloniki, Greece. In: **Renewable Energy**, v. 30, n. 12, p. 1873-1880, oct. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148105000091>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

PAPAKOSTAS, K.; MAVROMATIS, T.; KYRIAKIS, N. Impact of the ambient temperature rise on the energy consumption for heating and cooling in residential buildings of Greece. In: **Renewable Energy**, v. 35, n. 7, p. 1376-1379, jul. 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109004881>>. Acesso em : 07 ago. 2012.

SZOKOLAY, S. V. **Thermal design of buildings**. Canberra: Raia Education Division. Austrália, 1987.

7. APÊNDICES

APÊNDICE A – Tipologias: vistas, perspectivas e dados gerais dos modelos

Tabela 44: Vistas e perspectiva TA

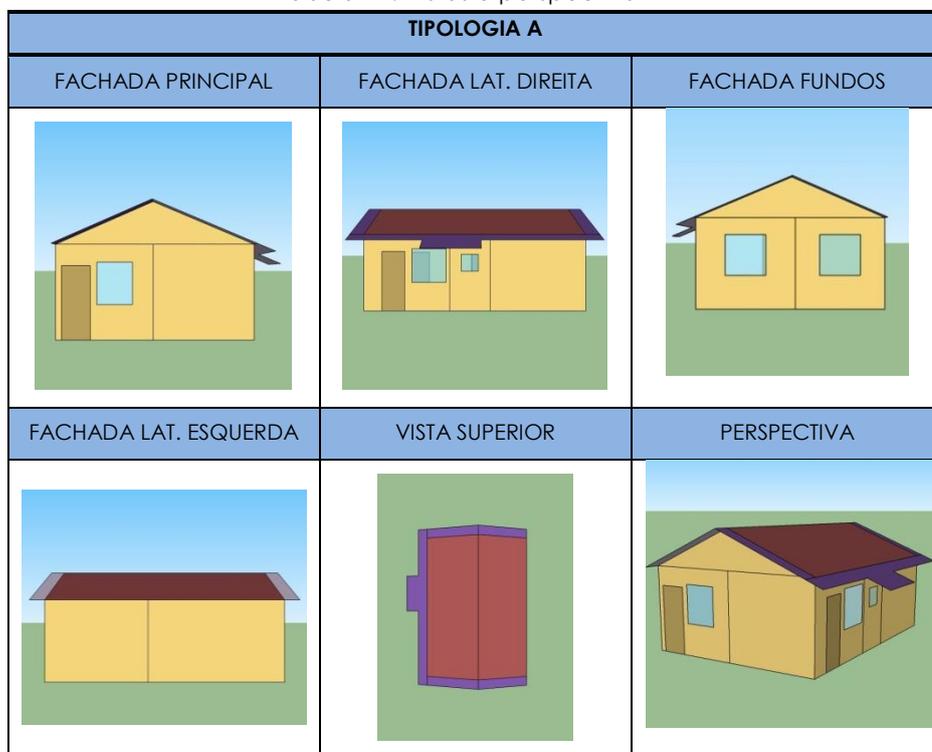


Tabela 45: Dados das zonas TA

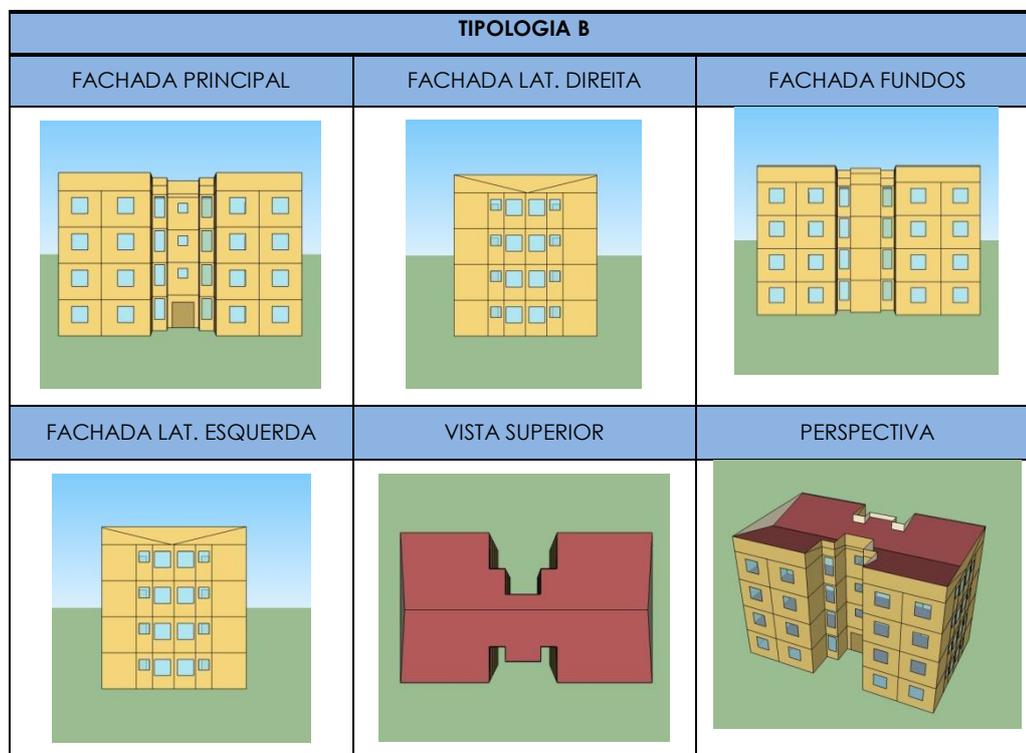
Zona	Ambiente	Área (m ²)	Janelas (unidade)	Portas (unidade)
Z1	Sala	12,90	1	1
Z2	Cozinha	8,51	1	2
Z4	Banheiro	3,19	1	1
Z8	Quarto 1	9,84	1	1
Z9	Quarto 2	8,83	1	1
Z10	Cobertura	43,26	-	-

Tabela 46: Dados das janelas TA

Ambiente	Modelo da janela	Área total (m ²)	Área de abertura (m ² ou °)	Área envidraçada (m ²)	Área total/área parede (%)	Área total/área piso (%)
Z1	Correr 2 fls de vidro	1,20	0,60	1,20	16,30	9,30
Z2	Correr 2 fls de vidro	1,44	0,72	1,44	17,69	16,92
Z4	Maxim-ar	0,36	45 °	0,36	9,40	11,29
Z8	Correr 3 fls Venezianas e vidro	1,44	0,72	0,72	18,23	14,63
Z9	Correr 3 fls Venezianas e vidro	1,44	0,72	0,72	20,31	16,31

Tabela 47: Área envidraçada em relação às fachadas TA

	Norte - 0°	Leste - 90°	Sul - 180°	Oeste - 270°	Total
área de parede exposta (m ²)	18,31	21,05	18,31	21,05	78,73
área de abertura (m ²)	1,20	0,00	1,44	1,80	4,44
abertura /parede (%)	6,55	0,00	7,86	8,55	5,64

Tabela 48: Vistas e perspectiva TB

Tabela 49: Dados das zonas TB, considerando um apartamento térreo

Zona	Ambiente	Área (m ²)	Janelas	Portas
Z1	Sala	10,41	1	1
Z2	Cozinha	7,00	1	1
Z4	Banheiro	2,55	1	1
Z8	Quarto 1	8,09	1	1
Z9	Quarto 2	8,09	1	1

Tabela 50: Dados das janelas TB, considerando um apartamento térreo

Ambiente	Modelo da janela	Área total (m ²)	Área de abertura (m ² ou °)	Área envidraçada (m ²)	Área total/área parede (%)	Área total/área piso (%)
Z1	Correr 2 fls de vidro	1,32	45 °	1,32	55,46	12,68
Z2	Correr 2 fls de vidro	1,44	0,72	1,44	32,43	20,57
Z4	Maxim-ar	0,64	45 °	0,64	19,75	25,09
Z8	Correr 3 fls Venezianas e vidro	1,44	0,72	0,72	16,88	17,80
Z9	Correr 3 fls Venezianas e vidro	1,44	0,72	0,72	16,88	17,80

Tabela 51: Área envidraçada em relação às fachadas TB, considerando um apartamento térreo

	NORTE - 0°	LESTE - 90°	SUL - 180°	OESTE - 270°	TOTAL
área de parede exposta (m ²)	16,85	2,73	0,00	14,31	33,89
área de abertura (m ²)	4,20	0,00	0,00	2,08	6,28
abertura /parede (%)	24,93	0,00	0,00	14,53	18,53

APÊNDICE B – Propriedades dos materiais utilizados nas simulações

Tabela 52: Propriedades dos materiais para o modelo

Nome do elemento construtivo no EP: parext2a (bloco 14 cm)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
concreto	1.75	0.0345	0.020			2400	1	82.8	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
camada de ar			0.110			0	0	0	
concreto	1.75	0.0345	0.020			2400	1	82.8	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.193	0.04	0.13			CT (KJ/m².K)	265.60
			RT((m².K)/W)	0.36				U (W/(m².K))	2.76
									LabEEE (2010)
									LabEEE (2010)
Nome do elemento construtivo no EP: parext5a (tijolo 10 cm)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	P kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
tijolo maciço 10cmx6cmx22cm	1	0.1	0.100			1600	0.93	148.8	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.100	0.04	0.13			CT (KJ/m².K)	148.80
			RT((m².K)/W)	0.27				U (W/(m².K))	3.70
									LabEEE (2010)
									LabEEE (2010)
Nome do elemento construtivo no EP: parext5 (tijolo 10 cm + isol)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
isolamento (poliestireno expandido moldado)	0.04	0.005	0.125			25	1.42	0.1775	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
tijolo maciço 10cmx6cmx22cm	0.9	0.1	0.111			1600	0.92	147.2	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.258	0.04	0.13			CT (KJ/m².K)	197.38
			RT((m².K)/W)	0.43				U (W/(m².K))	2.34
Nome do elemento construtivo no EP: parext7 (painel de concreto 10cm + isol)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
isolamento (poliestireno expandido moldado)	0.04	0.01	0.250			25	1.42	0.355	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
painel de concreto leve moldado in loco	3.76	0.1	0.027			2400	0.95	228	SACHT, 2008, p.278
			0.298	0.04	0.13			CT (KJ/m².K)	278.36

RT((m ² .K)/W)		0.47		U (W/(m ² .K))		2.14			
Nome do elemento construtivo no EP: cob6 + laje3a (laje pré 12 cm + telha cer)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
telha ceramica (cob6)	1.05	0.01	0.010			2000	0.92	18.4	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
camada de ar			0.210			0	0	0	
laje (laje3)	0.9	0.12	0.133			1400	1	168	LabEEE (2010), e cálculo à mão
			0.353	0.04	0.17	CT (KJ/m².K)		186.40	
RT((m².K)/W)		0.56		U (W/(m².K))		1.78			
Nome do elemento construtivo no EP: cob2 + laje3a (laje pré 12 cm +telha fibroc)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
fibrocimento (cob2)	0.95	0.008	0.008			1900	0.84	12.77	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005) LabEEE (2010)
camada de ar			0.210			0	0	0	
laje (laje3)	0.9	0.12	0.133			1400	1	168	LabEEE (2010), e cálculo à mão
			0.352	0.04	0.17	CT (KJ/m².K)		180.77	
RT((m².K)/W)		0.56		U (W/(m².K))		1.78			
Nome do elemento construtivo no EP: cob5 (laje conc 12 cm + isol)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
isolamento (poliestireno expandido moldado)	0.04	0.005	0.125			25	1.42	0.1775	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
laje de concreto	1.75	0.12	0.069			2200	1	264	NBR 15220, parte 3
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.237	0.04	0.17	CT (KJ/m².K)		364.18	
RT((m².K)/W)		0.45		U (W/(m².K))		2.24			
Nome do elemento construtivo no EP: cob2 + laje4 (laje conc 12 cm +isol+telha fibroc)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
fibrocimento (cob2)	0.95	0.008	0.008			1900	0.84	12.768	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
camada de ar			0.210			0	0	0	
isolamento (poliestireno expandido moldado)	0.04	0.01	0.250			25	1.42	0.355	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
laje de concreto	1.75	0.12	0.069			2200	1	264	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.537	0.04	0.17	CT (KJ/m².K)		277.12	
RT((m².K)/W)		0.75		U (W/(m².K))		1.34			
Nome do elemento construtivo no EP: cob2 + laje5a (telha fibroc+forro madeira)									

Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
fibrocimento (cob2)	0.95	0.008	0.008			1900	0.84	12.768	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
camada de ar			0.210			0	0	0	
forro madeira	0.12	0.01	0.083			1400	1	14	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.302	0.04	0.17			26.77	
			RT((m².K)/W)	0.51				U (W/(m².K))	1.95
Nome do elemento construtivo no EP: partint 1 (bloco 9 cm)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
concreto	1.75	0.022	0.013			2400	1	52.8	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
camada de ar			0.111			0	0	0	
concreto	1.75	0.022	0.013			2400	1	52.8	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
argamassa	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.180	0.13	0.13			205.60	LabEEE (2010)
			RT((m².K)/W)	0.440				U (W/(m².K))	2.27
Nome do elemento construtivo no EP: madeira (porta)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
madeira (carvalho, freijó, pinho, cedro, pinus)	0.12	0.035				400	1.34		NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
Nome do elemento construtivo no EP: base (piso)									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
brita	0.7	0.03	0.043			1300	0.8	31.2	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
concretopiso	1.75	0.05	0.029			2400	1	120	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
argamassaintpiso	1.15	0.025	0.022			2000	1	50	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
cerâmica	1.05	0.004	0.004			1600	0.92	5.888	NBR 15220, parte 3 (ABNT, 2005)
			0.097	0.04	0.17			207.09	
			RT((m².K)/W)	0.307				U (W/(m².K))	3.26
Nome do elemento construtivo no EP: veneziana									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
alumínio	230	0.002				2700	0.88	4.752	NBR 15220, parte 2 (ABNT, 2005)
Nome do elemento construtivo no EP: vidro 4mm									
Camada	λ W/(m.K)	e metros	R (m ² .K)/W	Rse (m ² .K)/W	Rsi (m ² .K)/W	ρ kg/m ³	c kJ/Kg.K	CT kJ/m ² .K	Referência
vidro 4mm transmitância solar (Normal): 0.84	0.9	0.004							Dados retirados do EP para vidros 3mm

APÊNDICE C – Gráficos de resultados completos da Série 1

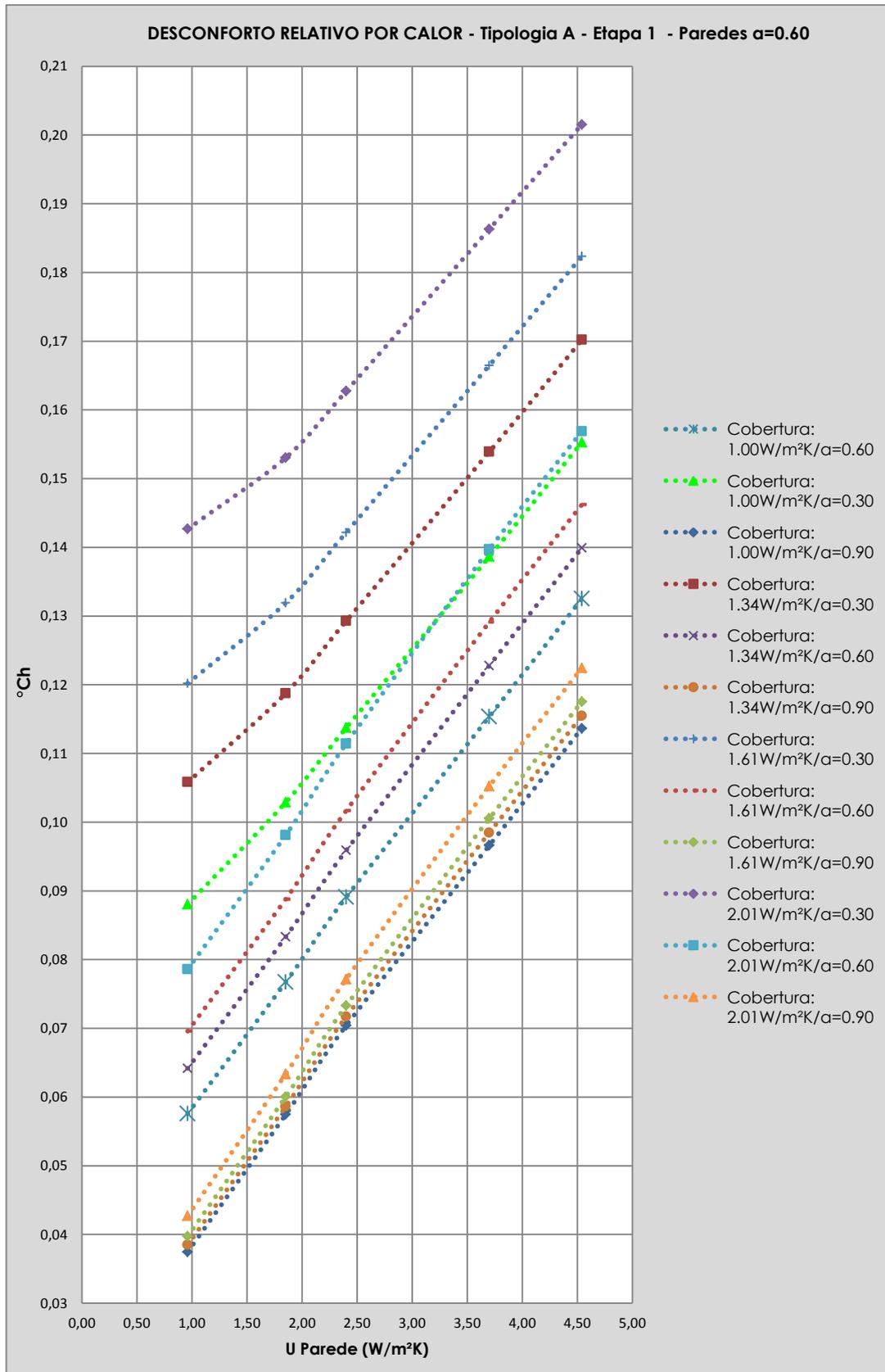


Gráfico 22: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por calor

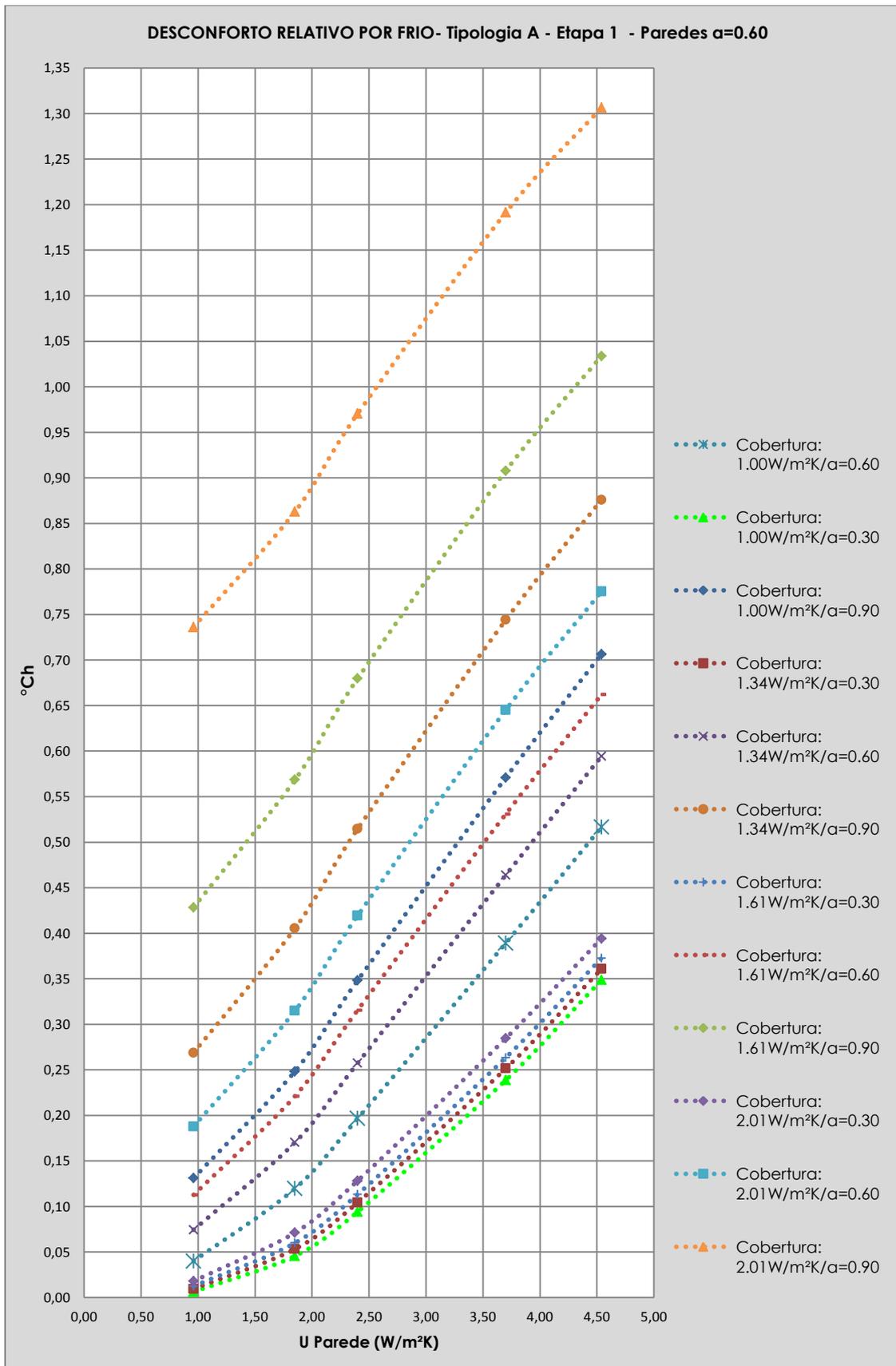


Gráfico 23: Etapa 1 - TA - Paredes com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes coberturas - Desconforto relativo por frio

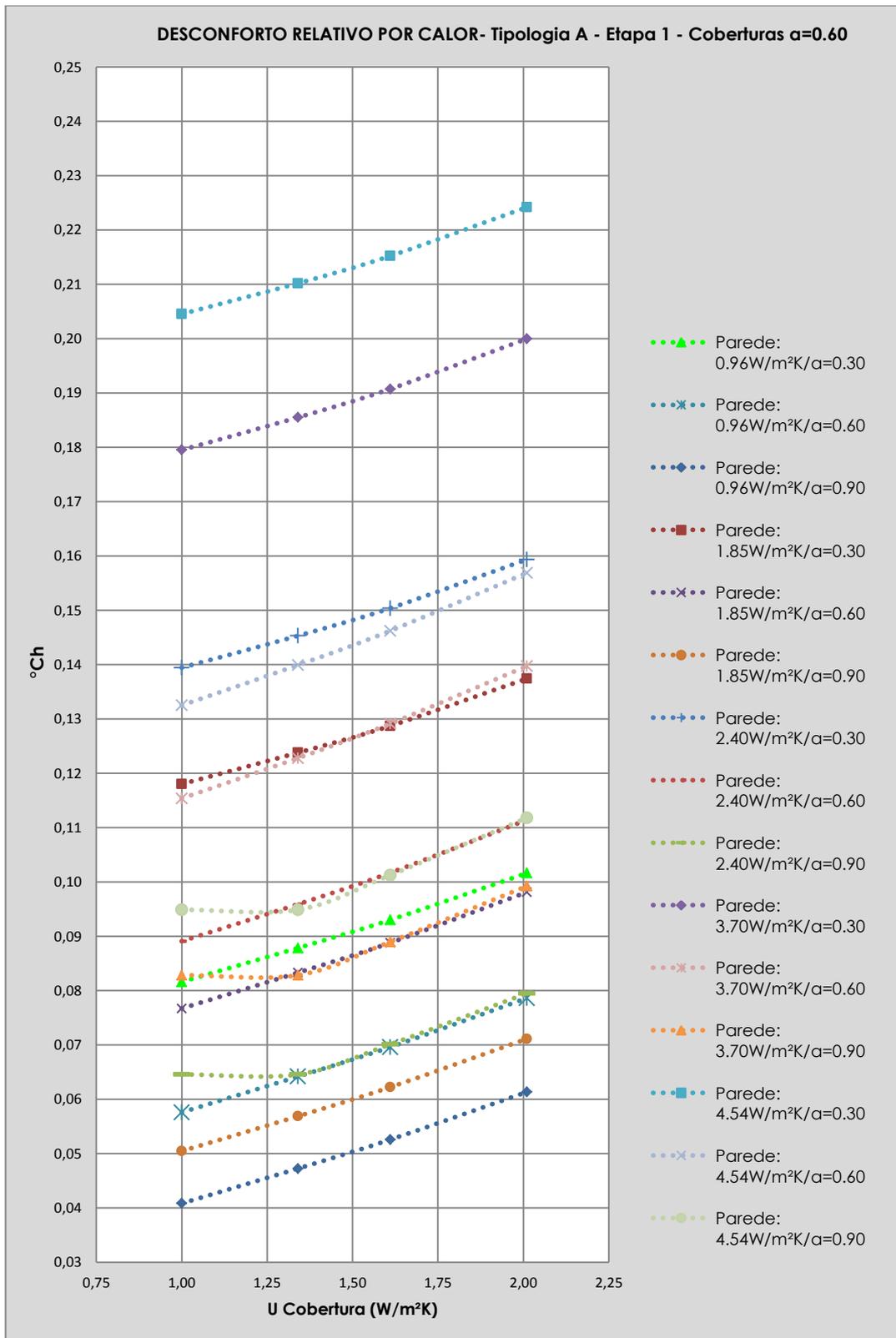


Gráfico 24: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por calor

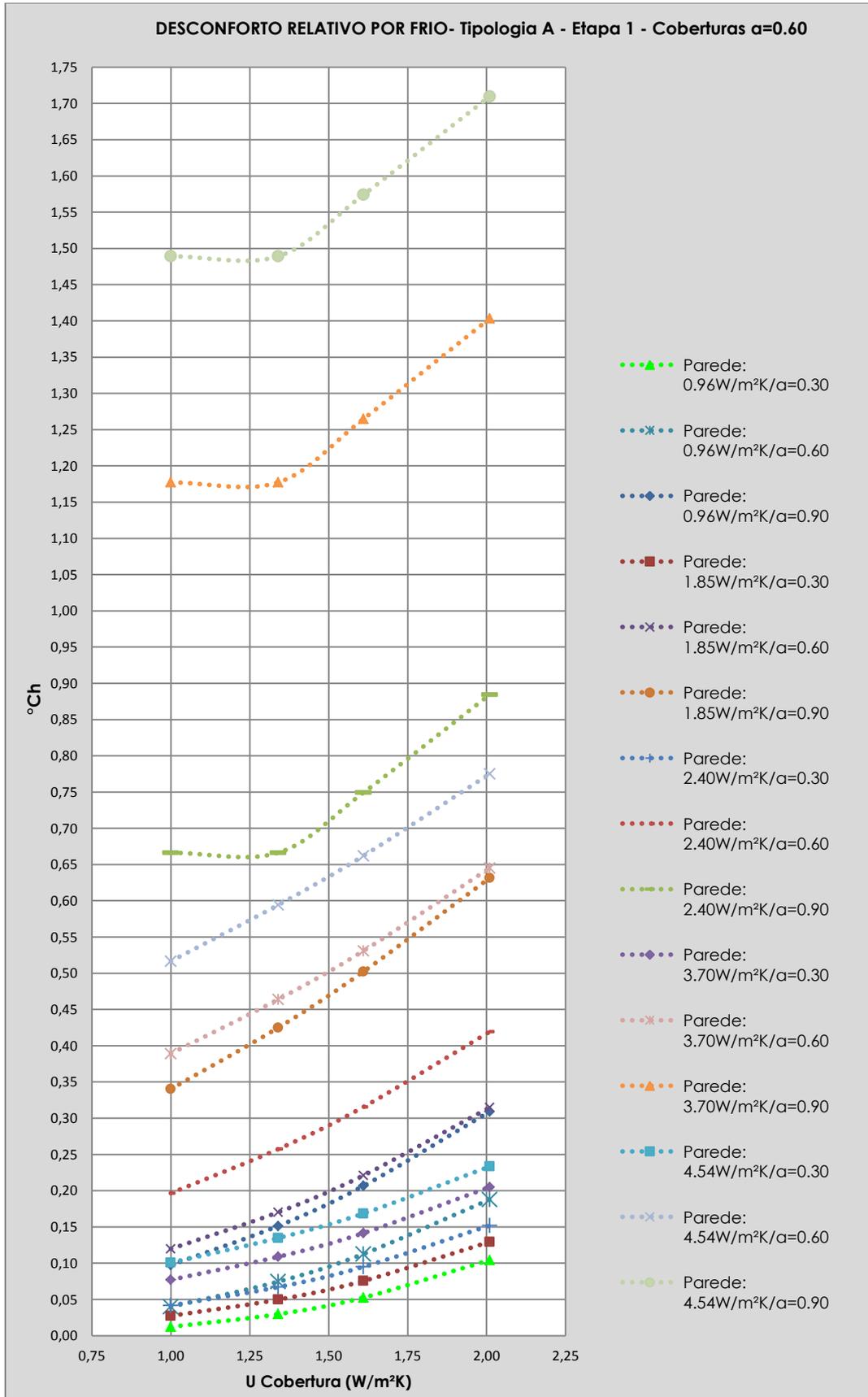


Gráfico 25: Etapa 1 - TA - Coberturas com $\alpha=0.60$ associadas a diferentes paredes - Desconforto relativo por frio

