

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CONFORTO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO VENTILADA NATURALMENTE SEGUNDO AS NORMAS
BRASILEIRAS DE DESEMPENHO TÉRMICO E A ASHRAE 55**

Leila Guedes Alvim

Belo Horizonte
2015

Leila Guedes Alvim

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CONFORTO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO VENTILADA NATURALMENTE SEGUNDO AS NORMAS
BRASILEIRAS DE DESEMPENHO TÉRMICO E A ASHRAE 55**

Dissertação apresentada a Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Construção Civil. Área de concentração: Materiais de Construção Civil. Linha de pesquisa: Gestão de Empreendimentos em Construção Civil.

Orientadora: Profa. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar

Coorientador: Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2015

Leila Guedes Alvim

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO E DO CONFORTO TÉRMICO DE UMA
EDIFICAÇÃO VENTILADA NATURALMENTE SEGUNDO AS NORMAS
BRASILEIRAS DE DESEMPENHO TÉRMICO E A ASHRAE 55**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Construção Civil do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais.

Belo Horizonte, 17 de março de 2015

Prof. Paulo Roberto Pereira Andery
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Construção Civil

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dr^a. Maria Teresa Paulino Aguiar
Orientadora - (UFMG/DEMC)

Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães
Coorientador - (UFMG/DEMC)

Prof. Dr. Silvio Romero Fonseca Motta
(UFMG/DEMC)

Profa. Dr^a. Ana Paula Melo
(UFSC)

AGRADECIMENTOS

À professora Teresa por toda motivação, por me ensinar que a formação pessoal como cientista é o verdadeiro objetivo do mestrado, pelas aulas de Análise da Práxis Científica que nunca esquecerei e por ser um exemplo de professora, orientadora e pesquisadora a ser seguido.

Aos professores Aldo e Silvio por acreditarem em mim e por me motivarem a ir cada vez mais longe.

A professora Ana Paula por ter aceitado o convite de participar da banca examinadora deste trabalho e pela grande contribuição para o seu aperfeiçoamento.

A todos os professores do DEMC que ajudaram a complementar minha formação.

Ao Bernardo pelo amor, motivação e apoio incondicional.

Aos meus pais, Halley e Graça, e à Cynthia pelo amor e amizade e por estarem sempre presentes.

A todos amigos que participaram de alguma forma dessa etapa.

Ao Labcon/UFMG por todos os ensinamentos sobre conforto e eficiência energética.

Ao Labeee/UFSC por deixar disponível tantas informações essenciais a este trabalho.

RESUMO

A crescente preocupação com o uso racional dos recursos naturais e com a eficiência energética evidenciou a importância do desempenho das construções. Em 2005, foi publicada a primeira norma brasileira de desempenho térmico de edificações de interesse social, a NBR 15.220 e, posteriormente, em 2013 foi publicada a última versão de uma norma de desempenho que se aplica a todas as edificações habitacionais, a NBR 15.575. Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de uma edificação habitacional localizada em Belo Horizonte frente a essas duas normas brasileiras. Na avaliação conforme a NBR 15.220 verificou-se o atendimento das diretrizes construtivas da zona bioclimática 3 (ZB3), classificação da cidade no zoneamento bioclimático brasileiro e da zona bioclimática 4 (ZB4), zona indicada por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para cidade de Belo Horizonte. Foram realizadas avaliações de conforto térmico para a edificação real, com suas características originais, e também foram realizadas modificações no projeto da edificação para verificar o percentual de horas de conforto térmico obtido em construções que atendem às diretrizes construtivas das duas normas de desempenho, no método prescritivo. Os resultados alcançados foram comparados com uma avaliação de conforto térmico segundo a norma norte-americana de conforto térmico ASHRAE Standard 55, no modelo adaptativo. Os resultados mostraram que o atendimento às normas de desempenho proporcionou um aumento das horas de conforto em relação à edificação original, em todos os casos. Na análise segundo a NBR 15.220 verificou-se uma inconsistência no zoneamento bioclimático brasileiro, uma vez que o atendimento às diretrizes construtivas para a ZB4 proporcionou um melhor desempenho térmico em relação às diretrizes construtivas para a ZB3. Na avaliação segundo a NBR 15.575 foi possível verificar que a norma não disponibiliza todos os dados e definições necessários para utilizar o procedimento por simulação computacional, o que dificulta o processo e o torna subjetivo. O procedimento por simulação também não possibilita uma avaliação anual e que considere o uso real da edificação, como a presença de cargas internas e de estratégias de ventilação natural, prejudicando a avaliação.

Palavras-chave: conforto térmico; desempenho térmico; simulação computacional.

ABSTRACT

The growing concern about the rational use of natural resources and energy efficiency of buildings has highlighted the importance of constructions performance. In 2005, the first Brazilian standard on thermal performance for low-income housing was published, NBR 15.220. After that, in 2013, another building performance standard that applies to all residential buildings was published, NBR 15.575. The present study aims to evaluate the thermal performance of a house located in Belo Horizonte according to the two Brazilian performance standards mentioned above. In the NBR 15.220 evaluation, this study checks the fulfillment of the constructive guidelines for the bioclimatic zone 3 (ZB3), the zone indicated for this city in the Brazilian bioclimatic zoning, and also for the bioclimatic zone 4 (ZB4), zone indicated by Pereira and Assis (2005) as the most appropriate for the city. Thermal comfort assessments are performed, for the actual building with its original features as well as for modified versions of the building that meet with the constructive guidelines of the two thermal performance standards in the prescriptive method. The results are compared with a thermal comfort assessment according to the American ASHRAE Standard 55, in the adaptive model. The results show that the percentage of comfort hours obtained in the buildings that comply with the design guidelines of the two performance standards has increased when compared to the building with the original features, in all cases. An inconsistency was found in the Brazilian bioclimatic zoning during the NBR 15.220 analysis, as the compliance with the constructive guidelines for ZB4 provided a building with a better thermal performance than one that complies with the constructive guidelines for ZB3. It was also found that NBR 15.575 does not provide all the data needed to run a computer simulation, what makes the process more difficult and subjective. The simulation procedure of the NBR 15.575 standard does not allow an annual assessment nor consider the actual use of the building, like the presence of internal loads and natural ventilation strategies, undermining an effective evaluation.

Keywords: thermal comfort; thermal performance; computer simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ANOTAÇÕES E ABREVIATURAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1 Conforto térmico	5
3.1.1 Índices de conforto térmico.....	6
3.1.2 ASHRAE Standard 55.....	8
3.2 Arquitetura bioclimática.....	11
3.3 Normas brasileiras de desempenho térmico.....	13
3.3.1 NBR 15.220:2005 Desempenho Térmico de Edificações	13
3.3.2 NBR 15.575:2013 Edificações Habitacionais – Desempenho	26
3.4 Simulação computacional termo-energética	33
4. MÉTODO.....	36
4.1 Caracterização do clima de Belo Horizonte.....	36
4.2 Definição da edificação de referência.....	38
4.3 Avaliação da edificação de acordo com as normas	41
4.3.1 NBR 15.220.....	41

4.3.2	NBR 15.575.....	44
4.3.3	ASHRAE Standard 55.....	59
5.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	65
5.1	NBR 15.220.....	65
5.1.1	Avaliação da edificação real.....	65
5.1.2	Adequação da edificação para atender aos requisitos da ZB3	72
5.1.3	Adequação da edificação para atender aos requisitos da ZB4	80
5.1.4	Discussão dos resultados	86
5.2	NBR 15.575.....	87
5.2.1	Avaliação da edificação real.....	87
5.2.2	Adequação da edificação para atender aos requisitos mínimos do método simplificado	94
5.2.3	Discussão dos resultados	100
6.	CONCLUSÕES.....	102
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	104
8.	APÊNDICE A – Cálculo das propriedades térmicas das paredes e coberturas.....	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Carta Bioclimática adotada para o Brasil	11
Figura 3.2 – Linha de sombreamento na Carta Bioclimática	13
Figura 3.3 – Zoneamento bioclimático brasileiro	15
Figura 3.4 – Carta Bioclimática zona 3	17
Figura 3.5 – Diagrama bioclimático sobre o qual foram plotados os dias médios mensais de Belo Horizonte.....	18
Figura 3.6 – Diagrama Bioclimático sobre o qual foram plotados os dados horários medidos do ano de 1995 para Belo Horizonte. Período: Verão.....	18
Figura 3.7 – Diagrama Bioclimático sobre o qual foram plotados os dados horários medidos do ano de 1995 para Belo Horizonte. Período: Inverno.....	19
Figura 3.8 – Grupos Climáticos de 1 a 8	22
Figura 3.9 – Grupos climáticos de 9 a 16	23
Figura 3.10 – Grupos climáticos 17 a 24.....	23
Figura 4.1 – Dados climáticos da cidade de Belo Horizonte	37
Figura 4.2 – Desenho ilustrativo da edificação.....	38
Figura 4.3 – Planta baixa da edificação.....	39
Figura 4.4 - Corte transversal da edificação.....	39
Figura 4.5 – Representação das paredes da edificação	40
Figura 4.6 – Representação dos tipos de cobertura da edificação.....	40
Figura 4.7 – Carta solar de Belo Horizonte - declinação do sol na estação de inverno.....	49
Figura 4.8 – Carta solar de Belo Horizonte - declinação do sol na estação de verão.....	50
Figura 4.9 – Frequência de ocorrência dos ventos para Belo Horizonte – MG.....	51
Figura 4.10 – Velocidade predominante dos ventos para cidade de Belo Horizonte – MG.....	52

Figura 4.11 – Modelo tridimensional da edificação simulada.....	54
Figura 4.12 – Cargas internas na edificação.....	56
Figura 4.13 – Padrão de ocupação nos dias de semana.....	57
Figura 4.14 – Padrão de ocupação nos fins de semana	57
Figura 4.15 – Padrão de uso do sistema de iluminação artificial nos dias de semana.....	58
Figura 4.16 – Padrão de uso do sistema de iluminação nos fins de semana	58
Figura 4.17 – Padrão de uso dos equipamentos nos dias de semana.....	58
Figura 4.18 – Padrão de uso dos equipamentos nos dias de semana.....	59
Figura 4.19 – Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados (os limites de 80% são normativos e os de 90% informativos)	60
Figura 5.1 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (edificação sem modificações)	69
Figura 5.2 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (edificação sem modificações).....	69
Figura 5.3 - Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (edificação sem modificações)	70
Figura 5.4 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) - edificação sem modificações	71
Figura 5.5 - Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) - edificação sem modificações.....	71
Figura 5.6 – Representação de parede para adequação da edificação	74
Figura 5.7 – Representação da cobertura para adequação da edificação	75
Figura 5.8 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.220 ZB3).....	76
Figura 5.9 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.220 ZB3)	77
Figura 5.10 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.220 ZB3).....	77
Figura 5.11 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.220 ZB3	78

Figura 5.12 – Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB3	79
Figura 5.13 – Modelo 3d do arquivo de simulação com brises na fachada Noroeste	81
Figura 5.14 – Composição parede dupla de alvenaria de 6 furos	82
Figura 5.15 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.220 ZB4)	83
Figura 5.16 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.220 ZB4).....	83
Figura 5.17 - Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.220 ZB4)	84
Figura 5.18 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.220 ZB4	85
Figura 5.19 – Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB4	85
Figura 5.20 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para a Sala	90
Figura 5.21 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para o Quarto 1	90
Figura 5.22 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para o Quarto 2	91
Figura 5.23 - Perfil de temperatura do dia típico de verão para a Sala	92
Figura 5.24 – Perfil de temperatura do dia típico de verão para o Quarto 1	93
Figura 5.25 – Perfil de temperatura do dia típico de verão para o Quarto 2	93
Figura 5.26 – Representação de parede para adequação da edificação.....	96
Figura 5.27 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.575)	97
Figura 5.28 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.575).....	97
Figura 5.29 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.575).....	98
Figura 5.30 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.575	99
Figura 5.31 - Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB4	99

Figura 8.1 - Representação da cobertura da edificação.....	112
Figura 8.2 - Representação da cobertura da edificação.....	114
Figura 8.3 - Representação da cobertura para adequação da edificação.	116
Figura 8.4 - Representação das paredes da edificação.	118
Figura 8.5 - Representação de parede para adequação da edificação.	121
Figura 8.6 - Representação de parede para adequação da edificação.	123

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.....	16
Tabela 3.2 - Frequência de ocorrência dos pares psicrométricos em cada Zonas Bioclimática.....	19
Tabela 3.3 - Valores percentuais da sensação térmica experimentada	19
Tabela 4.1 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais.....	41
Tabela 4.2 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas).....	41
Tabela 4.3 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 3	42
Tabela 4.4 – Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 3.....	42
Tabela 4.5 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 3	43
Tabela 4.6 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 4	43
Tabela 4.7 – Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 4.....	43
Tabela 4.8 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 4	43
Tabela 4.9 – Transmitância térmica de paredes externas	44
Tabela 4.10 – Capacidade térmica de paredes externas	44
Tabela 4.11 – Transmitância térmica de coberturas	45
Tabela 4.12 – Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar	45
Tabela 4.13 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão	47
Tabela 4.14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno	47
Tabela 4.15 – Dados de dias típicos de verão para Belo Horizonte	48
Tabela 4.16 – Dados de dias típicos de inverno para Belo Horizonte	48
Tabela 4.17 – Datas de início e fim das estações de verão e inverno	49
Tabela 4.18 - Correspondência entre o índice de claridade e a nebulosidade.....	53
Tabela 4.19 – Índices de claridade encontrados a partir dos valores de nebulosidade	53

Tabela 4.20 - Dados para simulação do dia típico de verão.....	53
Tabela 4.21 - Dados para a simulação do dia típico de inverno	54
Tabela 4.22 - Temperaturas do solo utilizadas	55
Tabela 4.23 – Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes	61
Tabela 4.24 – Coeficiente e expoente para janelas e portas.....	63
Tabela 5.1 – Desconto de esquadrias janela de correr	65
Tabela 5.2 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada.....	66
Tabela 5.3 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para as paredes externas.....	67
Tabela 5.4 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para cobertura de telha cerâmica + forro de PVC	67
Tabela 5.5 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para cobertura de telha cerâmica +	68
Tabela 5.6 – Resumo da avaliação pela NBR 15.220.....	68
Tabela 5.7 – Tabela de desconto de esquadrias para janelas de abrir.....	73
Tabela 5.8 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada.....	73
Tabela 5.9 – Coeficiente e expoente para janelas e portas	73
Tabela 5.10 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ)	75
Tabela 5.11 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para cobertura	75
Tabela 5.12 – Valores de U, ϕ e F_{s_0} para parede dupla de tijolos.....	82
Tabela 5.13 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada	88
Tabela 5.14 – Resultado dos cálculos de U e CT para as paredes externas.....	88
Tabela 5.15 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + PVC	88
Tabela 5.16 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + laje de concreto.....	89
Tabela 5.17 – Resumo da avaliação pelo método simplificado da NBR 15.575.....	89
Tabela 5.18 - Níveis de desempenho alcançados no dia típico de inverno	91
Tabela 5.19 - Níveis de desempenho alcançados no dia típico de verão	94

Tabela 5.20 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + PVC	95
Tabela 5.21 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + laje de concreto.....	95
Tabela 5.22 – Resultado dos cálculos de U e CT para as paredes externas.....	96

LISTA DE ANOTAÇÕES E ABREVIATURAS

ABNT = Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI = American National Standards Institute

ASHRAE = American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers

BESTEST = Building Energy Simulation Test

BLAST = Building Loads Analysis and System Thermodynamics

I = Inverno

INMETRO = Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

ISO = International Organization for Standardization

L = Leste

N = Norte

NBR = Norma Brasileira

NE = Nordeste

O = Oeste / Outono

P = Primavera

PMV = Predicted Mean Vote

PPD = Percentage of Dissatisfied

PVC = Policloreto de vinila

RTQ-R = Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais

S = Sul

SE = Sudeste

SO = Sudoeste

T = Temperatura média

TBS = Temperatura de bulbo seco

Text = Temperatura externa

Tint = Temperatura interna

Tn = Temperatura média mínima

Tna = Temperatura mínima absoluta

$t_{pma(out)}$ = Temperatura média do ar externo predominante

TRY = Ano Climático de Referência

$T_{setpoint}$ = Temperatura de setpoint

T_x = Temperatura média máxima

T_{xa} = Temperatura média absoluta

V = Verão

ZB = Zona bioclimática

LISTA DE SÍMBOLOS

% - Porcentagem

° - Graus

°C - Graus Celsius

c - Calor específico

C - Capacidade térmica

clo - Unidade de medição da resistência térmica da roupa

e - Espessura de uma camada

FS_o - Fator solar

kJ/m².K - Kilojoule por metro quadrado kelvin

met - Unidade utilizada para descrever a energia produzida por unidade de área de uma pessoa em repouso

R - Resistência térmica de um componente

ren/h - Renovação de ar por hora

U - Transmitância térmica de um componente

W/m².K - Watt por metro quadrado kelvin

α - Absortância à radiação solar

ρ - Densidade de massa aparente do material

φ - Atraso térmico

1. INTRODUÇÃO

As edificações devem proporcionar conforto e segurança a seus usuários, atendendo a suas necessidades ao longo do ciclo de vida das construções. Nesse sentido, nas últimas décadas, o setor da construção civil de vários países tem se esforçado em criar normas de desempenho para as edificações. A implementação dessas normas agrega mais qualidade na concepção, elaboração e execução dos projetos. Em 2005, foi publicada a primeira norma brasileira que avalia o desempenho térmico das edificações, a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c). Seus parâmetros são voltados exclusivamente para o desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social. Uma grande contribuição dessa norma foi o desenvolvimento do primeiro zoneamento bioclimático brasileiro. Devido a limitações em sua metodologia, o zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) vem sendo questionado. Existem estudos que contestam a classificação das cidades e também uma proposta de um novo zoneamento. A avaliação do desempenho térmico da edificação na NBR 15.220 (ABNT, 2005c) é realizada primeiramente por meio da definição da zona bioclimática em que a edificação está inserida e, a partir disso, valores de referência de transmitância térmica, atraso térmico, fator solar devem ser atendidos, assim como o tamanho das aberturas para ventilação e o sombreamento das aberturas. Em 2013 foi publicada uma norma de desempenho que se aplica a todas as edificações habitacionais, a NBR 15.575 (ABNT, 2013). A norma determina requisitos e critérios de desempenho para as edificações e seus sistemas com base em requisitos do usuário de segurança, habitabilidade e sustentabilidade. Um dos requisitos de habitabilidade avaliado é o desempenho térmico das edificações. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) também parte da definição de seus parâmetros a partir do zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Por sua vez, essa norma avalia a transmitância térmica e a capacidade térmica dos materiais da envoltória por meio de valores de referência e verifica a área para ventilação das aberturas. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) também possibilita a averiguação do desempenho térmico da edificação a partir de uma simulação computacional que comprove um bom desempenho térmico nos dias típicos de projeto de verão e inverno, dias definidos pela norma.

As normas de desempenho térmico tentam, de forma indireta, promover edificações que possibilitem que seus usuários se aproximem de um estado de conforto térmico. O conforto térmico, definido como “o estado de espírito do usuário que expressa satisfação com o ambiente térmico que está inserido” (ASHRAE, 2013), depende de uma série de variáveis ambientais e pessoais. O resultado de usuários confortáveis dentro das edificações é o aumento de sua produtividade e a redução do uso de eletrodomésticos para climatização dos ambientes (ventiladores, aquecedores e aparelhos de ar-condicionado). A avaliação do conforto térmico pode ser executada por meio de medições in loco após a construção da edificação ou a partir de modelos matemáticos que consigam prever as respostas dos usuários. Neste último caso, para ambientes ventilados naturalmente, recomenda-se a utilização do modelo de conforto adaptativo desenvolvido por Brager e De Dear, implementado pela norma norte-americana ASHRAE Standard 55 (2013).

Nesse contexto, este trabalho avalia o desempenho térmico de um estudo de caso frente às duas normas de desempenho brasileiras, a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) e a NBR 15.575 (ABNT, 2013) e compara os resultados alcançados com uma avaliação de conforto térmico utilizando a ASHRAE Standard 55 (2013). A edificação escolhida para estudo é uma habitação unifamiliar de interesse social ventilada naturalmente inserida na cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. Neste estudo são realizadas avaliações de desempenho considerando a classificação do zoneamento bioclimático brasileiro para a cidade de Belo Horizonte, zona bioclimática 3, e também são realizadas avaliações considerando a zona bioclimática indicada por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para cidade de Belo Horizonte, zona bioclimática 4. Além da avaliação da habitação real, são realizadas modificações no projeto da edificação para verificar o percentual de horas de conforto térmico obtido em construções que atendem às diretrizes construtivas no método prescritivo das duas normas de desempenho. Frente aos resultados obtidos, o trabalho contribui para a realização de uma análise crítica das normas.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o desempenho térmico de uma habitação unifamiliar de interesse social inserida na cidade de Belo Horizonte frente às duas normas de desempenho brasileiras, NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) e NBR 15.575 (ABNT, 2013). Além da avaliação da edificação real, são realizadas modificações no projeto da edificação para verificar o percentual de horas de conforto térmico obtido em construções que atendem às diretrizes construtivas do método prescritivo da NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) e da NBR 15.575 (ABNT, 2013). Os resultados alcançados são comparados com uma avaliação de conforto térmico utilizando a norma norte-americana ASHRAE Standard 55 (2013).

Para que esse objetivo principal seja alcançado, pretende-se atender os seguintes objetivos específicos:

- analisar o desempenho térmico da edificação de acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) verificando o atendimento das diretrizes construtivas da zona bioclimática 3, classificação da cidade no zoneamento bioclimático brasileiro;
- realizar adaptações no projeto da edificação para atender aos requisitos da NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) para a zona bioclimática 3;
- avaliar o desempenho térmico da edificação segundo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) averiguando o atendimento das diretrizes construtivas da zona bioclimática 4, zona bioclimática indicada por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para cidade de Belo Horizonte;
- realizar adaptações no projeto da edificação para atender aos requisitos da NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) para a zona bioclimática 4;
- verificar o desempenho térmico da edificação quanto a NBR 15.575 (ABNT, 2013);
- realizar adaptações no projeto da edificação para atender às diretrizes construtivas do procedimento simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2013);

- analisar as condições de conforto térmico da edificação original e dos projetos de adequação de acordo com o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Conforto térmico

De acordo com Frota e Schiffer (2001), o homem é um ser homeotérmico. Sua temperatura interna permanece a um valor constante na ordem de 37°C, aceitando pequenas variações. Para se manter nessa faixa de temperatura, nos mais variados ambientes, o corpo utiliza de seu aparelho termorregulador. Com ele é possível reduzir os ganhos ou aumentar as perdas de calor por meio de alguns mecanismos de controle. A termorregulação representa um esforço extra ao corpo humano, propiciando uma queda na sua potencialidade. A sensação de conforto térmico é vivenciada quando o organismo perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo relacionado à atividade exercida naquele momento. A ASHRAE (2009), por outro lado, a define de forma mais subjetiva, como “o estado de espírito do usuário que expressa satisfação com o ambiente térmico em que está inserido”. Essa definição deixa em aberto o “estado de espírito” ou a “satisfação” mas demonstra que o conforto é um processo cognitivo que envolve fatores não só fisiológicos mas também psicológicos (ASHRAE, 2009).

O conforto térmico é influenciado por variáveis ambientais e humanas. As variáveis ambientais mais relevantes são a temperatura do ar, a temperatura radiante, a umidade relativa e a velocidade do ar. As variáveis humanas são a resistência térmica da roupa e a taxa metabólica relacionada à atividade física exercida.

A roupa funciona como um isolante térmico. Quanto maior for sua resistência térmica, menor serão as trocas de calor realizadas pela pele por convecção e por radiação. Em climas secos, roupas adequadas podem reter a umidade proveniente da evaporação do suor, criando um microclima mais ameno e evitando maiores perdas de líquido corpóreo por evaporação (LAMBERTS *et al.*, 2014a). A roupa também reduz o ganho de calor relativo à radiação solar direta e o efeito refrigerador do suor (FROTA e SCHIFFER, 2001).

A atividade física desempenhada é responsável pelo calor gerado por metabolismo que regulará a temperatura da pele e também sua taxa de secreção de suor (LAMBERTS *et al.*, 2014b). A condição de conforto só é atingida se a temperatura do corpo estiver dentro de estreitos limites e a umidade da pele for baixa (ASHRAE, 2009).

Para que haja conforto, a pessoa não pode estar sujeita a algum tipo de desconforto localizado. Os fatores que o causam atuam apenas em alguma parte do corpo e, mesmo que a pessoa esteja se sentindo satisfeita com a temperatura do corpo como um todo, ela se sente incomodada. Os mais comuns são diferenças de temperatura no sentido vertical (entre os pés e a cabeça), campo assimétrico radiante, resfriamento convectivo local (correntes de ar frias), e contato com pisos frios ou quentes (LAMBERTS *et al.*, 2014b).

3.1.1 Índices de conforto térmico

Ao longo das últimas décadas, pesquisadores têm observado o comportamento dos usuários e suas respostas térmicas, fisiológicas e psicológicas ao ambiente construído com o intuito de desenvolver modelos matemáticos que consigam prever essas respostas para garantir o conforto térmico (ENERGYPLUS, 2013a). A maioria dos índices desenvolvidos expressam a sensação de conforto por meio de uma temperatura de referência que combina o efeito da temperatura do ar, umidade, radiação e velocidade do ar (FIGUEIREDO e FROTA, 2008).

Existem duas abordagens que tentam chegar a índices de conforto que se aproximem da realidade: a analítica/estática e a adaptativa. A primeira baseia-se em estudos realizados em câmaras climatizadas e considera que o homem reage ao ambiente térmico de forma passiva. Nesses estudos, o pesquisador controla tanto as variáveis ambientais como as pessoais no intuito de chegar à melhor combinação que resulte em uma condição de conforto. A segunda define seus critérios de conforto por meio de medições em ambientes reais em estudos de campo e reconhece que o homem interage com o ambiente para atender às suas sensações e preferências térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2014b).

Os índices de conforto da abordagem analítica/estática foram os primeiros a serem desenvolvidos e têm como maior representante o pesquisador Ole Fanger. Suas equações e métodos, conhecidos como *Predicted Mean Vote* (PMV) e *Percentage of Dissatisfied* (PPD), foram amplamente aceitos e serviram como base para a elaboração das normas internacionais como a ASHRAE Standard 55 (2013) e a *International Organization for Standardization* (ISO) 7730 (1994) (LAMBERTS *et al.*, 2014b).

A aplicação desses métodos em ambientes ventilados naturalmente foi debatida por Brager e De Dear (2001). Seus estudos concluíram que usuários de edificações ventiladas naturalmente são mais tolerantes às variações de temperatura que as definidas pelos índices originados pelos estudos em câmaras climatizadas, dando origem à “Teoria de conforto adaptativo”. Essa teoria considera que existe um grau de adaptação das pessoas que ocorre nas esferas fisiológica, comportamental e psicológica onde não era contabilizada nos índices de conforto tradicionais. Um exemplo dessa adaptação é de que pessoas submetidas a condições de desconforto térmico podem ajustar o ambiente para melhor atender às suas necessidades (FIGUEIREDO e FROTA, 2008).

A abordagem adaptativa considera que a sensação de conforto não é uma resposta apenas às condicionantes ambientais do ambiente interno. Ela reconhece a influência da temperatura externa por acreditar que um dos principais condicionantes do desconforto térmico é o contraste entre os ambientes que as pessoas esperam encontrar e os ambientes que elas encontram (LAMBERTS *et al.*, 2014b).

O modelo adaptativo de conforto térmico desenvolvido por Brager e De Dear demonstrou que pessoas inseridas em ambientes ventilados naturalmente suportam maiores diferenças de temperatura interna se tiverem controle sobre algumas variáveis que influenciam sua sensação de conforto, adotando comportamentos como de abrir ou fechar as janelas ou a escolha da vestimenta de acordo com sua necessidade (BRAGER e DE DEAR, 2001).

3.1.2 ASHRAE Standard 55

Em 2004 foi publicada uma nova versão da ASHRAE Standard 55 “*Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*”. Essa versão, além de conter o método voltado para espaços condicionados artificialmente já presente nas duas versões anteriores, incluiu os preceitos do modelo de conforto adaptativo desenvolvido por Brager e De Dear para determinar-se condições térmicas aceitáveis em ambientes ventilados naturalmente, permitindo o controle de abertura das janelas aos usuários (FIGUEIREDO e FROTA, 2008).

Halawa e Van Hoof (2012) acreditam existir inúmeras deficiências acerca do modelo adaptativo, em particular o fato de não levar em consideração o efeito de algumas das variáveis presentes nas abordagens convencionais de conforto térmico, como a influência da umidade relativa e da velocidade do ar. Halawa e Van Hoof (2012) afirmam que essas questões ainda devem ser discutidas e comprovadas por meio de estudos científicos. Também debatem que os índices de conforto da abordagem analítica possuem uma flexibilidade maior e uma aplicabilidade mais ampla.

A aplicabilidade do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013) possui limitações. Isso acontece porque a norma exige que a edificação em análise tenha as mesmas características presentes nos dados que deram origem à norma (BRANGER e DE DEAR, 2001). O modelo pode ser adotado nas seguintes condições (ASHRAE, 2013):

- em ambientes onde não há a presença de sistema de condicionamento artificial instalado e em que as janelas possam ser operadas facilmente pelos ocupantes de acordo com suas necessidades;
- a temperatura média predominante do ar externo deve estar dentro do intervalo de 10°C e 33,5°C;
- os ocupantes devem desenvolver atividades sedentárias com taxas metabólicas entre 1,0 e 1,3 met, não sendo incluídas atividades de dormir ou de repouso na cama;
- os ocupantes devem ter liberdade para trocarem de roupa de acordo com as condições climáticas dentro de uma faixa de 0,5 – 1,0 clo.

Apesar da ASHRAE Standard 55 (2013) restringir a adoção do modelo de conforto adaptativo para edificações onde sejam desenvolvidas atividades com taxas metabólicas entre 1,0 – 1,3 met, vários trabalhos avaliaram o conforto térmico dos usuários de edificações residenciais, onde os usuários desempenham atividades sedentárias, como dormir (0,7 met).

Souza *et al.* (2011) verificaram a influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico de um projeto residencial em *light steel framing* considerando o método adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2004). Foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) para o dia extremo de verão do arquivo climático do tipo TRY. Adotou-se uma condição de ventilação natural constante dos ambientes, com 4 renovações de ar por hora (4 ren/h). Os resultados permitiram constatar que a utilização de estratégias de inércia térmica do solo, para resfriamento, associadas a estratégias de ventilação natural e sombreamento diminuem os níveis de desconforto na edificação.

Dong *et al.* (2014) realizaram um estudo sobre o impacto do uso de paredes de taipa na temperatura interna de edificações residenciais sem climatização artificial, na Austrália. Para tanto considerou-se o método adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2010). O programa de simulação computacional *AccuRate* (CSIRO, 2004) foi utilizado para realizar as análises. Foi verificada a influência do tamanho das janelas, sombreamento, taxa de ventilação e espessura das paredes no conforto térmico das edificações. O estudo concluiu que o uso de paredes de taipa tem um grande potencial na construção de edificações ventiladas naturalmente localizadas em climas quentes e secos e climas temperados.

Segundo Nicol (2004), ao adotar a abordagem adaptativa de conforto térmico em climas quentes e úmidos verifica-se que as pessoas preferem uma temperatura de conforto mais baixa se a umidade é alta. Observa-se, então, que o efeito principal da umidade relativa (ou a pressão do vapor de água) é o de reduzir a amplitude da zona de conforto. Esse efeito não é considerado na avaliação de conforto da ASHRAE Standard 55 (2013).

Jeffe e Westphal (2014) avaliaram o desempenho térmico de um ambiente corporativo em um edifício comercial em Florianópolis – SC, com o objetivo de verificar qual o potencial de aproveitamento da ventilação natural, caso o modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2010) considerasse limites de entalpia. Foi realizada uma avaliação do conforto térmico com base no modelo adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2010) utilizando o programa de simulação computacional *EnergyPlus* (DOE, 2013). Foram simuladas diferentes estratégias de controle de disponibilidade de ventilação natural com o objetivo de testar diferentes *setpoints* de temperatura associados com *setpoints* de entalpia do ar externo. Os resultados mostraram que quando é atribuído um limite de aproveitamento da ventilação natural apenas para umidades mais baixas (entalpia do ar externo mais baixa) o potencial de aproveitamento da ventilação natural é reduzido, reduzindo também as horas de conforto térmico no ano.

Marcondes *et al.* (2005) realizaram um estudo do desempenho térmico dos projetos dos edifícios de um centro de pesquisas, no Rio de Janeiro, incluindo edifícios ventilados naturalmente e edifícios condicionados artificialmente. Para a avaliação dos edifícios com ventilação natural foi aplicado o modelo adaptativo de conforto térmico, proposto no ASHRAE RP-884 (DE DEAR *et al.*, 1997), posteriormente adotado pela ASHRAE Standard 55 (2010), e foram realizadas simulações computacionais de termodinâmica no programa TAS (EDSL, 2015). A partir dos resultados foi possível verificar a adequação das edificações propostas para o clima local.

Em um estudo, Lamberts *et al.* (2013) utilizam a ASHRAE Standard 55 (2013) como referência para desenvolvimento de uma proposta de norma brasileira de conforto térmico. A versão final da proposta de norma é apresentada no documento. As modificações em relação à ASHRAE Standard 55 (2013) foram realizadas com o objetivo de deixar a norma mais compreensível e acessível para profissionais e outros usuários da norma.

3.2 Arquitetura bioclimática

Para que uma edificação tenha um desempenho térmico adequado para proporcionar conforto térmico a seus usuários ela pode contar com o uso de equipamentos de climatização artificial ou pode, de forma natural, fazer uso de estratégias de aquecimento e resfriamento passivos. Nesse sentido, a arquitetura bioclimática considera estratégias construtivas favoráveis ao clima para que, por meio de seus próprios elementos, seja possível satisfazer as exigências de conforto dos usuários (LAMBERTS *et al.*, 2014a).

Para determinar as estratégias passivas mais adequadas para a edificação, pode-se utilizar a Carta Bioclimática. A Carta Bioclimática de Givoni para países em desenvolvimento é considerada como a metodologia bioclimática mais adequada às condições brasileiras. A mesma é apresentada na Figura 3.1. A Carta Bioclimática é desenvolvida sobre um diagrama psicrométrico, que associa a temperatura do ar e a umidade relativa. A partir dos valores dessas variáveis para os períodos mais significativos do ano é possível determinar as soluções arquitetônicas que devem ser empregadas, por meio da identificação das zonas bioclimáticas (LAMBERTS *et al.*, 2014a).

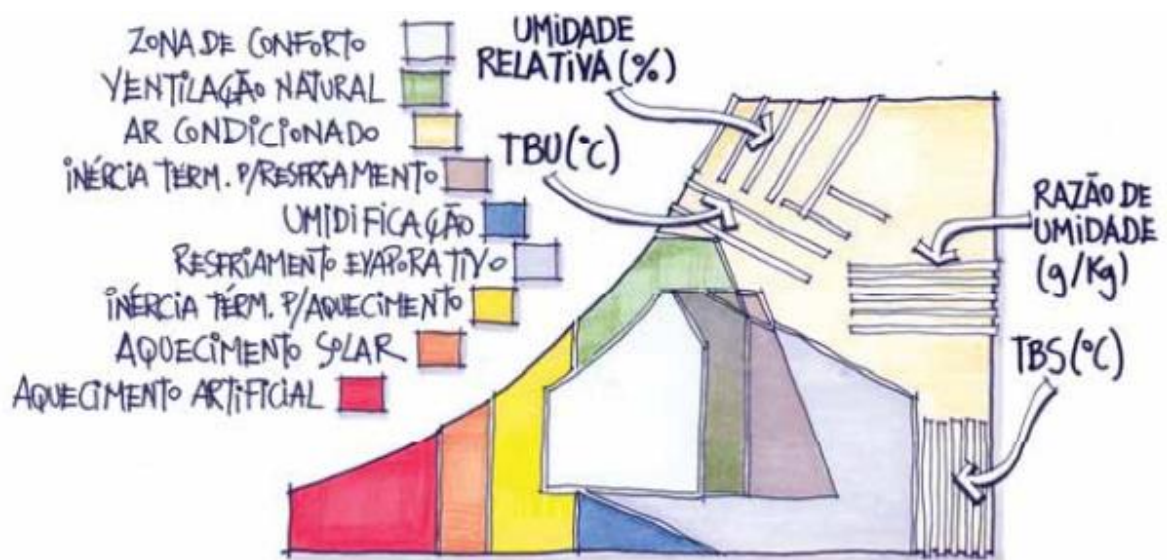


Figura 3.1 - Carta Bioclimática adotada para o Brasil

Fonte: LAMBERTS *et al.* 2014.

A zona de conforto é uma zona na qual há grande probabilidade de conforto térmico dos usuários, não sendo necessário a adoção de estratégias para ajustar as condições térmicas.

A ventilação é uma estratégia de resfriamento natural. Ela faz com que o ar do ambiente interno (mais quente) seja substituído pelo ar externo (mais frio). Para tanto é necessário recorrer a estratégias como a ventilação cruzada, ventilação da cobertura e ventilação do piso sob a edificação (LAMBERTS *et al.*, 2011). Além disso, é importante verificar a disponibilidade de vento no local.

O resfriamento evaporativo é um fenômeno que proporciona a diminuição da temperatura do ambiente a partir do aumento da umidade relativa do ar. Ele pode ser obtido utilizando-se estratégias que resultem na evaporação da água, como a presença de vegetação e fontes d'água (LAMBERTS *et al.*, 2011).

A estratégia de aquecimento e resfriamento por inércia térmica é realizada por meio do uso de materiais com alta capacidade térmica. A partir do uso desses materiais, o ganho solar que ocorre durante o dia é armazenado nos elementos construtivos da edificação, evitando o sobreaquecimento dos ambientes internos durante o dia e, somente no período da noite, quando é necessário o aquecimento, ele é transferido para o interior da edificação (PAPST, 1999).

Para possibilitar o aquecimento solar passivo da edificação, é recomendado que as superfícies envidraçadas sejam orientadas para o sol e que, nas fachadas onde não há insolação, se evite a disposição de aberturas, para que se evite perdas de calor. Outras estratégias recomendadas são a orientação adequada da edificação, o uso de cores que aumentem os ganhos de calor e o isolamento para reduzir as perdas térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2011).

De acordo com Lamberts *et al.* (2014a), o sombreamento é uma estratégia que deve ser utilizada sempre que a temperatura do ar for superior a 20°C, mesmo nos casos em que a Carta Bioclimática indicar conforto térmico, conforme Figura 3.2.

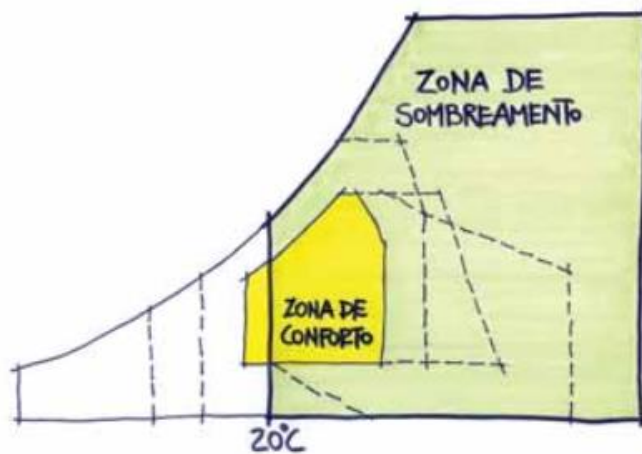


Figura 3.2 – Linha de sombreamento na Carta Bioclimática

Fonte: Lamberts *et al.*, 2014.

Para proporcionar o sombreamento da edificação, pode-se utilizar proteções solares ou brises, beiras de telhados, marquises, sacadas, persianas, venezianas, orientação adequada do projeto e uso de vegetação (LAMBERTS *et al.*, 2014a).

3.3 Normas brasileiras de desempenho térmico

Atualmente, existem no Brasil duas normas em vigor que definem níveis de desempenho térmico mínimos para edificações habitacionais: a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) e a NBR 15.575 (ABNT, 2013).

3.3.1 NBR 15.220:2005 Desempenho Térmico de Edificações

O contexto da NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) é voltado para o desempenho térmico de habitações unifamiliares de interesse social. A norma é composta por 5 partes. A primeira parte estabelece as definições, símbolos e unidades relacionados com as partes seguintes. A segunda parte descreve os métodos de cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e fator solar de elementos e componentes de edificações. A quarta e a quinta parte explicam o procedimento para determinação da resistência e da

condutividade térmica de materiais através de dois métodos distintos. A terceira parte da norma estabelece o zoneamento bioclimático brasileiro. Esse zoneamento consiste na divisão do território brasileiro em 8 zonas relativamente homogêneas quanto ao clima. Para cada uma das zonas são apresentadas recomendações de diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo. Essas recomendações têm como objetivo otimizar o desempenho térmico das edificações, a partir de uma melhor adequação climática (ABNT, 2005c).

Para elaborar o zoneamento bioclimático, o território brasileiro foi dividido em 6.500 células, cada uma caracterizada por sua posição geográfica e pelas médias mensais de temperaturas máximas e mínimas e das umidades relativas do ar. 330 células contaram com dados climáticos medidos e as demais células tiveram seu clima estipulado por meio de interpolação. Após a divisão do território em células, cada célula foi classificada a partir da aplicação de uma Carta Bioclimática adaptada da carta sugerida por Givoni (1992). Posteriormente, foi realizado um agrupamento dos conjuntos das células classificadas em um mesmo tipo, o que deu origem às zonas bioclimática (RORIZ *et al.* 1999).

A Figura 3.3 apresenta o mapa do Brasil com as divisões das zonas bioclimáticas. O percentual do território correspondente a cada zona está indicado na legenda.

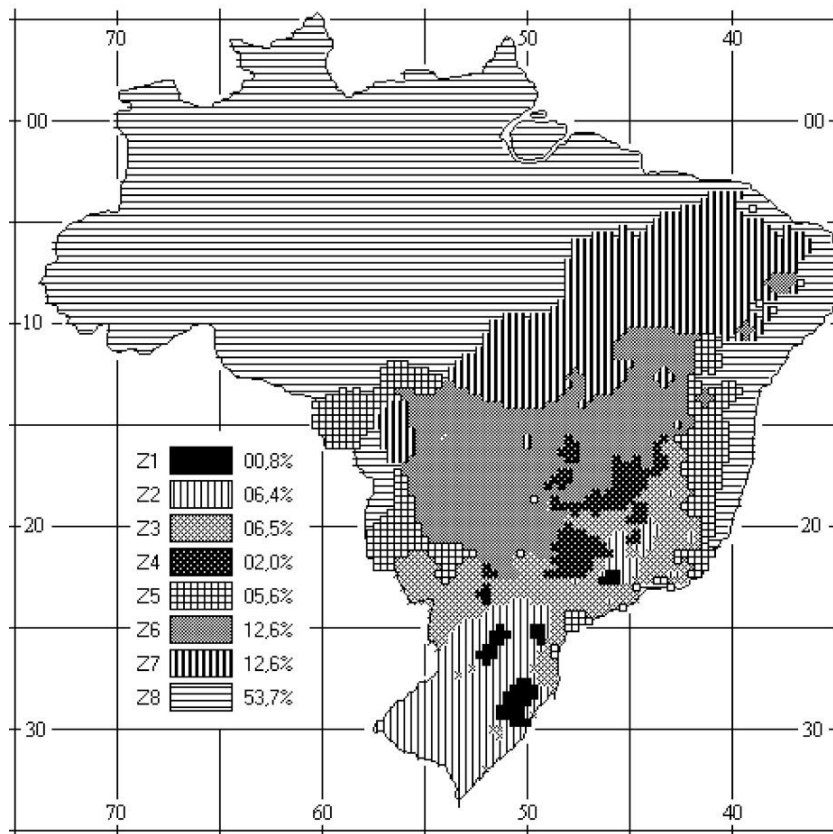


Figura 3.3 – Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: ABNT, 2005c.

As recomendações construtivas para cada zona bioclimática associam as estratégias de condicionamento térmico passivo apontadas por Givoni com limites aceitáveis de indicadores do desempenho térmico adaptados do Método de Mahoney (RORIZ *et al.* 1999). As estratégias de condicionamento térmico utilizadas pela norma são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico

Estratégia	Detalhamento
A	O uso de aquecimento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por frio.
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
D	Caracteriza a zona de conforto térmico (a baixas umidades).
E	Caracteriza a zona de conforto térmico.
F	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
G e H	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica no período de verão pode ser amenizada através da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água diretamente no ambiente que se deseja resfriar.
H e I	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.
K	O uso de resfriamento artificial será necessário para amenizar a eventual sensação de desconforto térmico por calor.
L	Nas situações em que a umidade relativa do ar for muito baixa e a temperatura do ar estiver entre 21°C e 30°C, a umidificação do ar proporcionará sensações térmicas mais agradáveis. Essa estratégia pode ser obtida através da utilização de recipientes com água e do controle da ventilação, pois esta é indesejável por eliminar o vapor proveniente de plantas e atividades domésticas.

Fonte: ABNT, 2005c.

A Figura 3.4 corresponde à Carta Bioclimática e as normais climatológicas de cidades da zona bioclimática (ZB) 3, onde está inserida a cidade de Belo Horizonte, destacando a cidade de Florianópolis, SC. Cada subdivisão da carta representada por uma letra corresponde a uma zona com estratégias construtivas.

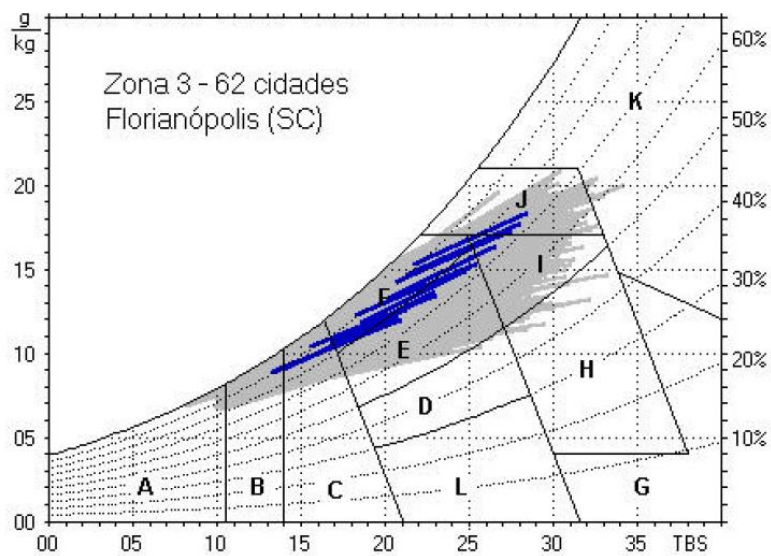


Figura 3.4 – Carta Bioclimática zona 3

Fonte: ABNT, 2005c.

Em um estudo, Pereira e Assis (2005) propuseram uma classificação bioclimática para a cidade de Belo Horizonte diferente da proposta pela norma NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Para esse estudo foi gerado um arquivo digital do ano climático de referência (TRY) a partir da obtenção e do tratamento de dados climáticos da cidade, fornecidos pela Estação Meteorológica Padrão de Minas Gerais – 5º Distrito de Meteorologia. Os dados considerados foram do ano de 1986 até o ano de 2000. O ano de referência encontrado foi o de 1995.

Pereira e Assis (2005) observaram que para a classificação das zonas bioclimáticas das cidades do território brasileiro, a NBR 15.220 (ABNT, 2005c) utilizou dados mensais de temperatura e umidade do ar extraídos das Normais Climatológicas (1961/2000) inseridos no diagrama adaptado de Givoni, conforme a Figura 3.5.

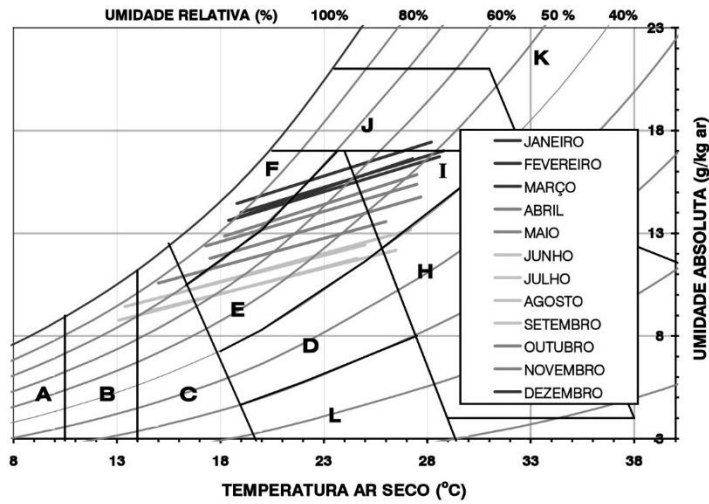


Figura 3.5 – Diagrama bioclimático sobre o qual foram plotados os dias médios mensais de Belo Horizonte

Fonte: Pereira, 2004 *apud* Pereira e Assis, 2005.

Para verificar a classificação bioclimática de acordo com o arquivo gerado, Pereira e Assis (2005) utilizaram a metodologia adotada pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Foram plotados pares psicométricos de temperatura de ar seco e umidade absoluta, para todas horas do ano, sobre o diagrama bioclimático adaptado de Givoni. Os diagramas resultantes podem ser vistos na Figura 3.6, período de verão, e Figura 3.7, período de inverno.

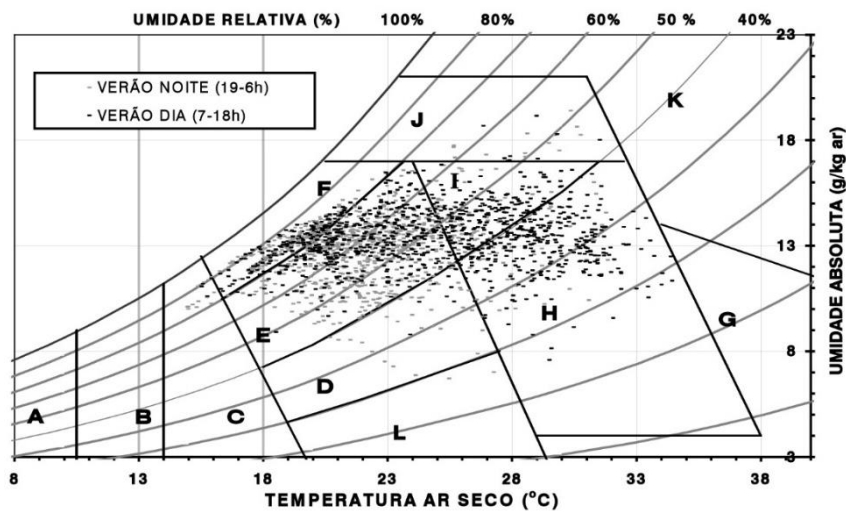


Figura 3.6 – Diagrama Bioclimático sobre o qual foram plotados os dados horários medidos do ano de 1995 para Belo Horizonte. Período: Verão.

Fonte: Pereira, 2004 *apud* Pereira e Assis, 2005.

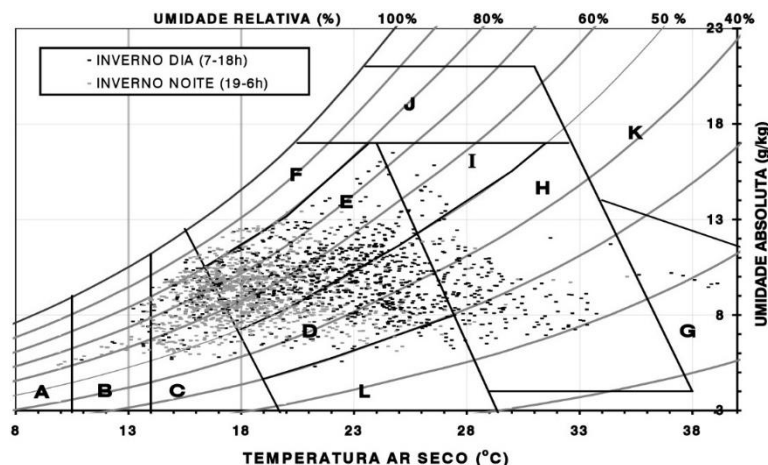


Figura 3.7 – Diagrama Bioclimático sobre o qual foram plotados os dados horários medidos do ano de 1995 para Belo Horizonte. Período: Inverno.

Fonte: Pereira, 2004 *apud* Pereira e Assis, 2005.

Os valores percentuais dos pares plotados em cada zona da carta bioclimática, a partir dos dados do arquivo TRY desenvolvido por Pereira e Assis (2005), são apresentados na Tabela 3.2. As porcentagens referentes aos dados das Normais Climatológicas também podem ser observadas nessa mesma tabela. A Tabela 3.3 apresenta a provável sensação térmica experimentada a cada hora do dia em porcentagem, para os dois casos.

Tabela 3.2 - Frequência de ocorrência dos pares psicrométricos em cada Zonas Bioclimática

ZONA	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
TRY (1995)	0,06%	2,60%	8,70%	7,30%	47,70%	15,80%	0,08%	7,60%	9,30%	0,77%	0,15%
NORMAIS (61-90)	0,00%	8,33%	5,56%	0,00%	38,89%	22,22%	0,00%	0,00%	13,89%	5,56%	0,00%

Fonte: Pereira, 2004 *apud* Pereira e Assis, 2005.

Tabela 3.3 - Valores percentuais da sensação térmica experimentada

Sensação Térmica	Frio	Conforto	Calor	Úmido	Seco
Zonas	(A+B+C)	(D+E)	(I+J+G+H)	(F+J)	(G+H+L)
TRY (1995)	11,3%	55,0%	17,7%	17,0%	8,0%
NORMAIS (61-90)	13,9%	38,9%	25,0%	27,8%	0,0%

Fonte: Pereira, 2004 *apud* Pereira e Assis, 2005.

Pereira e Assis (2005) observaram que:

- os dados do arquivo TRY apresentam um percentual maior de horas de conforto térmico em relação aos dados das normais, onde há uma maior ocorrência de desconforto térmico por frio e calor;
- os dados do verão gerados a partir o arquivo TRY representam um clima menos úmido em relação ao obtido pelas normais climatológicas, chegando a ocorrer grande número de pontos nas zonas H e D, zonas de baixa umidade do ar;
- há uma maior frequência de pares plotados nas zonas I e J nos dados das Normais, em comparação aos dados do arquivo TRY;
- o período de inverno apresenta-se muito mais seco no arquivo TRY que o observado nos dados gerados pelas Normais. A baixa umidade do ar justifica a maior amplitude térmica que há nos dados do arquivo TRY, onde pode-se observar a ocorrência de dias quentes e secos e de noites mais úmidas, por vezes frias.

A partir dos resultados, Pereira e Assis (2005) verificaram que a zona bioclimática que apresenta as recomendações mais próximas das extraídas pela avaliação do Ano Climático de Referência é a zona bioclimática 4. A NBR 15.220 (ABNT, 2005c) coloca Belo Horizonte na zona bioclimática 3, mesma zona das cidades de Florianópolis e Santos, cidades litorâneas, enquanto que o estudo a coloca mais próxima da cidade de Brasília, cidade de clima continental no domínio do semiárido.

De acordo com Roriz (2012b), existe um grande número de críticas em relação à imprecisão na caracterização climática de cidades no zoneamento bioclimático NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Isso acontece porque para elaborar o zoneamento vigente foram utilizadas Normais Climatológicas de pouco mais de 300 municípios, sendo os dados climáticos de todo o resto do território nacional obtidos por interpolação, o que agregou elevados níveis de incerteza ao mapa resultante. Assim, o procedimento utilizado resultou em um número de zonas bioclimáticas insuficientes para refletir a diversidade climática brasileira (zonas com baixa homogeneidade). Por esse motivo, Roriz (2012b, 2012c, 2014) elaborou propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro.

Na primeira proposta de Roriz (2012b) foram obtidos dados climáticos de 610 municípios, que correspondem 11% dos 5564 municípios existentes no Brasil. Para os municípios sem dados disponíveis, os dados climáticos foram estimados por meio de regressões utilizando os dados dos 610 municípios como base. Para os pontos do país situados fora das sedes municipais, os dados foram obtidos por interpolação dos dados de temperaturas médias e mínimas de todos os pontos representantes das sedes municipais. Como critérios para definição das zonas bioclimáticas adotou-se quatro parâmetros para classificar os climas: média anual da temperatura do ar, diferença entre a maior e a menor temperatura média mensal, média anual da amplitude térmica e diferença entre a maior e a menor amplitude térmica mensal. Cada um desses parâmetros foi dividido em intervalos, com limites definidos a partir de análise dos dados climáticos dos 610 municípios. A aplicação desse critério resultou em 20 zonas bioclimáticas.

Roriz (2012c) publicou uma segunda proposta de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro. Nesta foram consideradas críticas e sugestões de pesquisadores em relação à primeira proposta. A base de dados climáticos utilizada ampliou para dados de 1281 lugares do território nacional, não necessariamente só de sedes municipais. Adotou-se uma malha com resolução de 18 pixels por grau de latitude e longitude e, para os pontos sem dados medidos dentro da malha, as temperaturas foram estimadas a partir de dados medidos por satélite a cada grau de latitude e longitude. Para os pontos restantes, os dados climáticos foram obtidos por interpolação. Essa proposta também contou com a compatibilização entre os dados medidos em diferentes períodos. Para definição das zonas bioclimáticas foram aplicados dois parâmetros. O primeiro é proporcional ao total anual de graus-horas de calor e o segundo proporcional ao total anual de graus-hora de frio. Para definição desses parâmetros considerou-se os intervalos da zona de conforto da Carta Bioclimática proposta por Givoni (1992) para países em desenvolvimento (18°C a 28°C). A partir dos resultados, foram definidas 16 zonas bioclimáticas.

Uma nova proposta para o zoneamento foi publicada por Roriz (2014). Nesta, a fonte de dados foi ampliada. A proposta adotou como parâmetros para classificação dos climas as médias anuais de temperatura e as amplitudes (semelhante aos parâmetros da primeira

proposta). Foram incluídos, no entanto, os desvios-padrão de Tmed (média mensal das temperaturas médias diárias) e de Amp (amplitude média mensal). A classificação do clima resultou em um número de 24 grupos de zonas bioclimáticas. A última atualização dessa proposta foi em março de 2014. O resultado dos grupos climáticos encontrados pode ser visto na Figura 3.8, Figura 3.9 e Figura 3.10. O estudo ainda prevê que em sua próxima etapa poderão ser definidos Zoneamentos Bioclimáticos específicos para tipologias construtivas com diferentes usos (habitação, comércio, indústria, etc) e apontadas estratégias construtivas para cada tipologia.

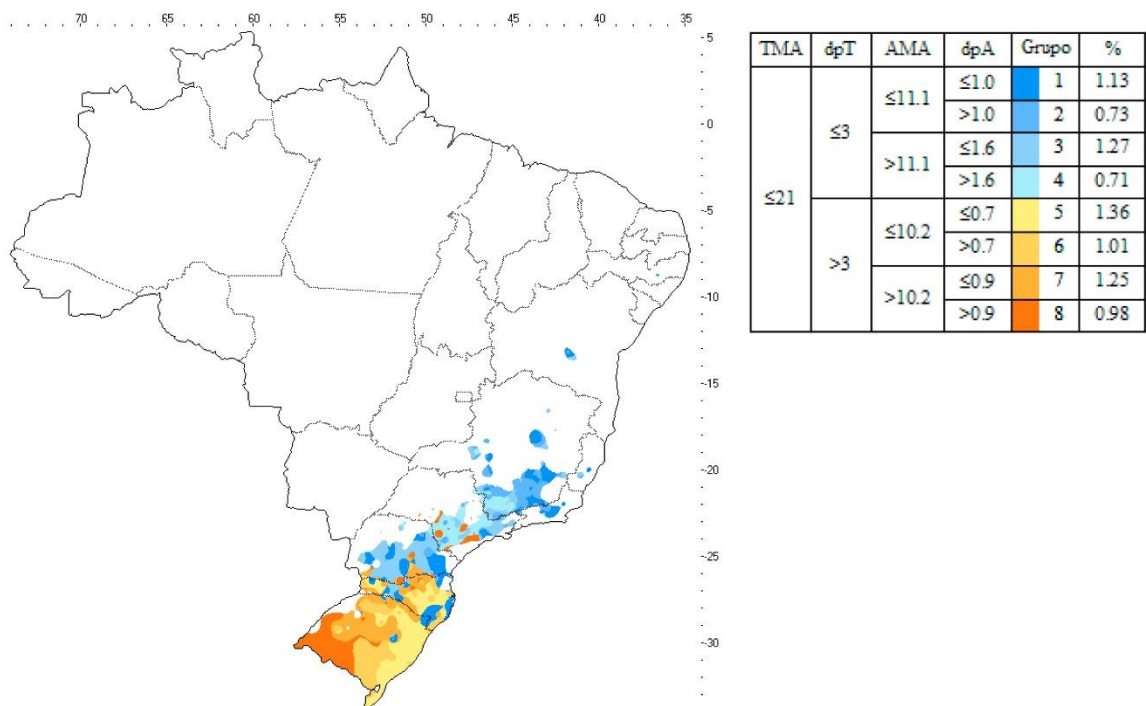
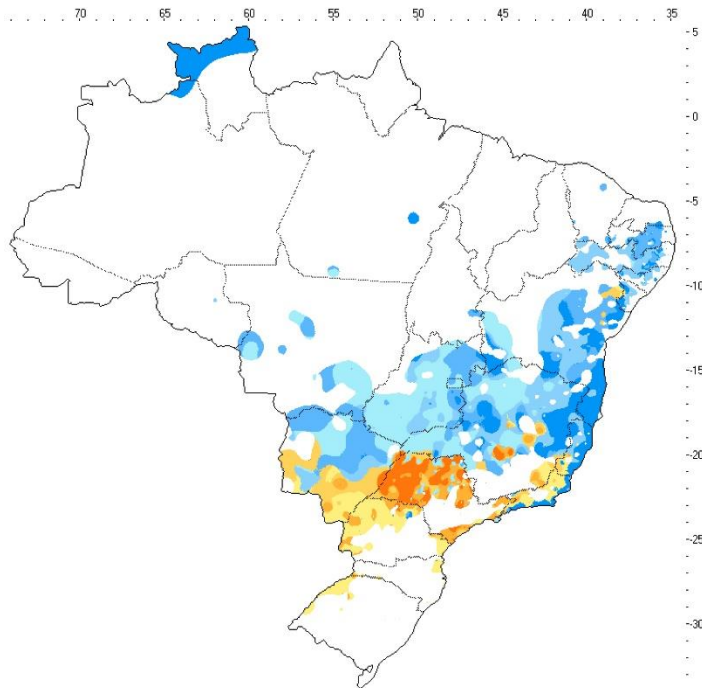


Figura 3.8 – Grupos Climáticos de 1 a 8

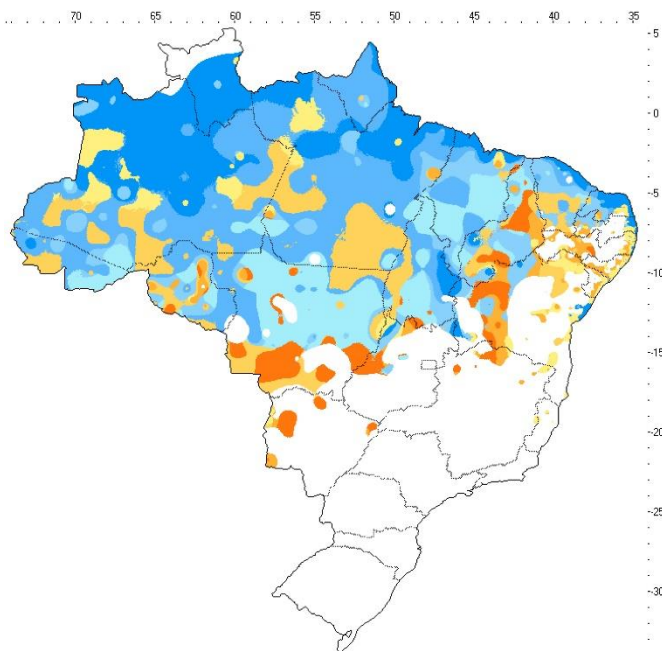
Fonte: Roriz, 2014.



TMA	dpT	AMA	dpA	Grupo	%	
>21	≤2.1	≤10.6	≤1.0	9	3.97	
			>1.0	10	4.33	
		>10.6	≤1.4	11	4.55	
			>1.4	12	5.60	
	≤25	>2.1	≤11.9	≤1.1	13	2.08
				>1.1	14	1.69
>11.9			≤2.1	15	1.27	
		>2.1	16	1.09		

Figura 3.9 – Grupos climáticos de 9 a 16

Fonte: Roriz, 2014.



TMA	dpT	AMA	dpA	Grupo	%	
>25	≤1.1	≤9.6	≤1.0	17	13.45	
			>1.0	18	18.88	
		>9.6	≤1.8	19	6.73	
			>1.8	20	8.69	
	>1.1	≤10.7	≤1.2	21	3.64	
			>1.2	22	9.00	
		>10.7	≤1.6	≤1.6	23	2.15
				>1.6	24	3.44

Figura 3.10 – Grupos climáticos 17 a 24

Fonte: Roriz, 2014.

Desde sua publicação, vários trabalhos científicos vem utilizando o método descrito na NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para avaliar o desempenho térmico de edificações habitacionais de interesse social e para verificar os parâmetros estabelecidos pela norma.

Menezes (2006) avaliou o desempenho térmico de cinco habitações de interesse social em Passo Fundo – RS, zona bioclimática 2, segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Também realizou medições *in loco* da temperatura e umidade no interior e exterior das edificações e simulações das mesmas no programa *EnergyPlus* (DOE, 2013). O conforto térmico foi verificado segundo a metodologia de avaliação por desempenho, proposta por Barbosa (1997). Nessa metodologia, a quantidade de horas anuais fora da zona de conforto, temperaturas entre 18°C a 29°C, deve ser menor que mil horas, para que a edificação tenha um desempenho térmico aceitável. Os resultados mostraram que as edificações não atenderam a todas as recomendações da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) e que também demonstraram não ser confortáveis termicamente. Foi identificado que o período de desconforto por frio é maior que o desconforto por calor. Para melhorar o desempenho das edificações, o autor recomendou o aumento da inércia térmica, junto de outras estratégias de condicionamento térmico passivo.

Grigoletti *et al.* (2009) verificaram o desempenho de três edificações de interesse social unifamiliares em Santa Maria – RS, zona bioclimática 2, através de três métodos diferentes: verificação dos requisitos da NBR 15.220 (ABNT, 2005c), medições *in loco* e opinião dos usuários. Os resultados mostraram que as edificações não apresentam desempenho térmico satisfatório segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005c). As medições indicaram que a temperatura interna das habitações ultrapassou os valores estabelecidos para países em desenvolvimento definidos por Givoni (1992), tanto para a temperatura mais alta quanto a mais baixa, alcançando percentagem de 83,4 a 88,8 de horas de conforto, com predominância de desconforto por frio. Nos questionários verificou-se que cerca de 97% dos moradores acham a temperatura no interior da habitação alta durante o verão e 67% acham esta fria no inverno. As três análises confirmaram que a edificação possui um desempenho térmico insatisfatório.

Curcio (2011) avaliou o desempenho térmico de quatro habitações de interesse social na cidade de Pelotas – RS, zona bioclimática 2, segundo as normas NBR 15.220 (ABNT, 2005c) e NBR 15.575 (ABNT, 2008). Também verificou o conforto térmico utilizando a carta bioclimática de Givoni (1992). Na avaliação pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) verificou-se que nenhuma edificação atendeu a todas as recomendações da norma. Na verificação dos requisitos da NBR 15.575 (ABNT, 2008), constatou-se que apenas duas edificações atenderam ao exigido no método simplificado e três edificações atenderam ao desempenho mínimo na avaliação por medição. Na avaliação de conforto das edificações, no verão, verificou-se uma percentagem de 56,70 a 82,86 de horas de conforto, com predominância de desconforto por calor. No inverno os resultados foram de 10,50% a 46,42% de horas de conforto, com predominância de desconforto por frio.

Matos (2007), em uma avaliação do desempenho térmico de residências em Florianópolis, zona bioclimática 3, chegou à conclusão que o intervalo determinado pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para área de abertura para ventilação natural não foi adequado para o tipo de residência analisado, uma vez que áreas de abertura de 20% e 25% apresentaram resultados iguais ou piores à área de abertura de 15%. Os limites de atraso térmico estabelecidos pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) também não se justificaram, já que paredes muito com inércia térmica baixa tiveram desempenho inferior ao de paredes simuladas com inércia térmica alta. O fator solar estabelecido pela norma não limitou a absorvância das coberturas simuladas, e foi observado que a limitação da absorvância das coberturas é uma estratégia importante para melhorar o desempenho das residências.

Oliveira *et al.* (2014) analisaram os valores limites de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar recomendados pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para fechamentos verticais para a zona bioclimática 2. Foram realizadas simulações de edificações com diversas configurações de envelope e essas foram comparadas com um caso base, que contou com fechamentos horizontais e verticais definidos a partir dos limites das propriedades térmicas indicadas pela norma. As configurações utilizadas contaram com transmitâncias térmicas de 1,00 W/(m².K) a 5,00 W/(m².K), atrasos térmicos de 1 a 11 horas e absorvâncias de 20%, 50% e 70%. O tratamento dos dados foi realizado por meio de uma análise comparativa da

porcentagem de horas de conforto de cada modelo, considerando a zona de conforto adaptada de Givoni (1992), utilizando-se o programa computacional *Analysis Bio* (2010). O caso base obteve 71,70% de horas de conforto. As outras configurações conseguiram até 80,40% de horas de conforto (melhor resultado na configuração com $U=1 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, absorvância de 0,70 e atraso térmico de 11 horas). Os resultados obtidos mostraram que não se justificam os limites estabelecidos pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para atraso térmico, de 4,3 horas, e fator solar, de 5%. Tanto o aumento do atraso térmico quanto da absorvância solar foram benéficos para o conforto térmico da edificação, onde predominaram situações de desconforto no inverno.

3.3.2 NBR 15.575:2013 Edificações Habitacionais – Desempenho

A primeira versão da NBR 15.575 foi publicada em 2008 (ABNT, 2008) e entrou em vigor em maio de 2012, estabelecendo requisitos e critérios de desempenho para edificações habitacionais e seus sistemas com base em requisitos do usuário de segurança (segurança estrutural, contra fogo, no uso e na operação), habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico, acústico e lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade, acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico) e sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental). Uma revisão da norma foi solicitada pelo setor de construção civil em 2012. Em fevereiro de 2013 foi publicada sua versão final, que entrou em vigor em julho de 2013.

Existem algumas críticas em relação aos procedimentos para determinação do desempenho térmico da NBR 15.575 (ABNT, 2013). De acordo com Roriz (2012b), o zoneamento bioclimático descrito na NBR 15.220 (ABNT, 2005c) foi proposto especificamente para Habitações Unifamiliares de Interesse Social. Sua aplicação para qualquer tipo de edificação habitacional, como é feito pela NBR 15.575 (ABNT, 2013), não é adequada.

Sorgato *et al.* (2013), levantaram algumas questões sobre o método de avaliação do desempenho térmico por simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2013):

- as tabelas referentes aos dados de dias típicos de inverno e verão não apresentam opções para todas as zonas bioclimáticas brasileiras (para as zonas 2 e 5 a norma não apresenta uma cidade com os dados necessários para avaliar o desempenho térmico);
- a norma não apresenta o método para calcular o dia típico de projeto. Isso pode inviabilizar a avaliação de desempenho das cidades que não possuem correspondência na tabela ou gerar confusão, já que, como não existe um método padrão, cada simulador pode adotar um método diferente para definir o dia típico em questão;
- as informações presentes nas tabelas da norma referentes aos dias típicos de projeto não são suficientes para a realização da simulação computacional no programa *EnergyPlus* (recomendado pela norma). Para a simulação são necessárias as seguintes informações: data, temperatura de bulbo seco, amplitude da temperatura de bulbo seco, uma condição de umidade (temperatura de bulbo úmido ou temperatura de ponto de orvalho ou umidade relativa ou entalpia) no pico da temperatura de bulbo seco, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e especificar o modelo solar (tipo de céu) ou dados horários de radiação direta e difusa. As tabelas da norma não contêm as informações referentes à data, velocidade e direção dos ventos e tipo de céu para simular um dia de projeto;
- a não definição da data de referência do dia típico impossibilita que se estime com precisão os valores de irradiância solar nos diferentes componentes externos da edificação. Isso pode causar resultados diferentes, pois, para cada dia definido para gerar a simulação, a declinação solar será distinta;
- as tabelas da norma referentes aos dias típicos de projeto informam um valor de radiação solar, contudo a norma não especifica qual tipo de radiação solar que ela se refere (global horizontal, direta normal ou difusa). Isso faz com que o simulador tenha que deduzir como utilizar essas informações, tornando o processo impreciso. Além disso, a norma apresenta valores de nebulosidade em décimos, o que torna necessário interpretações e deduções do simulador para levar essa informação em conta. A informação que deveria ser passada pela norma para a simulação no programa *EnergyPlus* (recomendado pela norma) é o tipo de céu. Sem essa

informação, cada simulação pode ser realizada de uma maneira diferente e não há padronização no resultado;

- a norma não deixa claro se para a simulação do dia típico de inverno deve-se colocar as cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) ou não. A não padronização desse fator pode gerar resultados diferentes pois alguns dados de entrada dependem da interpretação do simulador.

Sorgato *et al.* (2014) realizaram um estudo onde foi verificado o desempenho térmico de uma residência unifamiliar pelo método de simulação da NBR 15.575 (ABNT, 2013). No procedimento de simulação a norma não apresenta uma definição em relação à condição do piso da edificação. Por esse motivo, optou-se por analisar diferentes condições do piso da edificação em contato com o solo. As condições de contato com o solo utilizadas foram: temperatura do solo do arquivo climático, temperatura do solo do arquivo climático +2°C, temperatura do solo do arquivo climático -2°C e piso adiabático. Os resultados das simulações mostraram que as condições do piso da edificação impactaram de forma significativa no desempenho térmico da residência. Verificou-se que, dependendo da condição de piso adotada, a edificação pode ser aprovada ou reprovada pela norma. Concluiu-se que a NBR 15.575 (ABNT, 2013) deveria definir a condição do piso da edificação a ser empregada na simulação, para que todos os casos fossem avaliados com o mesmo critério. Outra questão levantada foi o fato do procedimento de simulação da NBR 15.575 (ABNT, 2013) não considerar outros parâmetros importantes que influenciam no desempenho térmico das edificações como cargas térmicas internas e ventilação natural. Evidenciou-se a necessidade de melhorar o atual procedimento de simulação da norma para avaliar as edificações levando em conta a realidade de uso, como os hábitos e preferências culturais da população de cada região do território brasileiro.

Nesse mesmo estudo, Sorgato *et al.* (2014) observaram a influência dos parâmetros sombreamento e renovação de ar com base no procedimento simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2013). Foram considerados três casos distintos com sistemas de vedação e cobertura que atendem aos requisitos da norma no procedimento simplificado, variando as condições de contato com o solo, parâmetro de sombreamento e taxa de renovação do ar. Os resultados

alcançados mostraram que nem todos os casos atenderam ao desempenho térmico mínimo quando avaliados pelo procedimento de simulação. Nesse sentido, foi possível constatar que os procedimentos de avaliação de desempenho térmico mínimo da NBR 15.575 (ABNT, 2013) nem sempre apresentam equivalência. O estudo apontou para a necessidade de um procedimento simplificado mais preciso e eficiente.

Sorgato *et al.* (2013) analisaram o desempenho térmico de uma edificação residencial unifamiliar segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013). O desempenho foi avaliado para a cidade de Florianópolis – SC. Na simulação do dia típico de verão foram avaliados três tipos de céu: 100% de céu limpo, 70% de céu limpo e 30% de céu limpo. A diferença do resultado entre a configuração de 100% e a de 30% foi de 4,1°C, o que mostrou a importância da definição desse parâmetro nas tabelas de dias típicos da NBR 15.575 (ABNT, 2013). Concluiu-se que a influência do parâmetro do tipo de céu no dia típico de verão é maior do que no dia típico de inverno, devido a temperatura mínima ocorrer no período de madrugada. O estudo também verificou a influência da escolha da data para a avaliação do dia típico de verão. Os resultados mostraram que o desempenho da edificação pode ser diferente (aprovado ou não pela norma) dependendo de como o simulador configura a data do dia típico. Na avaliação do desempenho da edificação no dia típico de inverno foram simulados dois casos, com cargas internas (de ocupação e iluminação) e sem cargas internas. A simulação com cargas internas apresentou uma temperatura interna mínima 0,70°C maior que a temperatura da simulação sem cargas internas. Verificou-se que a taxa de ventilação de 1 ren/h, definida pela norma, prejudica o desempenho da edificação no dia típico de inverno e subestima a ventilação natural no dia típico de verão. Concluiu-se que a avaliação de desempenho térmico deveria ser realizada pela avaliação anual da edificação, e não por meio apenas dos dias típicos e que a edificação deveria ser avaliada considerando sua realidade de uso (cargas internas e estratégia de ventilação natural).

Loura, Assis e Bastos (2011) realizaram um estudo onde foi realizada uma comparação entre os resultados do desempenho térmico da envoltória de um edifício residencial, localizado no Rio de Janeiro, ZB8, gerados pelo método simplificado da norma NBR 15.575 (ABNT, 2008) e pelo método prescritivo do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de

Eficiência Energética de Edificações Residenciais - RTQ-R (INMETRO, 2010). Os resultados apresentados foram contraditórios. A edificação não atendeu a classificação mínima na NBR 15.575 (ABNT, 2008), no entanto, obteve um nível de desempenho B no RTQ-R (INMETRO, 2010) em uma escala que vai de A (mais eficiente) a E (menos eficiente), ou seja, um desempenho adequado. Nesse sentido, o estudo recomendou a revisão da NBR 15.575 (ABNT, 2008) para superar questões como essa.

Silva e Ghisi (2014) realizaram uma análise comparativa entre o desempenho térmico da envoltória de uma edificação pelo método de simulação da NBR 15.575 (ABNT, 2013) e o método de simulação utilizado no RTQ-R (INMETRO, 2010). A tipologia adotada para análise foi uma habitação de interesse social unifamiliar. As análises foram desenvolvidas para a cidade de Florianópolis – SC, zona bioclimática 3, utilizando-se o programa *EnergyPlus* (DOE, 2013). As cargas internas e rotinas de uso e ocupação foram consideradas conforme exigência dos métodos adotados. Variou-se as propriedades térmicas da envoltória da edificação (transmitância térmica, capacidade térmica e absorvância solar das paredes e cobertura e transmitância térmica dos vidros). Também foram consideradas variações da área útil para ventilação dos ambientes e da orientação da edificação. Notou-se que, dependendo do cenário da análise, os métodos podem produzir resultados equivalentes ou não. O estudo também apontou para a necessidade de se estudarem as configurações da NBR 15.575 (ABNT, 2013) que se apresentam subjetivas para dia típico de projeto, como radiação solar direta, dias do ano considerados como típicos de projeto de verão e inverno e tipo de céu.

Batista *et al.* (2014) também avaliaram o desempenho térmico de um estudo de caso com o objetivo de confrontar as abordagens de avaliação propostas pelo procedimento por simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2013) e pelo RTQ-R (INMETRO, 2010). Para tanto, foram realizadas simulações computacionais com o programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) para avaliar uma edificação habitacional multifamiliar de interesse social, localizada na cidade de Maceió – AL. Os resultados mostraram que unidades que obtiveram uma classificação segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013) com níveis “intermediário” ou “superior” conseguiram um nível E na avaliação do RTQ-R (INMETRO, 2010), a classificação mais baixa do regulamento. Concluiu-se que o procedimento de simulação da

NBR 15.575 (ABNT, 2013) apresenta limitações importantes, uma vez que é restrito ao dia típico e adota uma taxa de ventilação fixa, mesmo nas cidades onde a ventilação natural é a principal estratégia bioclimática recomendada.

Oliveira, Souza e Silva (2013) realizaram um estudo comparativo entre parâmetros prescritivos das normas NBR 15.220 (ABNT, 2005), NBR 15.575 (ABNT, 2013) e outros regulamentos nacionais vigentes. Concluiu-se que existe divergência entre os mesmos.

Brito *et al.* (2012) realizaram avaliações de desempenho térmico de um sobrado localizado na cidade de Belém – PA, zona bioclimática 8. A edificação foi avaliada segundo a norma de desempenho NBR 15.575 (ABNT, 2010), pelo procedimento simplificado e por simulação computacional. Foram analisados vinte e um sistemas construtivos com diferentes características e valores de transmitância e capacidade térmica distintos. Os resultados mostraram inconsistências entre os métodos, já que vários sistemas construtivos que atenderam ao nível mínimo segundo o método simplificado não alcançaram um desempenho mínimo na avaliação pelo procedimento de simulação computacional. Concluiu-se que os critérios do procedimento simplificado da norma devem ser aprimorados.

Sorgato *et al.* (2012) avaliaram a NBR 15.575 (ABNT, 2013) e verificaram que o método de simulação proposto pela norma não permite uma análise anual adequada do desempenho térmico das edificações. A norma não avalia o funcionamento real da edificação (cargas internas, ventilação e uso de estratégias bioclimáticas), assim como não avalia a influência da variação anual da temperatura no desempenho térmico da edificação.

Ferreira e Pereira (2012) apresentaram uma avaliação do desempenho térmico de uma edificação habitacional de interesse social em diferentes cidades brasileiras, considerando os materiais empregados recorrentemente nesse tipo de edificação, para verificar o atendimento do desempenho estabelecido pela NBR 15.575 (ABNT, 2008). O método empregado para avaliação foi o de simulação computacional e o programa utilizado para realizar as simulações foi o *EnergyPlus* (DOE, 2013). Foram selecionadas oito cidades brasileiras, uma para cada zona bioclimática definida na NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Os sistemas

construtivos avaliados foram: paredes de concreto com 10 e 12 cm de espessura e paredes de alvenaria de 9 cm de espessura. Todas as opções foram avaliadas com laje de concreto de 10 cm e telha de fibrocimento. Os resultados mostraram que os sistemas construtivos em concreto (espessuras de 10 e 12 cm) obtiveram um desempenho satisfatório apenas nas zonas climáticas de climas amenos e quentes (zonas de 1 a 6). Nas zonas de climas extremos quentes, zonas 7 e 8, apenas o sistema construtivo de alvenaria obteve um desempenho dentro do mínimo. No entanto, o estudo ressalta que as temperaturas obtidas nas condições extremas de frio ou calor, consideradas como temperaturas satisfatórias em uma mesma cidade, foram extremas, por exemplo 33,1°C e 8,7°C. Nenhum dos índices normalmente utilizados permite uma faixa de temperatura tão ampla ser considerada como conforto. Para mais precisão, seria necessário adotar um índice de conforto adaptativo para fazer tal análise.

Em um segundo estudo, Pereira e Ferreira (2014) avaliaram o desempenho térmico de uma edificação residencial multifamiliar, em conformidade com as características atuais do mercado imobiliário brasileiro, frente a NBR 15.575 (ABNT, 2008) e compararam os resultados com uma avaliação de conforto segundo a ASHRAE Standard 55 (2010). Foram selecionadas oito cidades brasileiras para análise, uma para cada zona bioclimática. Utilizou-se o método de simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2008) e o programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) para realizar a análise. Os resultados mostraram que a habitação atende aos requisitos do método de simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2008) para todas as cidades analisadas. No entanto, mesmo quando a edificação apresenta desempenho superior na NBR 15.575 (ABNT, 2008), foram observados longos períodos de desconforto na avaliação segundo a ASHRAE Standard 55 (2010). Considerando-se os limites de aceitabilidade de 80%, a média de horas de conforto térmico encontrada ficou entre 60 e 70% das horas, em todas as cidades, com exceção das cidades das zonas 5 e 6. Concluiu-se que essa incoerência deve decorrer da metodologia utilizada, que considera a simulação do dia típico. De acordo com o estudo, o manual do programa *EnergyPlus* informa que as simulações com dia de projeto (a simulação do dia típico, como é feito na norma) são simplificadas e não devem ser utilizadas para avaliação do desempenho da edificação. Ressaltam que nem todos os parâmetros para realizar a simulação de um dia típico estão

descritos na norma e que isso permite que o simulador defina os dados faltantes de acordo com seu critério.

Trindade *et al.* (2012) realizaram um estudo onde o desempenho térmico de uma habitação unifamiliar com sistema estrutural composto por pórticos de estabilizações bidirecionais foi verificado, segundo o método de simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2008). A cobertura da edificação analisada é composta por telha termo-acústica, tipo sanduíche e os forros são constituídos por painéis OSB. O fechamento vertical é um sistema multicamada composto por duas placas cimentícias intermediadas por lã de vidro, nas paredes externas, e por duas placas de gesso acartonado com preenchimento de lã de vidro, nas paredes internas. A simulação foi realizada para uma cidade representativa de cada uma das oito zonas bioclimática do zoneamento brasileiro da NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Variou-se a absorvância a radiação solar das paredes externas (0,30 / 0,50 / 0,70), as condições de ventilação (1 ren/h e 5 ren/h) e de sombreamento (sem sombreamento e com proteção solar que reduza 50% a incidência da radiação solar global no ambiente). Os resultados mostraram que a edificação com ventilação de 1 ren/h apresentou desempenho térmico mínimo, no período de inverno, independente da absorvância das paredes externas. No período de verão, a edificação que apresentou desempenho satisfatório foi apenas a com paredes externas de absorvância baixa (0,30), sombreamento e taxa de ventilação de 5 ren/hora.

3.4 Simulação computacional termo-energética

Enquanto os métodos de avaliação simplificados/prescritivos são normalmente mono-disciplinares e restritos em escopo, a simulação é uma ferramenta multidisciplinar e mais abrangente (HENSEN e LAMBERTS, 2011). Ela permite uma avaliação integrada das opções de projeto, sob condições de operação realísticas e dá aos projetistas a oportunidade de visualizar antecipadamente o desempenho dos sistemas e tomar decisões criteriosas para melhorá-lo (CLARKE, 2001). No entanto, a simulação computacional é uma ferramenta complexa, que requer conhecimento multidisciplinar.

Utilizando os programas de simulação computacional é possível avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diversas alternativas de projeto, variando o desenho arquitetônico, sistemas de iluminação, sistemas de ar condicionado ou componentes construtivos. É possível estimar previamente à construção da edificação o consumo energético, o custo final e o impacto ambiental provocado pela alternativa de projeto (MENDES *et al.*, 2005).

O programa *EnergyPlus* (DOE, 2013), programa gratuito desenvolvido e disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, é um dos mais utilizados para realização de análises termo-energéticas. Ele tem sua origem nos programas *Building Loads Analysis and System Thermodynamics* (BLAST) e DOE-2. Foi concebido com a finalidade principal de estimar trocas térmicas, níveis de iluminação e consumo energético de edificações, a partir de uma modelagem física do edifício e de seus sistemas de ventilação, iluminação, aquecimento e resfriamento. Nas versões mais atuais ainda é possível adicionar ventilação natural, índices de conforto térmico, sistemas fotovoltaicos, entre outros (LAMBERTS *et al.*, 2010).

O programa é, em primeiro lugar, um gerenciador de simulação, ou seja, não existe uma interface formal para o usuário. No entanto, é permitido o uso de outras interfaces desenvolvidas por uma terceira parte. O programa realiza simulações a partir da entrada de um arquivo climático com dados horários e de um arquivo com a descrição do edifício inserida pelo usuário. A simulação ocorre de forma integrada. As cargas calculadas por uma ferramenta de balanço térmico em um intervalo de tempo determinado pelo usuário são repassadas para o módulo de simulação dos sistemas da edificação durante o mesmo intervalo de tempo. Este, por sua vez, calcula a resposta dos sistemas de aquecimento e refrigeração e sistema elétrico, com um intervalo variável (de até segundos). Após o cálculo há um feedback para a ferramenta de balanço térmico e vice versa (DOE, 2013). Os resultados obtidos são uma série de dados calculados, como temperaturas internas, temperaturas superficiais, ganhos internos de calor, consumo energético, trocas de ar, etc.

O *EnergyPlus* atende aos testes exigidos pela *American National Standards Institute* (ANSI) /ASHRAE 140 *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs* e ao *Building Energy Simulation Test* (BESTEST) desenvolvido pela *International Energy Agency* (IEA) (DOE, 2013).

4. MÉTODO

Este trabalho se desenvolve em quatro etapas. Primeiramente é realizada uma caracterização do clima de Belo Horizonte. Em seguida, é apresentado o projeto da edificação de estudo, uma residência de interesse social. Na terceira etapa, é realizada uma avaliação da edificação de acordo com a norma de desempenho de edificações habitacionais de interesse social NBR 15.220 (ABNT, 2005c). Nessa avaliação são analisadas a edificação real, uma adequação da edificação para atender aos requisitos da zona bioclimática 3, zona em que está inserida a cidade de acordo com o zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005c), e outra adequação para atender aos requisitos da ZB4, classificação sugerida por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para a cidade de Belo Horizonte. Na quarta etapa é realizada uma avaliação da edificação de acordo com norma NBR 15.575 (ABNT, 2013), norma de desempenho para edificações habitacionais. Nesta última etapa também são analisadas a edificação real e uma adequação da edificação para atender aos requisitos mínimos da norma para o método simplificado. Nas etapas 3 e 4, após as análises das normas de desempenho, verifica-se o conforto térmico da edificação, utilizando o método adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013). Essas etapas são descritas a seguir.

4.1 Caracterização do clima de Belo Horizonte

A cidade de Belo Horizonte está localizada no estado de Minas Gerais, no sudeste do país. Segundo a Classificação Climática de Köppen, Belo Horizonte se localiza em uma região de clima temperado de inverno suave, com temperatura média do mês mais frio abaixo de 18,0°C e do mês mais quente acima de 22,0°C. A partir da Figura 4.1, que apresenta gráficos gerados com base nas normais climatológicas para Belo Horizonte do período de 1961-1990, é possível observar que:

- a temperatura média (T) varia ao longo do ano de 18,1°C a 23,2°C. No mês mais frio, em julho, a temperatura média mínima (Tn) é de 13,1°C e no mais quente, em

fevereiro, a temperatura média máxima (Tx) é de 28,8°C. A amplitude térmica mensal, em todo ano, é de aproximadamente 10°C;

- o período de verão apresenta temperaturas elevadas e índice de precipitação elevado, e o inverno apresenta temperaturas baixas e pouca chuva;
- a umidade relativa média varia ao longo do ano de 64,5% a 79%;
- o mês com maior insolação é o mês de agosto e o com menor é o de dezembro.

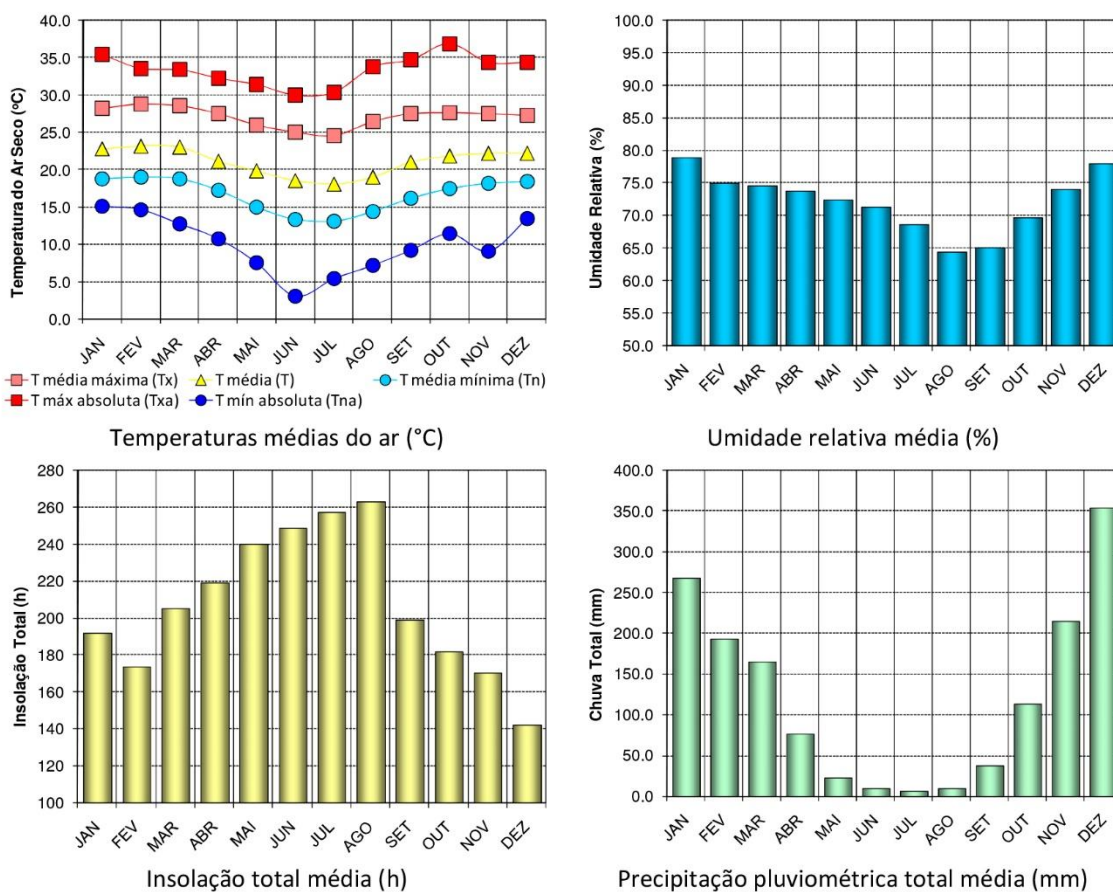


Figura 4.1 – Dados climáticos da cidade de Belo Horizonte

Fonte: RAMOS (2010). Dados climatológicos das Normais de 1961-1990.

4.2 Definição da edificação de referência

O objeto de estudo deste trabalho é uma residência unifamiliar com 54,96 m² que segue os parâmetros definidos pelo programa Minha Casa Minha Vida do Governo Federal, localizada na cidade de Belo Horizonte – MG. Essa escolha considera que os modelos de habitação social apresentam um papel muito importante, devido à fragilidade social de seus beneficiários e à sua grande escala de reprodução. Outro fator determinante para escolha é que nessas edificações, normalmente, os usuários dependem de meios passivos para a obtenção de conforto térmico (Martins *et al.*, 2012).

A Figura 4.2 apresenta um desenho ilustrativo da edificação. A Figura 4.3 mostra a planta baixa e a Figura 4.4 um corte.

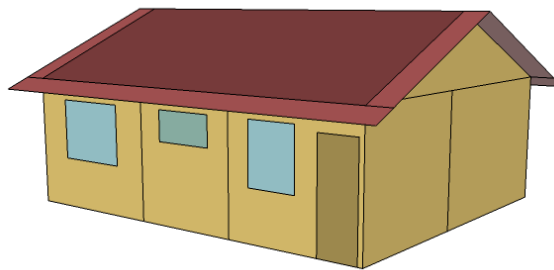


Figura 4.2 – Desenho ilustrativo da edificação

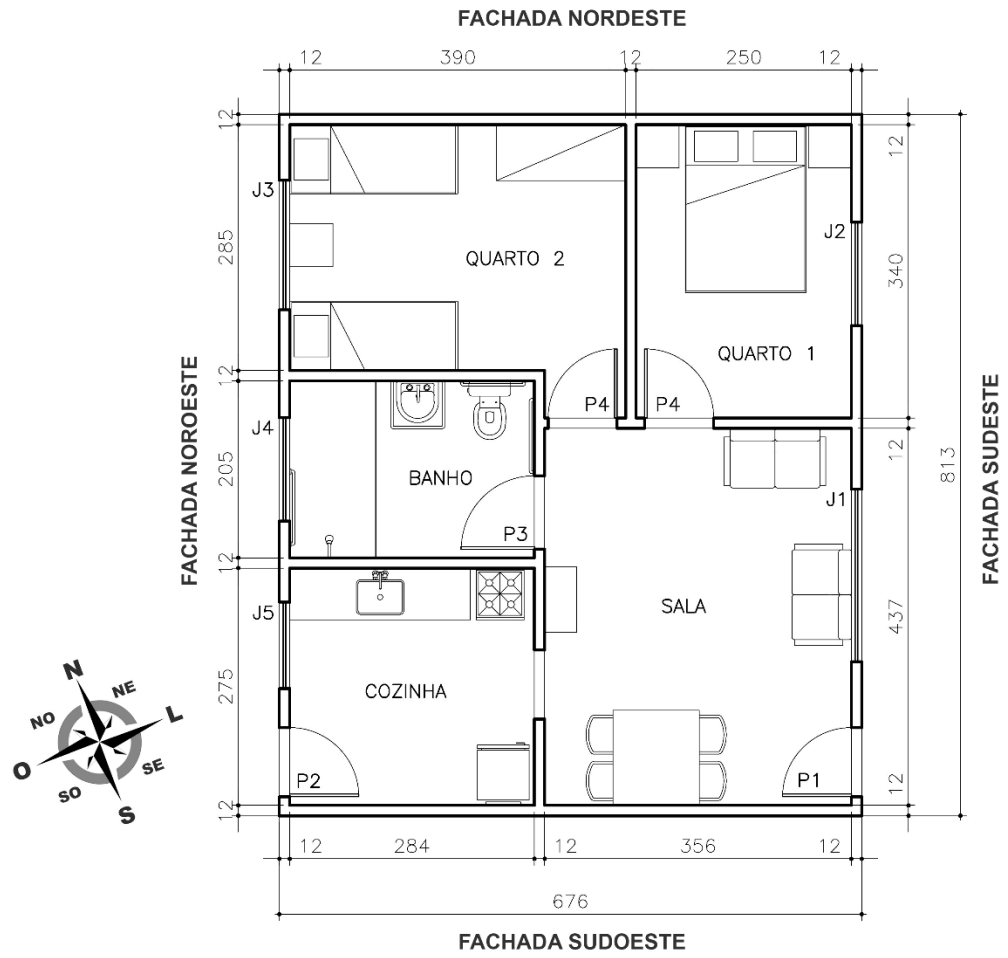


Figura 4.3 – Planta baixa da edificação

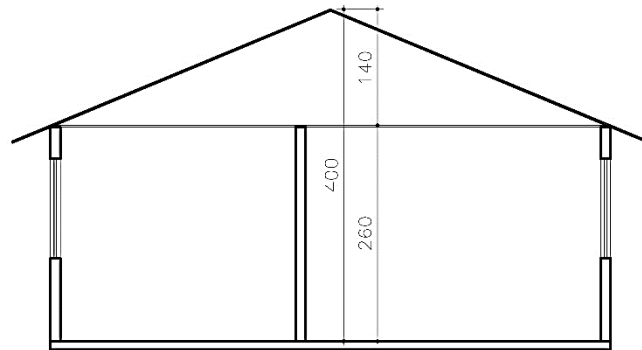


Figura 4.4 - Corte transversal da edificação

A edificação é composta por paredes de alvenaria de tijolo furado (8 furos) de 19x9x29 cm, argamassa de cimento e areia na espessura de 1,5 cm e pintura branca. As paredes internas e externas da edificação possuem a mesma composição, conforme indicado na Figura 4.5.

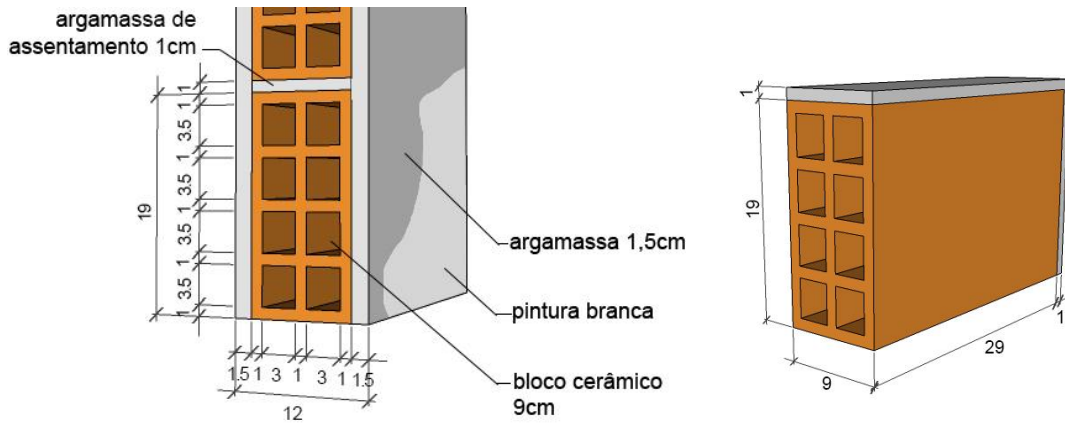


Figura 4.5 – Representação das paredes da edificação

A edificação possui dois tipos de cobertura, uma composta por forro PVC (1 cm) e telha cerâmica (1 cm), presente em todos os cômodos com exceção do banheiro e outra composta por uma laje de concreto de 10 cm e telha cerâmica (1 cm), instalada sobre o banheiro, que possui papel estrutural para suportar a caixa d'água. A composição de cada tipo de cobertura é apresentada na Figura 4.6.

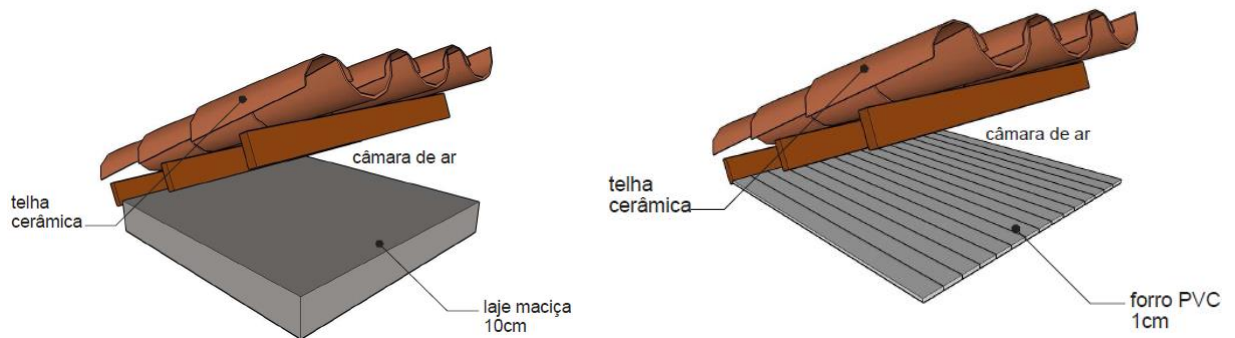


Figura 4.6 – Representação dos tipos de cobertura da edificação

Fonte: Catálogo de propriedades térmicas (MORISHITA *et al.*, 2010).

A edificação possui um beiral do telhado de 50 cm que percorre seu perímetro externo. O piso é composto de placas cerâmicas sobre laje de fundação de concreto. As propriedades térmicas dos materiais utilizados para este estudo foram retiradas da NBR 15.220 (ABNT, 2005b) e são apresentadas na Tabela 4.1 e Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de materiais

Material	ρ (kg/m³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Argamassa	2000	1,15	1,00
Bloco cerâmico	1600	0,90	0,92
Telha cerâmica	2000	1,05	0,92
PVC	1300	0,20	0,96
Laje de concreto	2200	1,75	1,00

Fonte: ABNT, 2005b.

Tabela 4.2 – Absortância (α) para radiação solar (ondas curtas)

Tipo de superfície	α
Pintura Branca	0,20
Telha de barro	0,80

Fonte: ABNT, 2005b.

4.3 Avaliação da edificação de acordo com as normas

4.3.1 NBR 15.220

Na avaliação segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005c) foram analisadas a edificação real, descrita no item 4.2, uma adequação da edificação para atender aos requisitos da zona bioclimática 3, zona em que está inserida a cidade de acordo com o zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005c), e outra adequação para atender aos requisitos da ZB4, classificação sugerido por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para a cidade de Belo Horizonte.

Para verificar a classificação da cidade de Belo Horizonte no zoneamento bioclimático da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) utilizou-se o programa “ZBBR - Classificação Bioclimática das Sedes dos Municípios Brasileiros”, da Universidade Federal de São Carlos (ZBBR, 2004).

Nas avaliações realizadas foram verificadas as dimensões das aberturas para ventilação e a disponibilidade de radiação solar nas mesmas, analisou-se o atendimento das estratégias para condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática em questão e, por último, foram realizados os cálculos dos valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as paredes externas e coberturas. Os cálculos foram realizados conforme o método descrito na NBR 15.220 (ABNT, 2005b).

A Tabela 4.3 apresenta as recomendações para as aberturas dos ambientes de longa permanência das edificações inseridas na zona bioclimática 3. Para a NBR 15.220 (ABNT, 2005c) os ambientes de longa permanência são: cozinha, dormitório, sala de estar. A Tabela 4.4 mostra os tipos de vedações externas que devem ser adotados e a Tabela 4.5 as estratégias de condicionamento térmico passivo.

Tabela 4.3 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 3

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias ($15\% < A < 25\%$)	Permitir o sol durante o inverno

A: Área da abertura em % da área do piso

Fonte: ABNT, 2005c.

Tabela 4.4 – Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 3

Vedações externas	Transmitância térmica – U W/m².K	Atraso térmico – ϕ Horas	Fator solar – F_{so} %
Parede: Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$F_{so} \leq 4,0$
Cobertura: Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$F_{so} \leq 6,5$

Fonte: ABNT, 2005c.

Tabela 4.5 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 3

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	J) Ventilação cruzada
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: ABNT, 2005c.

A Tabela 4.6 descreve as recomendações para as aberturas dos ambientes de longa permanência das edificações inseridas na zona bioclimática 4, a Tabela 4.7 apresenta os tipos de vedações externas que devem ser adotados e a Tabela 4.8 mostra as estratégias de condicionamento térmico passivo para essa zona bioclimática.

Tabela 4.6 – Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a zona bioclimática 4

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias ($15\% < A < 25\%$)	Sombrear aberturas
A: Área da abertura em % da área do piso	

Fonte: ABNT, 2005c.

Tabela 4.7 – Tipos de vedações externas para a zona bioclimática 4

Vedações externas	Transmitância térmica – U W/m².K	Atraso térmico – ϕ Horas	Fator solar – F_{s_0} %
Parede: Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$F_{s_0} \leq 3,5$
Cobertura: Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$F_{s_0} \leq 6,5$

Fonte: ABNT, 2005c.

Tabela 4.8 – Estratégias de condicionamento térmico passivo para a zona bioclimática 4

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	H) Resfriamento evaporativo e Massa térmica para resfriamento
Inverno	J) Ventilação cruzada B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: ABNT, 2005c.

4.3.2 NBR 15.575

Segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013), a avaliação do desempenho térmico da edificação pode ser realizada por três métodos: por um procedimento simplificado (prescritivo), por simulação computacional ou por medição. Para a avaliação do desempenho térmico da edificação por meio do procedimento simplificado, a NBR 15.575 (ABNT, 2013) considera o zoneamento bioclimático definido pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) e determina valores mínimos de desempenho para paredes externas e valores mínimos (atendimento obrigatório), intermediários e superiores (valores informativos) de desempenho para coberturas, através dos critérios presentes na Tabela 4.9, Tabela 4.10 e Tabela 4.11. Os cálculos devem ser realizados conforme procedimentos apresentados na NBR 15.220 (ABNT, 2005b).

Tabela 4.9 – Transmitância térmica de paredes externas

Transmitância térmica (W/m ² .K)		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha^a > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

^a α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: ABNT, 2013.

Tabela 4.10 – Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT) kJ/m ² .K	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 ≥ 130	Zona 8 Sem requisito

Fonte: ABNT, 2013.

Tabela 4.11 – Transmitância térmica de coberturas

Transmitância térmica (U) W/m ² K					
Zonas 1 e 2	Zonas 3 a 6		Zonas 7 e 8		Nível de desempenho
U ≤ 2,3	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	Mínimo (M)
	U ≤ 2,3	U ≤ 1,5	U ≤ 2,3 FT	U ≤ 1,5 FT	
U ≤ 1,5	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	Intermediário (I)
	U ≤ 1,5	U ≤ 1,0	U ≤ 1,5 FT	U ≤ 1,0 FT	
U ≤ 1,0	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$	Superior (S)
	U ≤ 1,0	U ≤ 0,5	U ≤ 1,0 FT	U ≤ 0,5 FT	

α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da cobertura.

NOTA O fator de correção da transmitância (FT) é estabelecido na ABNT NBR 15220-3.

Fonte: ABNT, 2013.

A NBR 15.575 (ABNT, 2013) também apresenta dimensões mínimas de aberturas para ventilação para os ambientes de permanência prolongada, conforme a Tabela 4.12. Para a NBR 15.575 (ABNT, 2013) esses ambientes são salas e dormitórios. Esses valores devem ser seguidos nos casos em que não haja legislação específica no local da obra (ABNT, 2013). Nesse trabalho foi considerado apenas o atendimento da área mínima de abertura para ventilação da NBR 15.575 (ABNT, 2013), uma vez que a legislação de Belo Horizonte não define valores específicos para área efetiva de ventilação do vão da esquadria.

Tabela 4.12 – Área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar

Nível de desempenho	Aberturas para ventilação (A)	
	ZB 1 a 7 Aberturas médias	ZB 8 Aberturas grandes
Mínimo	A ≥ 7% da área do piso	A ≥ 12% da área do piso – região norte do Brasil A ≥ 8% da área do piso – região nordeste e sudeste do Brasil

NOTA Nas zonas de 1 a 6, as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio.

Fonte: ABNT, 2013.

Para os casos em que os valores de transmitância térmica e capacidade térmica resultem em insatisfatórios, ou seja, que não atendam aos mínimos estabelecidos, a norma permite que a edificação seja avaliada como um todo pelo método de simulação computacional. Para tanto, é recomendada a utilização do programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) ou outro programa de simulação computacional que permita a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições dinâmicas de exposição ao clima, seja capaz de reproduzir os efeitos de inércia térmica e que seja validado pela *ASHRAE Standard 140*. A geometria do modelo de simulação deve representar a habitação como um todo, considerando cada ambiente como uma zona térmica. Os dados de propriedades térmicas dos materiais devem ser obtidos em laboratório, através de ensaio normatizado, ou, na ausência destes, é permitido utilizar os dados disponibilizados pela NBR 15.220 (ABNT, 2005b). Deve-se adotar uma taxa de ventilação de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora (1 ren/h) para os ambientes e para a cobertura (ABNT, 2013).

A simulação deve comprovar no mínimo que, no verão, o valor máximo diário da temperatura do ar interior dos ambientes de permanência prolongada (salas e dormitórios), sem a presença de fontes internas de calor, seja sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior e que, no inverno, o valor mínimo diário da temperatura do ar interior desses mesmos ambientes seja sempre maior ou igual à temperatura mínima externa acrescida de 3°C. Não é especificado se no inverno deve-se considerar a presença de fontes internas de calor ou não. Nas zonas climáticas 6, 7 e 8 não é necessário realizar avaliação de desempenho térmico para inverno. Para essas simulações deve-se utilizar os dias típicos de projeto de verão e de inverno definidos por tabelas encontradas na norma (ABNT, 2013). A Tabela 4.13 e a Tabela 4.14 apresentam os valores mínimos a serem atendidos (valores normativos), além de valores limites para classificações intermediária ou superior (valores informativos), apresentadas pela norma para facilitar a comparação entre os níveis de desempenho alcançados pelas edificações (ABNT, 2013).

Tabela 4.13 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
Mínimo (M)	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$
Intermediário (I)	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 2^{\circ}\text{C})$	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 1^{\circ}\text{C})$
Superior (S)	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 4^{\circ}\text{C})$	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 2^{\circ}\text{C})$

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

Fonte: ABNT, 2013.

Tabela 4.14 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
Mínimo (M)	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 3\text{C})$	Nestas zonas este critério não precisa ser verificado
Intermediário (I)	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 5^{\circ}\text{C})$	
Superior (S)	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 7^{\circ}\text{C})$	

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

Fonte: ABNT, 2013.

A edificação que não atender aos critérios estabelecidos para verão deve ser simulada novamente, considerando as estratégias abaixo (ABNT, 2013):

- estratégia de ventilação: configurar a ventilação em 5,0 ren/h e colocar janelas sem sombreamento;
- estratégia de sombreamento: inserir proteção solar na esquadria externa com capacidade de cortar no mínimo 50% da radiação solar direta e manter uma taxa de ventilação de 1,0 ren/h;
- estratégia de ventilação e sombreamento: combinar as duas estratégias anteriores (proteção solar e taxa de ventilação de 5,0 ren/h).

O procedimento de medição verifica os requisitos estabelecidos pela norma por meio de medições realizadas na própria edificação ou em protótipos construídos. Nesse procedimento deve-se medir a temperatura de bulbo seco do ar no centro dos recintos (dormitórios e salas) a 1,20 m do piso (ABNT, 2013).

Neste estudo, primeiramente aplicou-se o método simplificado e, em seguida, avaliou-se a edificação através de simulação computacional.

A avaliação por simulação computacional requer a definição dos dados dos dias típicos de verão e inverno. A norma apresenta uma tabela que lista dados de algumas cidades brasileiras. Os dados para a cidade de Belo Horizonte são listados na Tabela 4.15 e Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Dados de dias típicos de verão para Belo Horizonte

Temperatura máxima diária (°C)	Amplitude diária de temperatura (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Radiação solar (Wh/m ²)	Nebulosidade (décimos)
32	10,3	21,7	4641	6

Fonte: ABNT, 2013.

Tabela 4.16 – Dados de dias típicos de inverno para Belo Horizonte

Temperatura mínima diária (°C)	Amplitude diária de temperatura (°C)	Temperatura de bulbo úmido (°C)	Radiação solar (Wh/m ²)	Nebulosidade (décimos)
8,7	12,6	16,0	3716	3

Fonte: ABNT, 2013.

Para rodar uma simulação são necessários outros dados além dos que estão presentes nas tabelas da norma. Os dados que não são disponibilizados pela norma são: data, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento e tipo de céu.

Um fator que é influenciado pela determinação das datas dos dias típicos de verão e inverno é a declinação solar e consequentemente os valores de irradiância solar nos componentes externos da edificação. A Tabela 4.17 apresenta as datas de início e fim de cada estação e a Figura 4.7 e Figura 4.8 mostram a variação do ângulo solar nas mesmas através da carta solar para a cidade analisada.

Tabela 4.17 – Datas de início e fim das estações de verão e inverno

Estação	Início aproximado	Fim aproximado
Verão	22 dezembro	21 março
Inverno	22 junho	23 setembro

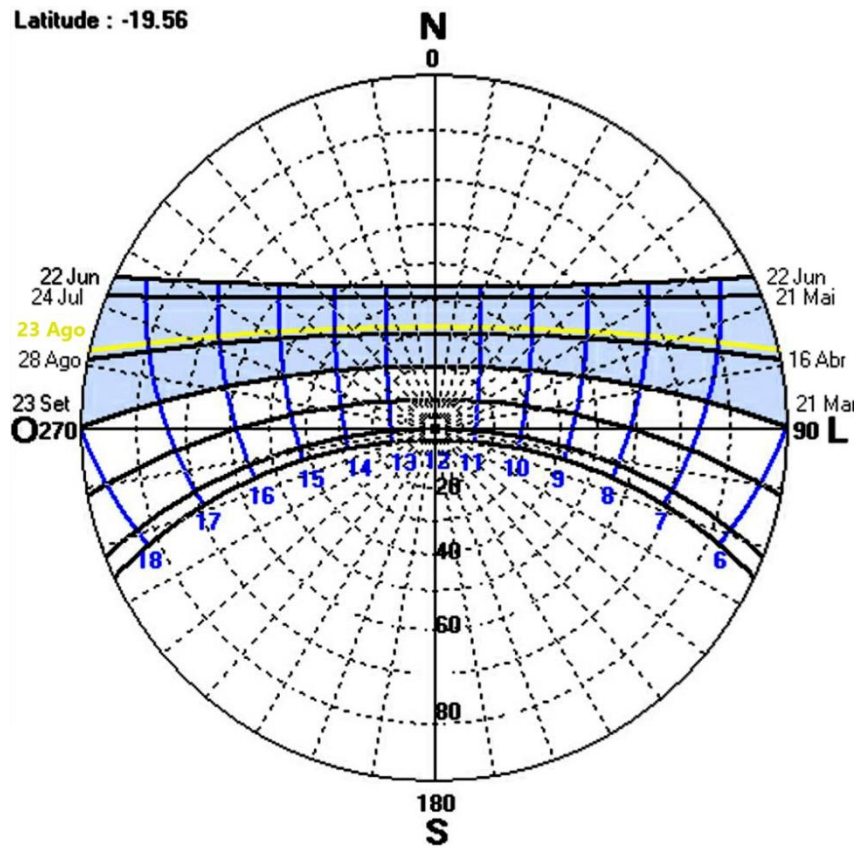


Figura 4.7 – Carta solar de Belo Horizonte - declinação do sol na estação de inverno

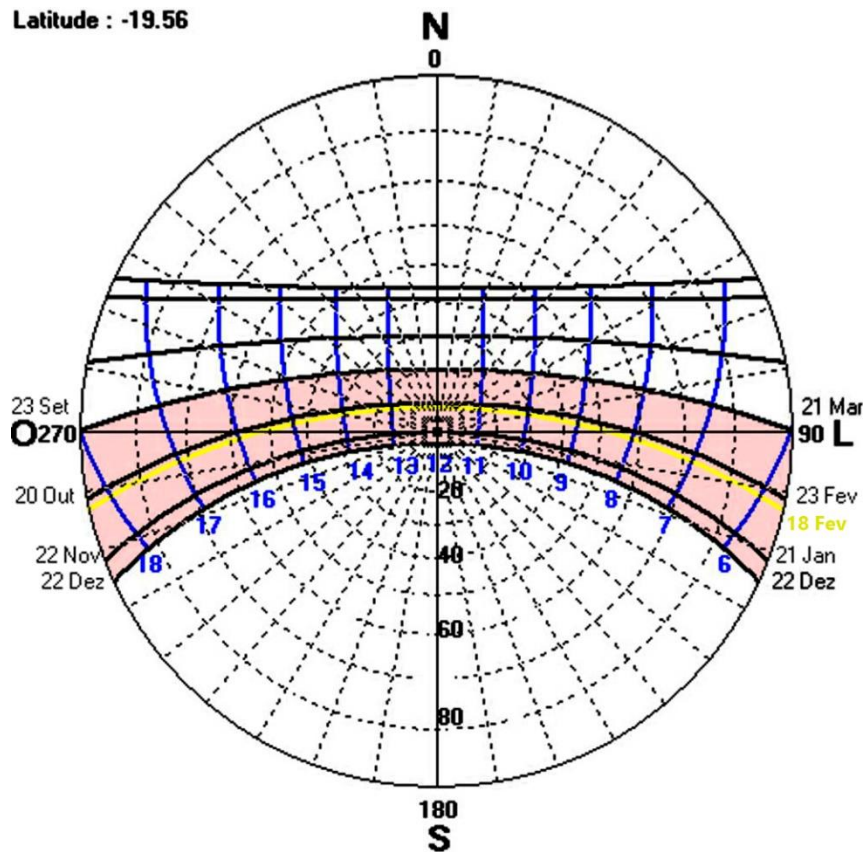


Figura 4.8 – Carta solar de Belo Horizonte - declinação do sol na estação de verão

Para este trabalho, definiu-se que as datas que representam a declinação intermediária de cada estação são melhores para representar o período como um todo. Elas correspondem às linhas amarelas da carta solar na Figura 4.7 e Figura 4.8. São elas: no inverno dia 23 de agosto e no verão dia 18 de fevereiro.

Utilizou-se a pressão atmosférica das datas definidas para os dias típicos, disponibilizada pelo arquivo climático INMET da cidade de Belo Horizonte elaborado por Roriz (2012a). Foi feita uma média das pressões horárias do dia.

A velocidade e a direção do vento foram retiradas da rosa dos ventos gerada pelo Programa Sol-Ar para a cidade de Belo Horizonte (SOL-AR, 2009), utilizando os dados do arquivo climático elaborado por Roriz (2012a), conforme a Figura 4.9 e Figura 4.10. Considerou-se a direção com maior frequência de ocorrência para cada estação e a velocidade do vento

nessa direção. A direção para ambas as estações é de 90 graus (leste) e a velocidade de 2,81 m/s para o verão e 3,1 m/s para o inverno.

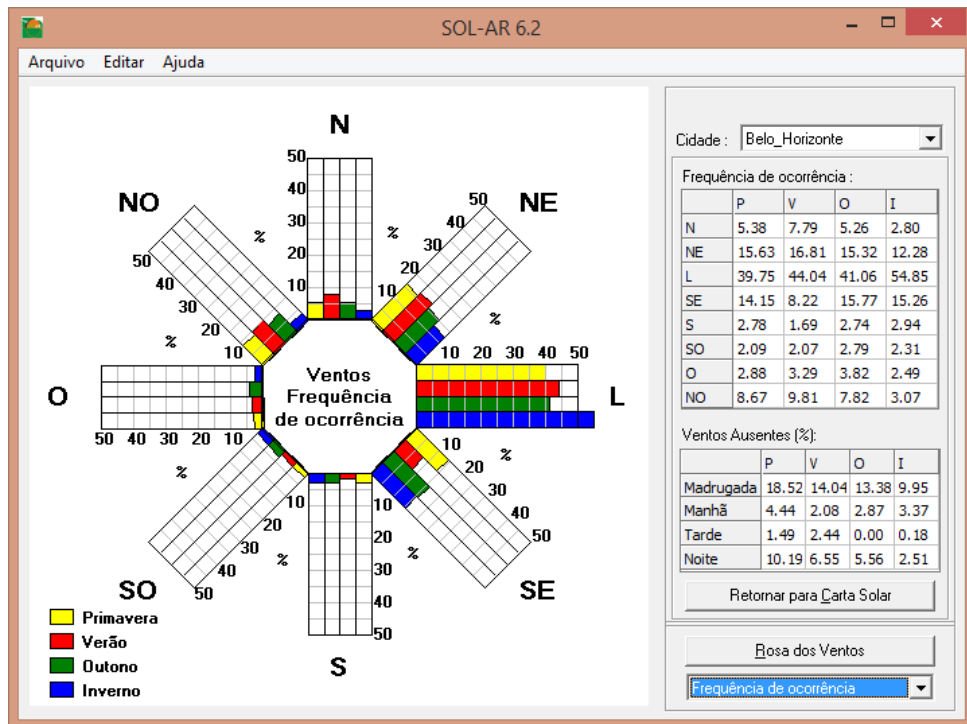


Figura 4.9 – Freqüência de ocorrência dos ventos para Belo Horizonte – MG

Fonte: SOL-AR, 2009.

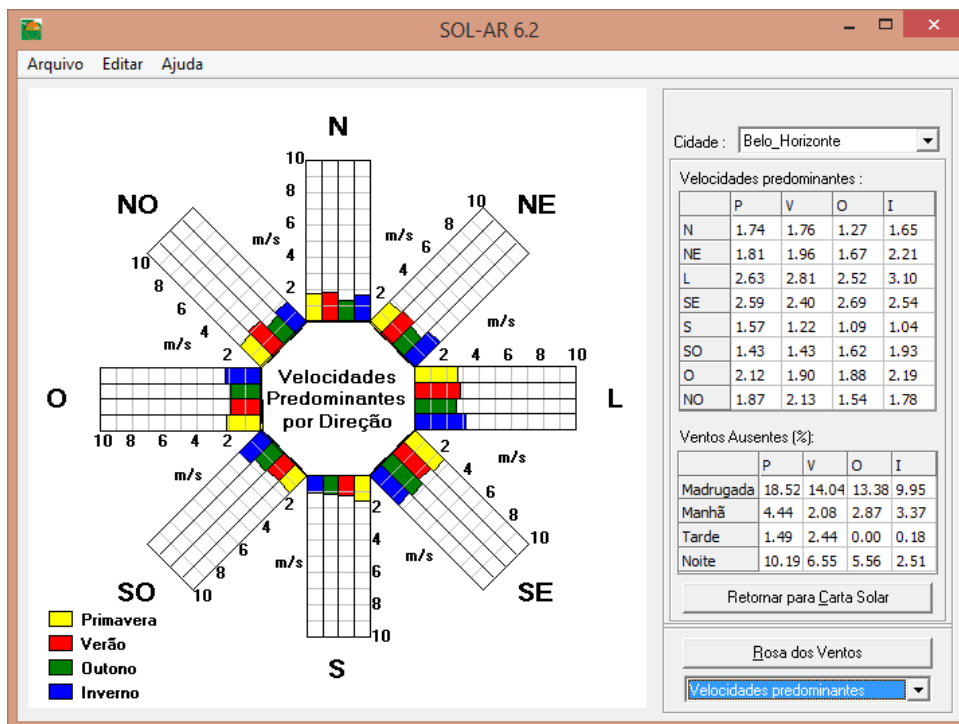


Figura 4.10 – Velocidade predominante dos ventos para cidade de Belo Horizonte – MG

Fonte: SOL-AR, 2009.

Para o tipo de céu foi utilizado o método da ASHRAE *Clearsky, default* do programa de simulação. Para esse método é necessário preencher o objeto *sky clearness*, que representa o índice de claridade do céu, com um valor que varia de 0 a 1,2, onde 1 representa um céu limpo a nível do mar e os valores acima de 1 devem ser usados para locais com altitude elevada com céu limpo. A NBR 15.575 (2013) não disponibiliza um valor para preenchimento do índice de claridade. No lugar disso, a norma apresenta valores de nebulosidade para o dia típico de verão e o dia típico de inverno. A partir de uma correspondência entre os valores de nebulosidade disponibilizados pelas tabelas da norma definiu-se o valor do índice de claridade.

A nebulosidade é a quantidade de nuvens observada no céu. Ela é medida em porcentagem. Uma nebulosidade zero representa um céu totalmente sem nuvens e uma nebulosidade de 100% representa um céu todo coberto com nuvens (SILVA, 2011). O índice de claridade do céu é obtido através da relação entre a radiação solar global e a radiação extraterrestre, que é

a radiação que seria recebida pela superfície da terra considerando a ausência de atmosfera. O índice de claridade varia de acordo com a presença de agentes atenuadores da radiação solar que atravessaria a atmosfera, como nuvens, poeira e poluição (SILVA, 2011). Pode-se concluir, portanto, que em um dia nublado a intensidade da radiação solar terrestre será menor e, em um dia claro, com um céu sem nuvens, acontecerá o contrário.

Como a cidade em estudo possui uma altitude elevada, considerou-se uma escala do índice de claridade de 0 a 1,2. Para a definição do índice considerou-se que uma nebulosidade de 100% representa um índice de 0 e uma nebulosidade de 0% um índice de 1,2. A Tabela 4.18 apresenta os valores de correspondência entre o índice de claridade e a nebulosidade. A partir desse raciocínio, o valor dos índices de claridade para os dias típicos de verão e inverno foram encontrados, conforme Tabela 4.19.

Tabela 4.18 - Correspondência entre o índice de claridade e a nebulosidade

Valor da nebulosidade	100%	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%	0%
Índice de claridade	0	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.72	0.84	0.96	1,08	1,20

Tabela 4.19 – Índices de claridade encontrados a partir dos valores de nebulosidade

	Nebulosidade definida pela NBR 15.575 (%)	Índice de claridade ou <i>Sky Clearness</i> encontrado por correspondência
Verão	60	0,48
Inverno	30	0,84

Deste modo, os dados não fornecidos pela norma que foram utilizados na simulação computacional são os apresentados na Tabela 4.20 e Tabela 4.21.

Tabela 4.20 - Dados para simulação do dia típico de verão

Data	Pressão atmosférica	Velocidade do vento	Direção do vento	Tipo de céu	
18 de fevereiro	91472.5 Pa	2,81 m/s	90 graus (leste)	ASHRAE Clearsky	0,48

Tabela 4.21 - Dados para a simulação do dia típico de inverno

Data	Pressão atmosférica	Velocidade do vento	Direção do vento	Tipo de céu	
23 de agosto	92147.08 Pa	3,1 m/s	90 graus (leste)	ASHRAE Clearsky	0,84

A versão do programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) utilizada foi a 8.1.0. Os parâmetros utilizados na simulação são descritos abaixo:

Modelagem da residência

Para simular a edificação no programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) é necessário que sejam definidas zonas térmicas. Conforme exigido pela NBR 15.575 (ABNT, 2013), cada ambiente foi considerado como uma zona térmica, incluindo o ático da cobertura, totalizando em 6 zonas térmicas. O beiral da edificação foi inserido no objeto *Shading:Zone:Detailed*. O modelo tridimensional desenvolvido para a simulação pode ser visto na Figura 4.11.

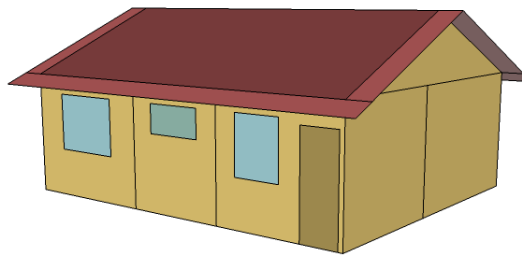


Figura 4.11 – Modelo tridimensional da edificação simulada

Temperatura do solo

A NBR 15.575 (ABNT, 2013) não especifica como devem ser adquiridos os dados de temperatura do solo para as simulações. Nesta avaliação utilizou-se as temperaturas do solo provenientes do arquivo climático, apresentadas na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Temperaturas do solo utilizadas

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temp. (°C)	23,71	23,87	23,51	22,97	21,58	20,53	19,83	19,64	20,04	20,88	21,99	23,01

Fonte: Roriz, 2012a.

Propriedades térmicas dos materiais

Utilizou-se como referência os valores das propriedades térmicas dos materiais da NBR 15.220 (ABNT, 2005b), os mesmos valores utilizados para os cálculos na parte prescritiva da norma. O método descrito por Ordenes *et al.* (2003) foi adotado para transformar paredes heterogêneas em paredes homogêneas para que fosse possível inserir os dados no programa de simulação. O vidro utilizado para compor as janelas foi um vidro simples incolor de 2,5 mm proveniente da biblioteca de materiais do *EnergyPlus* (DOE, 2013).

Ventilação natural

Para a análise do dia típico de inverno e de verão adotou-se uma taxa de ventilação de uma renovação do volume de ar do ambiente por hora (1 ren/h) para todos os ambientes, para todas as horas do ano, incluindo a cobertura. Os parâmetros foram inseridos no *EnergyPlus* (DOE, 2013) utilizando-se objeto *ZoneInfiltration:DesignFlowRate* que representa a infiltração de ar no ambiente.

Cargas internas

Foram considerados como cargas internas os usuários da residência, o sistema de iluminação artificial e os equipamentos. A Figura 4.12 apresenta as cargas instaladas por zona térmica.



Figura 4.12 – Cargas internas na edificação

O chuveiro do banheiro não foi considerado no balanço térmico da edificação, uma vez que “o programa *EnergyPlus* não tem capacidade para modelar as correntes de convecção geradas pela grande diferença de temperatura do ar quando o chuveiro é ligado, dissipando rapidamente o calor gerado por esse equipamento” (MATOS, 2007, p. 6). O valor da potência dos equipamentos (geladeira de 1 porta e televisão em cores de 29” tubo) foi retirado da tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos da Eletrobrás (ELETROBRÁS, 2013). Considerou-se uma fração radiante para os equipamentos de 0,5. Os valores de potência para o sistema de iluminação artificial foram obtidos no projeto elétrico da edificação. Foram utilizadas lâmpadas fluorescentes compactas. Para o sistema de iluminação utilizou-se valores de fração radiante de 0,72, fração visível de 0,18 e retorno de ar de 0, valores retirados do manual do *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2013b). Nos quartos considerou-se uma taxa metabólica para um indivíduo dormindo (72W) e na sala para um indivíduo sentado (108W). Os valores das taxas metabólicas foram obtidos na ASHRAE Standard 55 (ASHRAE, 2013). Considerou-se uma fração radiante de 0,4 (DOE, 2003).

A Figura 4.13 apresenta o padrão de ocupação dos cômodos nos dias de semana e a Figura 4.14 nos fins de semana. Utilizou-se como referência o padrão de ocupação do RTQ-R (INMETRO, 2012) e considerou-se uma família de 4 pessoas.

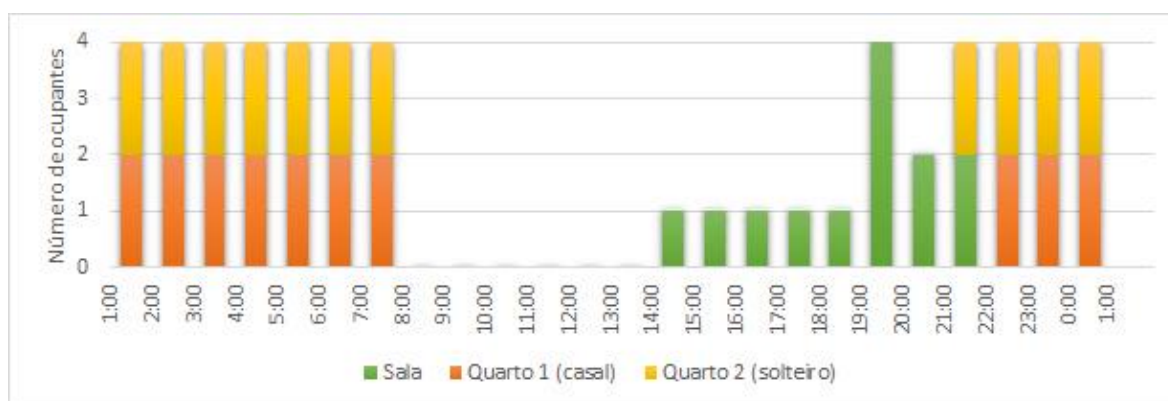


Figura 4.13 – Padrão de ocupação nos dias de semana

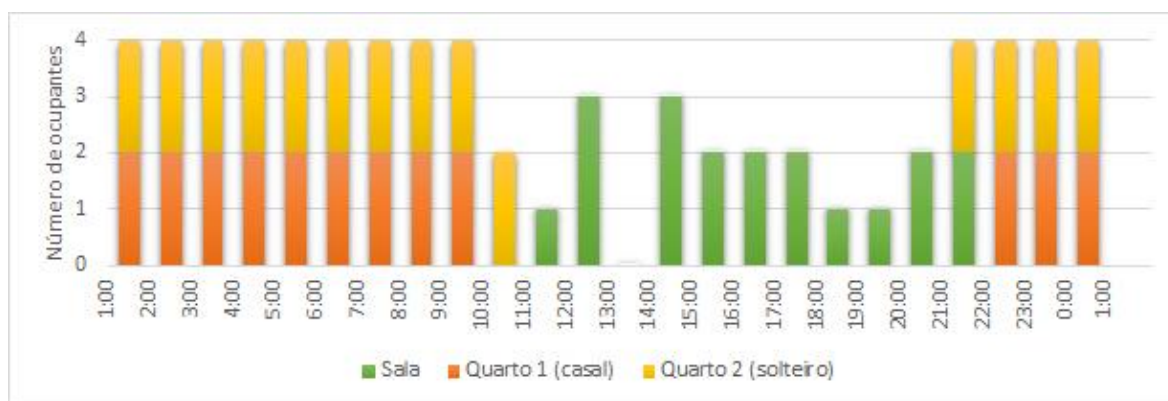


Figura 4.14 – Padrão de ocupação nos fins de semana

O padrão de uso do sistema de iluminação artificial da residência é apresentado na Figura 4.15 (dias de semana) e Figura 4.16 (fins de semana). Também utilizou-se como referência o padrão uso descrito no RTQ-R (INMETRO, 2012).

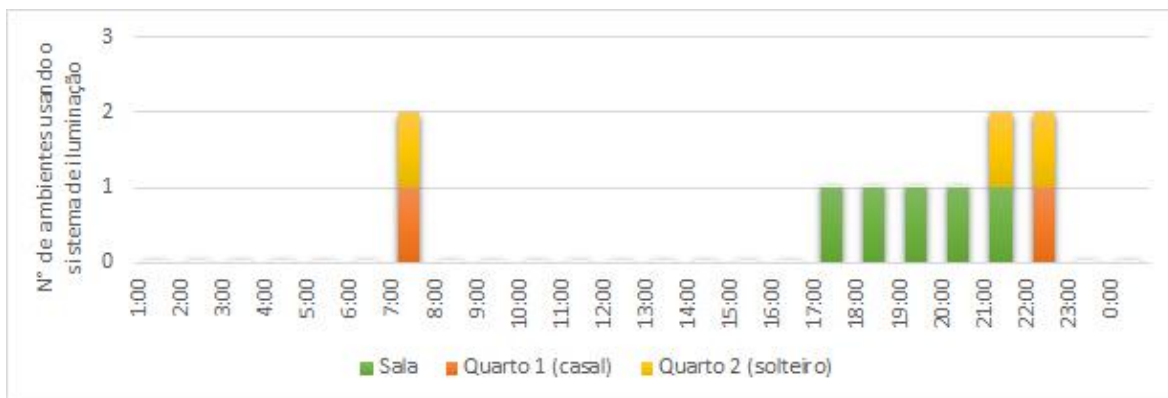


Figura 4.15 – Padrão de uso do sistema de iluminação artificial nos dias de semana

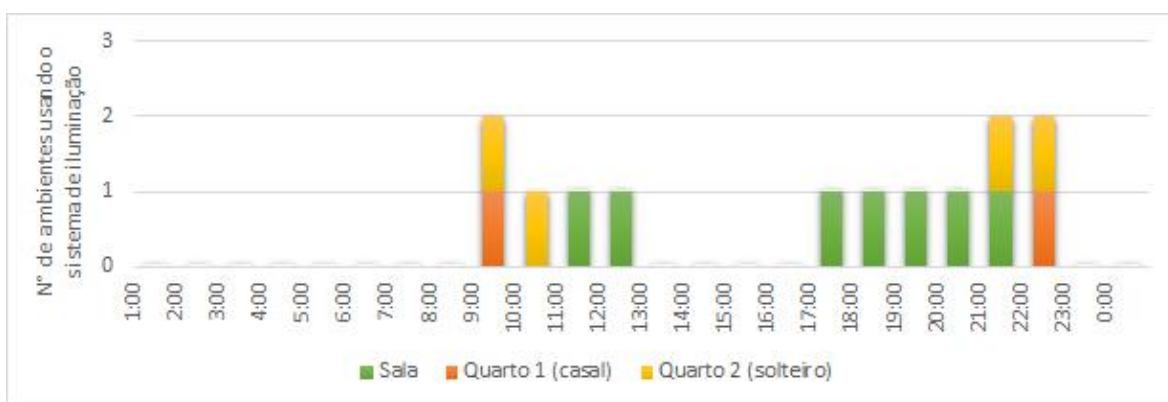


Figura 4.16 – Padrão de uso do sistema de iluminação nos fins de semana

A Figura 4.17 mostra o padrão de uso dos equipamentos da edificação nos dias de semana e a Figura 4.18 nos fins de semana. Considerou-se que a geladeira fica ligada 24 horas e que a televisão fica ligada enquanto há ocupação na sala.

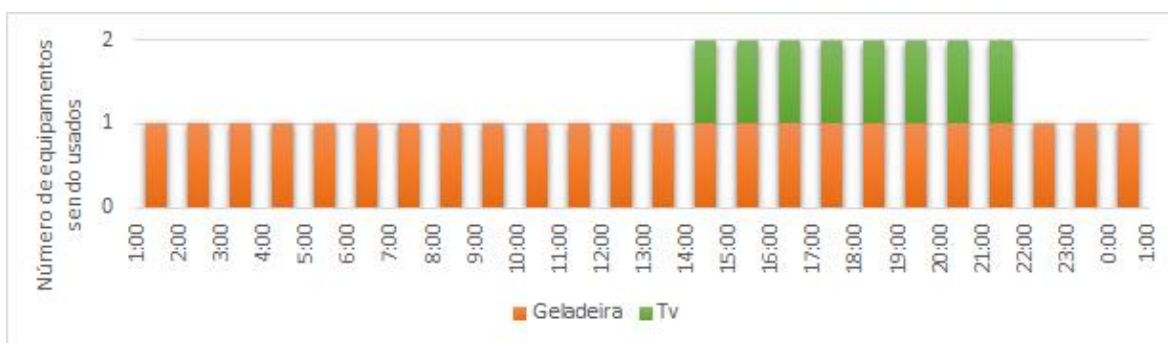


Figura 4.17 – Padrão de uso dos equipamentos nos dias de semana

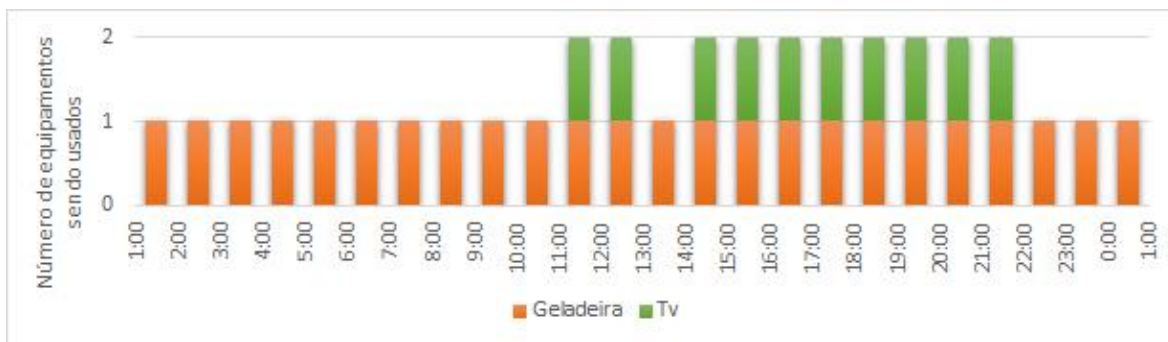


Figura 4.18 – Padrão de uso dos equipamentos nos dias de semana

As cargas internas foram utilizadas apenas na simulação do dia típico de inverno. Na simulação do dia típico de verão não foram consideradas, conforme exigido pela NBR 15.575 (ABNT, 2013).

Após a verificação do desempenho térmico da edificação real, realizou-se uma adequação da edificação para atender aos requisitos mínimos da norma para o método simplificado.

4.3.3 ASHRAE Standard 55

A determinação das condições de conforto térmico da ASHRAE Standard 55 (2013) em espaços ventilados naturalmente é realizada a partir do gráfico da Figura 4.19, a seguir, que fixa os valores aceitáveis de temperatura operativa interna do ambiente para um limite de 80% de satisfação dos usuários em função da temperatura média do ar externo predominante. O limite de 90% é meramente para informação. O gráfico já considera os efeitos de desconforto térmico localizado, roupa, atividade metabólica, umidade e velocidade do ar, portanto essas variáveis não precisam de ser analisadas isoladamente (ASHRAE, 2013).

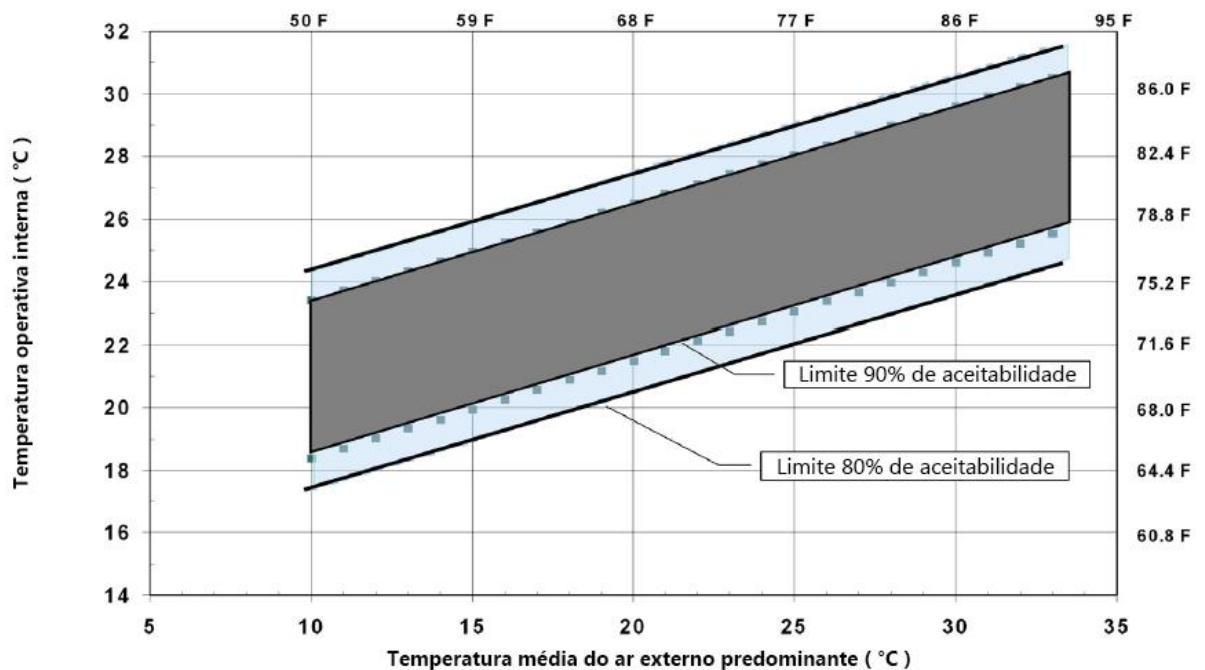


Figura 4.19 – Faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes naturalmente condicionados (os limites de 80% são normativos e os de 90% informativos)

Fonte: ASHRAE, 2013. (Houve alteração na ilustração com a tradução do texto para o português).

As Equações 4.1 e 4.2 indicam os limites de temperatura operativa aceitáveis apresentados no gráfico (ASHRAE, 2013):

$$\text{Limite superior de 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 \times t_{pma(out)} + 21,3 \quad (4.1)$$

$$\text{Limite inferior de 80\% de aceitabilidade (}^{\circ}\text{C)} = 0,31 \times t_{pma(out)} + 14,3 \quad (4.2)$$

em que

$t_{pma(out)}$ é a temperatura média do ar externo predominante.

Neste trabalho, considerou-se o limite de aceitabilidade de 80% para a avaliação do conforto dos usuários da edificação.

De acordo com Lamberts *et al.* (2014b), a temperatura operativa pode ser definida como a temperatura uniforme de um ambiente radiante negro hipotético, onde um indivíduo poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real. A

temperatura operativa pode ser calculada com uma aproximação aceitável como sendo o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura radiante média.

A temperatura média do ar externo predominante deve ser calculada a partir de uma média aritmética simples de todas as temperaturas médias do ar externo considerando não menos que os últimos 7 dias e não mais que os últimos 30 dias em relação ao dia de referência. A temperatura média do ar externo de cada dia deve ser obtida por meio de uma média aritmética simples de todas as medições da temperatura externa de bulbo seco para as 24 horas do dia (ASHRAE, 2013). Neste estudo, os valores de temperatura média do ar externo predominante foram calculados através da média aritmética das temperaturas externas dos últimos 7 dias em relação ao dia de referência. Essas temperaturas foram retiradas do arquivo climático INMET para cidade de Belo Horizonte, elaborado por Roriz (2012a).

A norma ainda prevê um aumento do limite superior de aceitabilidade do gráfico da Figura 4.19 caso a temperatura operativa seja maior que 25°C e a velocidade do ar seja maior que 0,3 m/s. Os valores do aumento devem estar de acordo com a Tabela 4.23 (ASHRAE, 2013).

Tabela 4.23 – Aumento nos limites de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente condicionados

Velocidade do ar até 0,6 m/s	Velocidade do ar até 0,9 m/s	Velocidade do ar até 1,2 m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: ASHRAE, 2013.

Para este trabalho foi desconsiderado o aumento dos limites superiores de conforto do gráfico da Figura 4.19 para velocidades do ar interno maiores que 0,3 m/s e para temperatura acima de 25°C.

Para avaliar a edificação pela ASHRAE Standard 55 (2013) foi necessário realizar uma simulação computacional da edificação no programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) para se obter as temperaturas operativas horárias internas dos ambientes de permanência prolongada no período de um ano. Os ambientes de permanência prolongada considerados foram os quartos

e a sala. Esses valores alimentaram o gráfico que indica os limites da faixa de temperatura operativa aceitável e a partir disso foi possível calcular a porcentagem de horas totais em conforto e desconforto térmico.

Para auxiliar na compreensão do comportamento da edificação foram elaborados gráficos com a variação de temperatura horária no interior dos ambientes de permanência prolongada para um dia típico de verão e um dia típico de inverno. A escolha desses dias não influenciou no resultado da análise das horas de conforto obtidas pelo gráfico da ASHRAE Standard 55 (2013). As datas previamente definidas neste estudo para os dias típicos de verão e inverno para avaliação do desempenho térmico segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013) no subitem 4.3.2 levaram em conta apenas a inclinação solar, já que a variação da temperatura do dia foi definida por tabelas presentes no texto da NBR 15.575 (ABNT, 2013). Nesse sentido, considerou-se que essas datas poderiam não ser as mais apropriadas para elaborar os gráficos de variação de temperatura da edificação. Assim, nesta etapa, os dias típicos de verão e inverno considerados para Belo Horizonte foram respectivamente 14/01 e 20/05 (DIAS, 2011).

A versão do programa *EnergyPlus* (DOE, 2013) e os parâmetros utilizados na simulação da residência, as propriedades térmicas dos materiais e as cargas internas foram definidos conforme o que foi descrito no subitem 4.3.2. Os outros parâmetros utilizados na simulação são descritos a seguir:

Temperatura do solo

Para definição da temperatura do solo da edificação utilizou-se o pré-processador *Slab* a partir do preenchimento do objeto *Detailed Ground Heat Transfer* no programa *EnergyPlus* (DOE, 2013). O pré-processador *Slab* é utilizado em casos de edificações com lajes em contato com o solo. Ele simula a influência que o solo exerce nas temperaturas da edificação e vice-versa, caracterizando um processo iterativo e, portanto, mais preciso. Os parâmetros e procedimentos utilizados para rodar o pré-processador *Slab* foram obtidos no “Manual de

simulação computacional de edifícios com o uso do pré-processador Slab no programa EnergyPlus” (MAZZAFERRO *et al.*, 2013).

Ventilação natural

Para a simulação da ventilação natural na edificação utilizou-se o módulo *AirFlowNetwork* do *EnergyPlus*. Os parâmetros do detalhamento das aberturas foram obtidos no “Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa *EnergyPlus*” (PEREIRA *et al.*, 2013). Eles são descritos na Tabela 4.24.

Tabela 4.24 – Coeficiente e expoente para janelas e portas

	Coeficiente de fluxo de ar quando a abertura está fechada (kg/s.m)	Expoente de fluxo de ar quando a abertura está fechada
Janela basculante de metal – pivotante, com eixo horizontal superior, sem vedação	0,0014*	0,66
Janela de correr de metal – 2 folhas, deslizamento horizontal, sem vedação	0,00028	0,66
Porta de madeira – 1 folha pivotante, sem vedação, interna	0,0024	0,66
Porta de metal – 1 folha pivotante, sem vedação, externa	0,00005	0,66

*Por falta de dados para janela de metal utilizou-se o valor da janela de madeira.

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2013.

Foi definida uma rotina de ventilação em que as janelas são abertas quando a temperatura interna do ar é superior à temperatura de *setpoint* de 25°C ($T_{int} > T_{setpoint}$) e quando a temperatura do ar interno é superior à temperatura externa ($T_{int} > T_{ext}$). Durante todas as horas do ano, as portas externas permanecem fechadas e as portas internas e a janela do banheiro abertas.

Arquivo climático

O arquivo climático utilizado na simulação foi o arquivo INMET para a cidade de Belo Horizonte elaborado por Roriz (2012a). O arquivo foi elaborado com base em estações meteorológicas do INMET entre os anos de 2000 e 2010.

5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 NBR 15.220

5.1.1 Avaliação da edificação real

Nesta etapa realizou-se a avaliação da edificação descrita no item 4.2 com suas características originais.

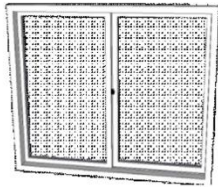
Definição da zona bioclimática

A cidade de Belo Horizonte está localizada na zona bioclimática 3, conforme a NBR 15.220 (ABNT, 2005c).

Aberturas para ventilação

A norma define que, para a zona bioclimática 3, os ambientes de longa permanência devem ter aberturas para ventilação médias (área de ventilação de 15% a 25% em relação à área do piso). A Tabela 5.1 apresenta a porcentagem que deve ser considerada para ventilação natural em janelas de correr e a Tabela 5.2 o cálculo das áreas das aberturas desses ambientes, de acordo com o projeto da edificação.

Tabela 5.1 – Desconto de esquadrias janela de correr

Tipo de janela	Ilustração	% abertura para iluminação natural	% abertura para ventilação natural
de correr (ou deslizante) 2 folhas		80	45

Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).

Tabela 5.2 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada

Ambiente	Área piso (m ²)	Janela	Tipo	Área da Janela (m ²)	Área da abertura para ventilação (m ²)	A (%)
Sala	15,5	J1	Correr (45% livre)	2,4	1,08	7
Quarto 1	8,5	J2	Correr (45% livre)	1,44	0,648	8
Quarto 2	11,6	J3	Correr (45% livre)	1,8	0,81	7
Cozinha	7,8	J5	Correr (45% livre)	1,2	0,54	7

A partir da Tabela 5.2 conclui-se que a área de ventilação para os ambientes de permanência prolongada não atende ao mínimo sugerido pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c).

A NBR 15.220 (ABNT, 2005c) também define que deve-se permitir a entrada de radiação solar nas aberturas durante o inverno. Nesse período, os ambientes Quarto 1 e Sala recebem radiação solar na parte da manhã, e os ambientes Quarto 2 e cozinha recebem radiação solar na parte da tarde.

Estratégias para condicionamento térmico passivo

A NBR 15.220 (ABNT, 2005c) recomenda o uso da ventilação cruzada na edificação durante o verão. As direções com maior frequência de ocorrência de vento nesse período são leste e nordeste. Considerando que as portas internas da edificação permaneçam abertas, é possível afirmar que há ventilação cruzada na edificação, uma vez que as aberturas se encontram em fachadas opostas e na direção de entrada e saída do vento.

A NBR 15.220 (ABNT, 2005c) também afirma que, no inverno, a edificação deve ter aquecimento solar passivo. A edificação possui alguns pontos que favorecem esse aquecimento, são eles: a residência foi implantada com o seu maior eixo na direção norte-sul, o que promove uma maior área de fachada exposta à radiação solar e aumenta o aquecimento passivo; as fachadas com aberturas envidraçadas se encontram voltadas para as orientações leste e oeste, o que permite que a edificação receba radiação solar durante todo o dia, no período da manhã e da tarde. Os pontos que não favorecem o aquecimento passivo são: todas as paredes externas são pintadas na cor branca, o que não favorece o ganho

de calor por absorção da radiação solar e a fachada norte, que recebe grande parte de insolação durante o inverno, não possui nenhuma abertura.

Para o inverno, além do aquecimento solar passivo é recomendado que as vedações internas sejam pesadas (inércia térmica). Utilizando os valores da norma para paredes pesadas, tem-se que o atraso térmico deve ser igual ou maior a 6,5 horas. A parede interna da edificação possui a composição indicada na Figura 4.5. O valor do atraso térmico encontrado para a parede interna é de 3,00 horas, portanto a parede não pode ser considerada como uma parede pesada.

Cálculo dos valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as paredes externas e coberturas

A Tabela 5.3 apresenta os resultados do cálculo de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as paredes externas. As paredes externas atendem aos requisitos de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar estabelecidos para essa zona bioclimática.

Tabela 5.3 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para as paredes externas

	Paredes externas da edificação	Limites da NBR 15.220 para Zona 3	Atende/ Não atende
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))	2,54	$U \leq 3,60$	Atende
Atraso térmico - ϕ (horas)	3,00	$\phi \leq 4,30$	Atende
Fator solar - F_{s_0} (%)	2,03	$F_{s_0} \leq 4,00$	Atende

A Tabela 5.4 e a Tabela 5.5 apresentam os valores encontrados para transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para os tipos de cobertura da edificação.

Tabela 5.4 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para cobertura de telha cerâmica + forro de PVC

	Cobertura da edificação	Limites da NBR 15.220 para Zona 3	Atende / Não atende
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))	2,09	$U \leq 2,00$	Não atende
Atraso térmico - ϕ (horas)	1,20	$\phi \leq 3,30$	Atende
Fator solar - F_{s_0} (%)	6,70	$F_{s_0} \leq 6,50$	Não atende

Tabela 5.5 – Resultado dos cálculos de U, ϕ e F_{s_0} para cobertura de telha cerâmica + laje de concreto

	Cobertura da edificação	Limites da NBR 15.220 para Zona 3	Atende / Não atende
Transmitância térmica – U (W/(m ² .K))	2,05	$U \leq 2,00$	Não atende
Atraso térmico – ϕ (horas)	5,13	$\phi \leq 3,30$	Não atende
Fator solar - F_{s_0} (%)	6,56	$F_{s_0} \leq 6,50$	Não atende

Os dois tipos de cobertura não atendem aos requisitos de transmitância térmica e fator solar estabelecidos para essa zona bioclimática. A cobertura de laje de concreto também não atende ao parâmetro de atraso térmico.

Resumo da avaliação pela NBR 15.220

A Tabela 5.6 apresenta um resumo da avaliação da edificação quanto ao atendimento dos requisitos da NBR 15.220 (ABNT, 2005c).

Tabela 5.6 – Resumo da avaliação pela NBR 15.220

Abertura para ventilação	Estratégias de condicionamento térmico passivo	Cálculo de U, ϕ e F_{s_0}
Não atende à porcentagem exigida (15% a 25%)	<p><i>Aquecimento solar</i> A edificação poderia apresentar mais estratégias de aquecimento solar.</p> <p><i>Inércia térmica paredes internas</i> As paredes internas possuem um atraso térmico menor que o de referência para paredes pesadas.</p>	<p><i>Parede</i> U: atende ϕ: atende F_{s_0}: atende</p> <p><i>Cobertura</i> U: não atende ϕ: PVC atende / concreto não atende F_{s_0}: não atende</p>

Avaliação da edificação pela ASHRAE Standard 55

Para verificar o conforto térmico da edificação foi realizada uma avaliação utilizando o modelo adaptativo descrito na ASHRAE Standard 55 (2013). A Figura 5.1 apresenta o resultado para a Sala, a Figura 5.2 para o Quarto 1 e a Figura 5.3 para o Quarto 2.

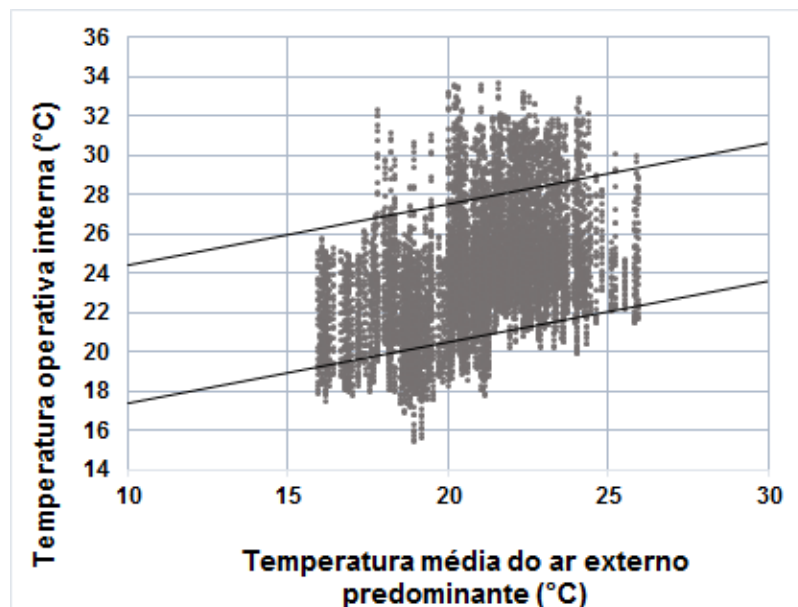


Figura 5.1 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (edificação sem modificações)

A Sala contou com um total anual de 78% de horas de conforto térmico e 22% de horas de desconforto térmico. 12% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 10% representam desconforto por frio.

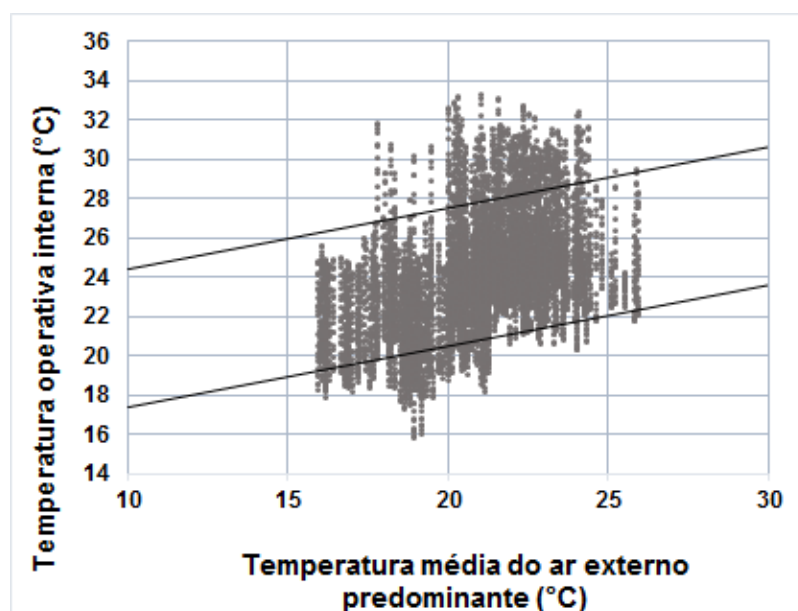


Figura 5.2 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (edificação sem modificações)

O Quarto 1 obteve um total anual de 81% de horas de conforto térmico e 19% de horas de desconforto térmico. 11% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 8% representam desconforto por frio.

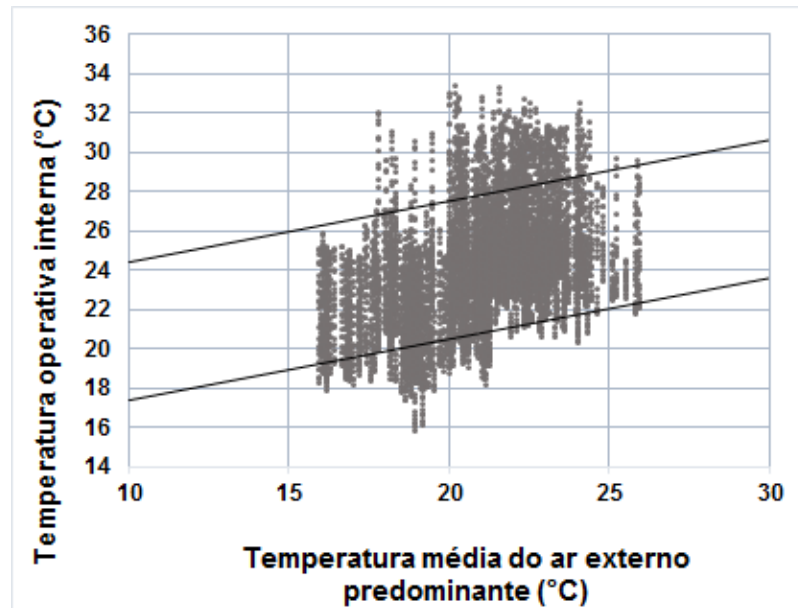


Figura 5.3 - Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (edificação sem modificações)

O Quarto 2 apresentou um total anual de 80% de horas de conforto térmico e 20% de horas de desconforto térmico. Das horas de desconforto, 12% representaram desconforto por calor e 8% por frio.

A Figura 5.4 apresenta a variação da temperatura operativa interna dos ambientes analisados no dia típico de verão (14/01) e a Figura 5.5 no dia típico de inverno (20/05).

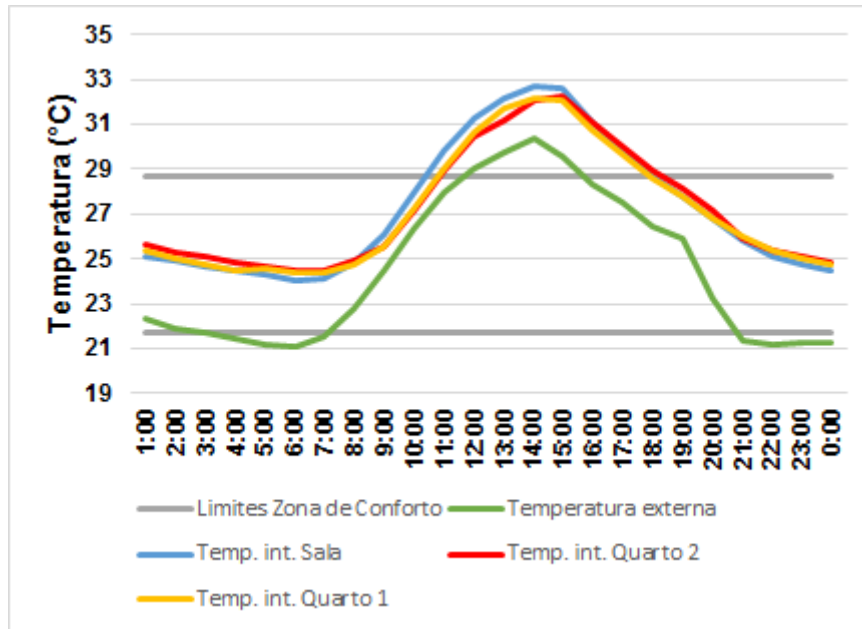


Figura 5.4 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) - edificação sem modificações

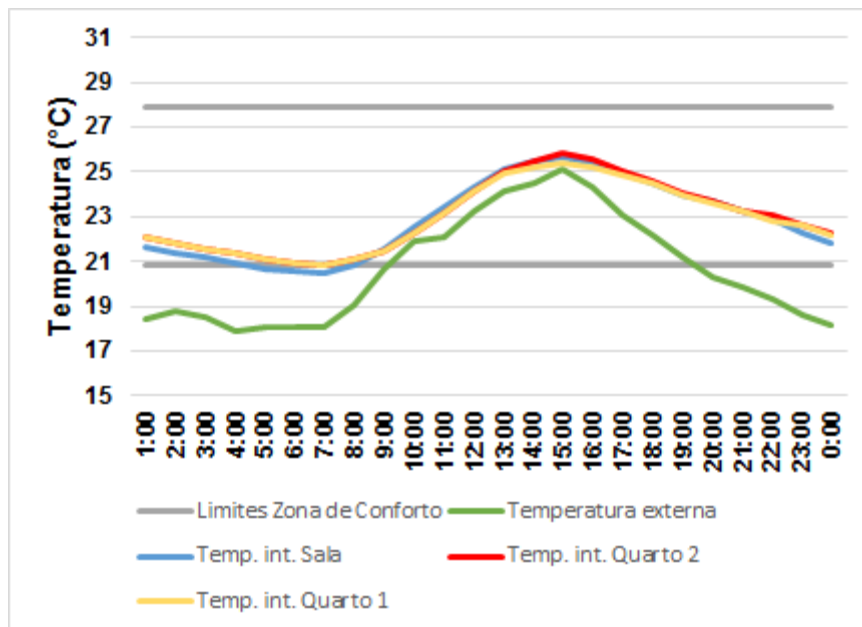


Figura 5.5 - Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) - edificação sem modificações

A partir dos resultados apresentados pode-se verificar que:

- a residência não apresenta conforto para 80% dos usuários em 100% das horas do ano;
- a Sala é o ambiente com maior número de horas de desconforto, tanto por calor quanto por frio, por ter a maior área envidraçada (J1 e P1), o que aumenta as trocas de calor entre o ambiente interno e o externo;
- o desconforto por calor se apresentou maior que o desconforto por frio;
- para ficar dentro da temperatura de conforto durante todas as horas do ano a edificação deveria ter uma amplitude térmica menor, ou seja, diminuir ganhos e perdas nos horários de pico.

5.1.2 Adequação da edificação para atender aos requisitos da ZB3

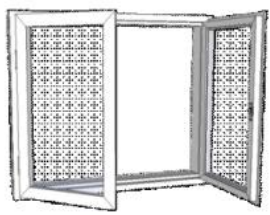
A avaliação da edificação em estudo quanto à NBR 15.220 (ABNT, 2005c) mostrou que a edificação não atendeu a todas as recomendações da norma para a ZB3. A área de abertura para ventilação é menor do que a exigida, as paredes internas não são paredes pesadas como recomendado e os valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as coberturas não atendem ao exigido, além de que a edificação poderia fazer uso de mais estratégias de condicionamento térmico passivo. Neste item realizou-se uma adequação do projeto da edificação para atender a esses parâmetros e posteriormente executou-se uma nova avaliação do conforto térmico utilizando o método da ASHRAE Standard 55 (2013).

Área de abertura para ventilação

Para atender uma área de abertura para ventilação entre 15% e 25% da área do piso para os ambientes de permanência prolongada optou-se por trocar a janela de correr com abertura efetiva de 45% do vão para ventilação por uma janela de abrir, conseguindo 90% de área efetiva para ventilação, como pode ser visto na Tabela 5.7. Para permitir a abertura das folhas das janelas, algumas janelas foram um pouco deslocadas, permanecendo nas mesmas fachadas. Também foi necessário aumentar a altura das janelas de 1,20 m para 1,30 m e a

largura da janela da cozinha passou de 1,00 m para 1,05 m. A largura das outras janelas permaneceu a mesma.

Tabela 5.7 – Tabela de desconto de esquadrias para janelas de abrir

Tipo de janela	Ilustração	% abertura para iluminação natural	% abertura para ventilação natural
Abrir 90° (ou de giro) 1 ou 2 folhas		90	90

Fonte: RTQ-R (INMETRO, 2012).

A Tabela 5.8 apresenta o cálculo das áreas das aberturas dos ambientes de permanência prolongada, de acordo com as adequações realizadas.

Tabela 5.8 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada

Ambiente	Área piso (m ²)	Janela	Tipo	Área da Janela (m ²)	Área da abertura para ventilação (m ²)	A (%)
Sala	15,5	J1 (H=1,3m)	Abrir (90% livre)	2,6	2,34	15
Quarto 1	8,5	J2 (H=1,3m)	Abrir (90% livre)	1,56	1,404	16
Quarto 2	11,6	J3 (H=1,3m)	Abrir (90% livre)	1,95	1,755	15
Cozinha	7,8	J5 (H=1,3m, L=1,05m)	Abrir (90% livre)	1,365	1,228	16

Os parâmetros utilizados na simulação computacional para avaliação da ASHRAE Standard 55 (2013), referentes ao detalhamento das aberturas, foram atualizados. Esses valores são apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Coeficiente e expoente para janelas e portas

	Coeficiente de fluxo de ar quando a abertura está fechada (kg/s.m)	Expoente de fluxo de ar quando a abertura está fechada
Janela Pivotante – eixo vertical lateral sem vedação, de madeira	0,00030	0,66

*Por falta de dados para janela de metal utilizou-se o valor da janela de madeira.

Fonte: PEREIRA *et al.*, 2013.

Estratégias de condicionamento térmico passivo

Uma estratégia de condicionamento térmico passivo adotada para melhorar o desempenho da edificação foi a substituição a pintura externa de absorvância de 0,10 para uma pintura com absorvância de 0,39 (limite aceitável para fator solar = 4,00). Outra estratégia utilizada foi a troca das paredes internas da edificação original por paredes duplas de tijolos de 6 furos de 10 x 15 x 20 cm e argamassa de emboço de 2,5 cm, conforme especificação da Figura 5.6.

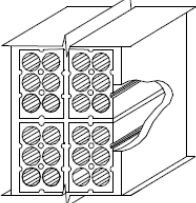
Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ [horas]
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	1,52	248	6,5

Figura 5.6 – Representação de parede para adequação da edificação

Fonte: ABNT, 2005b.

Composição da cobertura

Para atender aos valores estabelecidos de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para a cobertura da edificação substituiu-se o forro de PVC de 1 cm por um forro de gesso de 3 cm. A composição da cobertura pode ser vista na Figura 5.7. As propriedades térmicas do gesso são descritas na Tabela 5.10 e os valores de transmitância, atraso térmico e fator solar encontrados para a cobertura são descritos na Tabela 5.11.

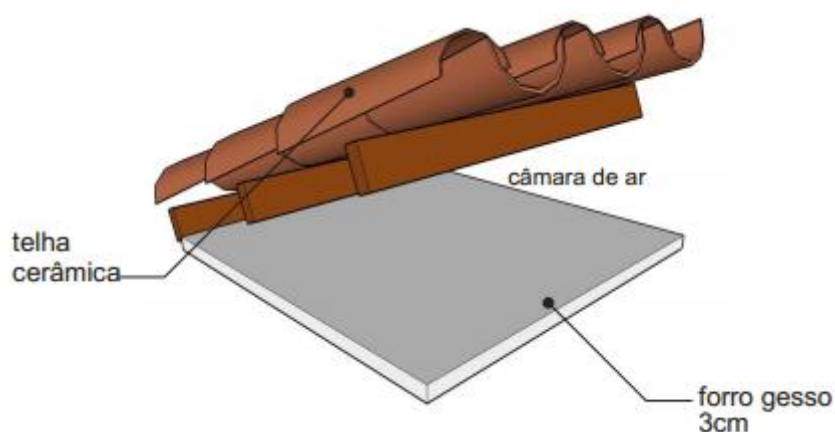


Figura 5.7 – Representação da cobertura para adequação da edificação

Fonte: Catálogo de propriedades térmicas (MORISHITA *et al.*, 2010).

Tabela 5.10 – Densidade de massa aparente (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) do gesso

Material	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	c (kJ/(kg.K))
Gesso	875	0,35	0,84

Fonte: ABNT, 2005b.

Tabela 5.11 – Resultado dos cálculos de U , ϕ e F_{s_0} para cobertura de telha cerâmica + forro de gesso

	Valores da cobertura	Valores 15.220 para Zona 3
Transmitância térmica – U (W/(m ² .K))	1,94	$U \leq 2,00$
Atraso térmico (horas) – ϕ (horas)	1,70	$\phi \leq 3,3$
Fator solar – F_{s_0} (%)	6,21	$F_{s_0} \leq 6,5$

A cobertura do banheiro não foi modificada, uma vez que a laje de concreto possui papel estrutural.

Avaliação pela ASHRAE Standard 55

Para verificar o conforto térmico da edificação foi realizada uma avaliação utilizando o modelo de conforto adaptativo descrito na ASHRAE Standard 55 (2013). A Figura 5.8

apresenta o resultado para a Sala, a Figura 5.9 para o Quarto 1 e a Figura 5.10 para o Quarto 2.

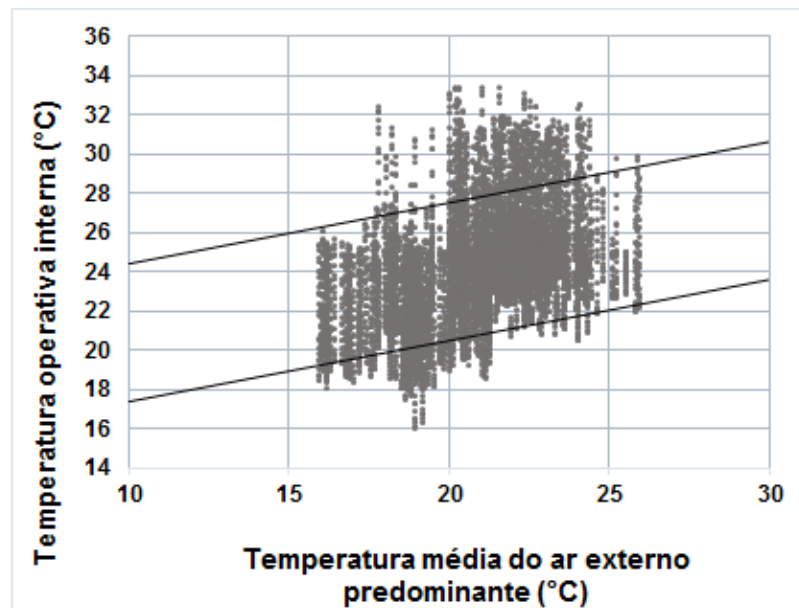


Figura 5.8 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.220 ZB3)

A Sala apresentou um total anual de 81% de horas de conforto térmico e 19% de horas de desconforto térmico. 12% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 7% representam desconforto por frio.

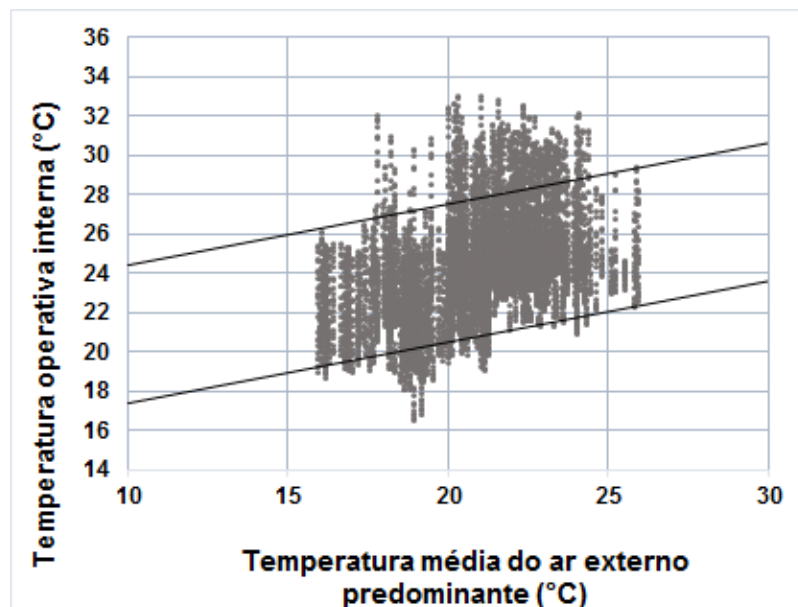


Figura 5.9 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.220 ZB3)

O Quarto 1 contou com um total anual de 84% de horas de conforto térmico e 16% de horas de desconforto térmico. 11% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 5% representam desconforto por frio.

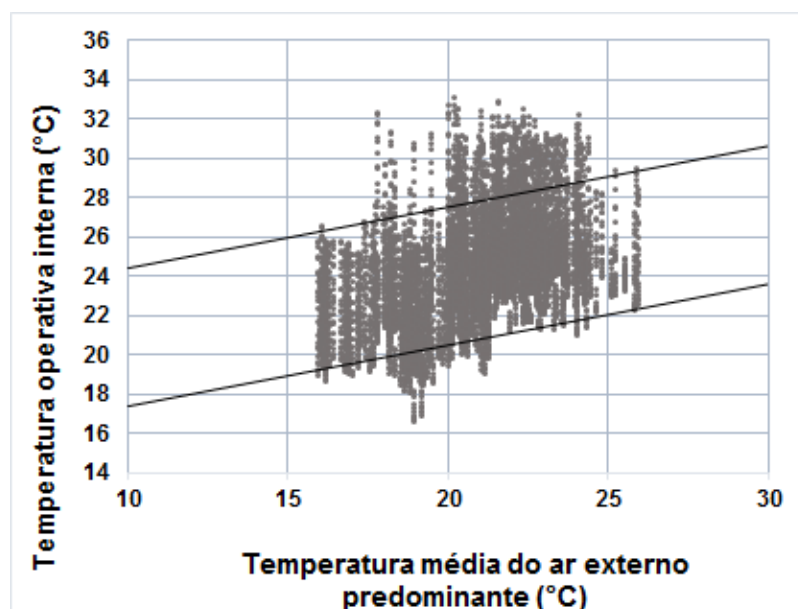


Figura 5.10 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.220 ZB3)

O Quarto 2 obteve um total anual de 84% de horas de conforto térmico e 16% de horas de desconforto térmico. 12% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 4% representam desconforto por frio.

A Figura 5.11 apresenta a variação da temperatura operativa interna dos ambientes analisados no dia típico de verão (14/01) e a Figura 5.12 no dia típico de inverno (20/05).

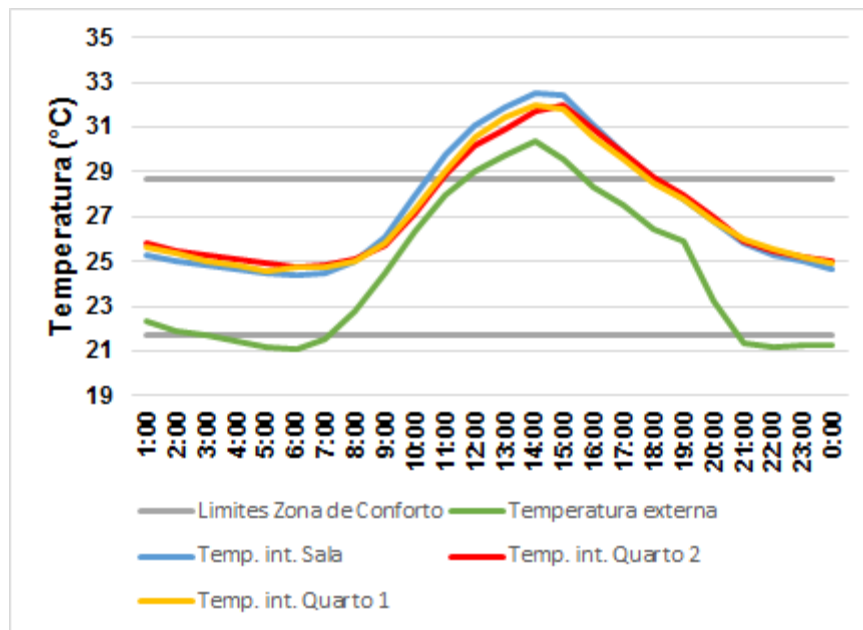


Figura 5.11 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.220 ZB3

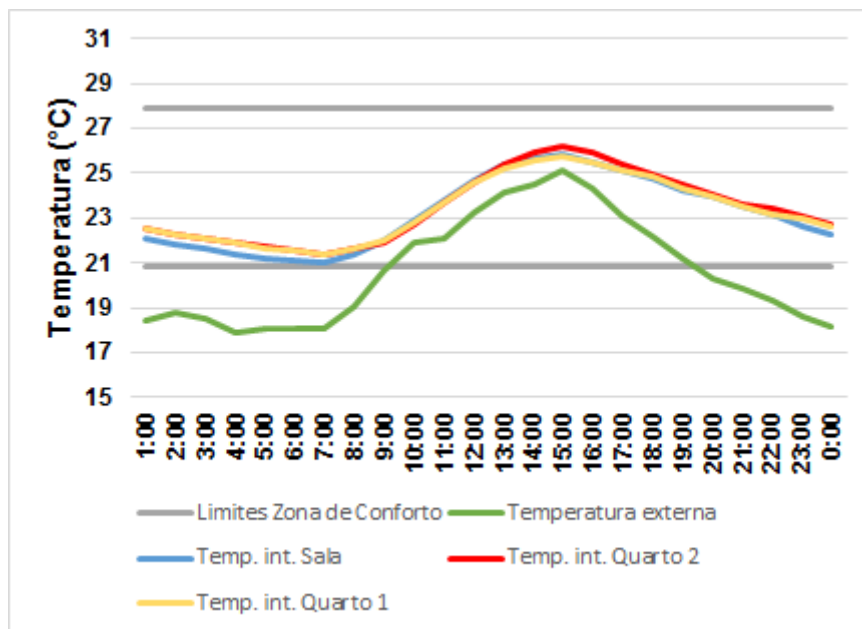


Figura 5.12 – Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB3

A partir dos resultados apresentados pode-se verificar que:

- a residência não apresenta conforto para 80% dos usuários em 100% das horas do ano;
- o desempenho térmico da edificação melhorou em relação à edificação original. A Sala e o Quarto 1 tiveram uma diminuição de 3% de horas de desconforto por frio e o Quarto 2, por sua vez, de 4%. O desconforto por calor permaneceu o mesmo em todos os ambientes;
- o desconforto térmico por frio é menor devido à substituição das paredes internas por paredes mais pesadas. A inércia térmica das paredes internas ajuda a reter calor na edificação durante o dia para ser liberado à noite, diminuindo a amplitude térmica no dia típico de inverno;
- mesmo com o aumento da área efetiva para ventilação das janelas, o desconforto por calor permaneceu o mesmo. A avaliação deste trabalho não considera o aumento do limite superior de aceitabilidade do gráfico da ASHRAE Standard 55 (2013) quando a temperatura operativa é superior a 25°C e a velocidade do ar é maior que 0,3 m/s. Caso a substituição das janelas tenha influenciado na velocidade do ar do ambiente

e a velocidade do ar tenha alcançado os 0,3 m/s, a avaliação da edificação poderia ter um resultado melhor;

- como na simulação anterior sem as adequações, a Sala é o ambiente com maior número de horas de desconforto, tanto por calor quanto por frio, por ter a maior área envidraçada (J1 e P1), o que aumenta as trocas de calor entre o ambiente interno e o externo;
- para ficar dentro da temperatura de conforto durante todas as horas do ano a edificação deveria ter uma amplitude térmica menor, ou seja, diminuir ganhos e perdas nos horários de pico.

5.1.3 Adequação da edificação para atender aos requisitos da ZB4

Neste item realizou-se uma adequação na edificação do item 4.2 para atender aos requisitos da zona bioclimática 4, zona mais adequada para a cidade de Belo Horizonte de acordo com estudo desenvolvido por Pereira e Assis (2005). Posteriormente, executou-se uma avaliação de conforto térmico segundo a ASHRAE Standard 55 (2013).

Área de abertura para ventilação

A área de abertura para ventilação exigida para a zona bioclimática 4 é igual à área exigida para a zona bioclimática 3, aberturas médias de 15% a 25% da área do piso do ambiente. Assim, foram mantidas as aberturas descritas no subitem 5.1.2.

Para a zona bioclimática 4, a norma recomenda que as aberturas sejam sombreadas. Para proporcionar esse sombreamento, foram utilizados brises nas janelas do Quarto 2 e da Cozinha, ambientes voltados para fachada noroeste, nos horários com temperatura externa alta. Para não atrapalhar sua abertura, as janelas de abrir que receberam os brises foram substituídas por janelas de correr, com as folhas correndo para fora do vão, para manter a mesma área de ventilação.

Na Figura 5.13 é possível visualizar os brise utilizados nas janelas do Quarto 2 e da Cozinha.

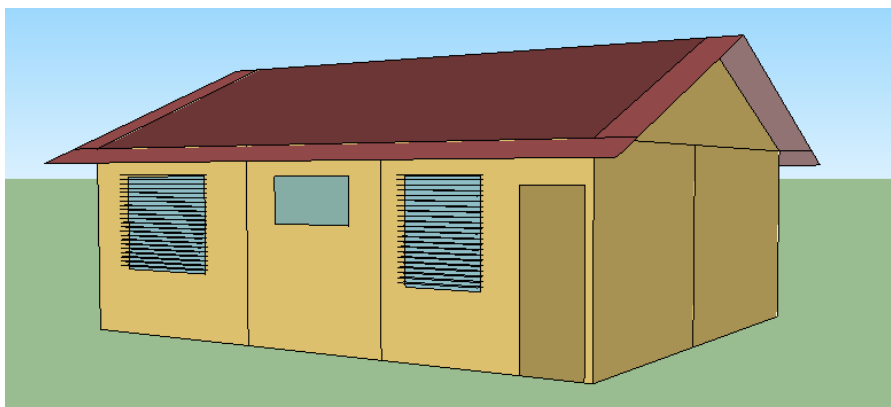


Figura 5.13 – Modelo 3d do arquivo de simulação com brises na fachada Noroeste

Estratégias de condicionamento térmico passivo

Para a zona bioclimática 4, as recomendações de aquecimento solar da edificação e vedações internas pesadas para o inverno permanecem. Por isso, manteve-se a composição das paredes internas do subitem 5.1.2 (paredes pesadas) e a absorvância das paredes externas de 0,39. Para o verão, recomenda-se ventilação seletiva (nos períodos em que a temperatura interna seja superior à externa). A rotina de ventilação utilizada na simulação computacional permitem que a ventilação aconteça dessa forma. Outra recomendação dessa zona bioclimática para o verão é o uso das estratégias de resfriamento evaporativo e massa térmica para resfriamento. Optou-se por utilizar uma estratégia de massa térmica para resfriamento através da substituição das paredes externas por paredes pesadas, conforme descrito a seguir.

Cálculo dos valores de transmitância térmica, atraso térmico e fator solar para as paredes externas e coberturas

Para atender aos requisitos da zona bioclimática 4, as paredes externas foram substituídas por paredes pesadas. A composição utilizada foi a de paredes duplas de tijolos de 6 furos, conforme especificação da Figura 5.14. A Tabela 5.12 apresenta os valores de U , ϕ e F_{so} para a parede.

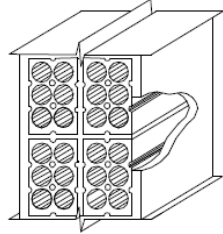
Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ [horas]
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	1,52	248	6,5

Figura 5.14 – Composição parede dupla de alvenaria de 6 furos

Fonte: ABNT, 2005c.

Tabela 5.12 – Valores de U, φ e F_{so} para parede dupla de tijolos

	Valores da parede	Valores 15.220 para Zona 4
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))	1,52	U ≤ 2,20
Atraso térmico - φ (horas)	6,50	φ ≥ 6,50
Fator solar - F _{so} (%)	2,43	F _{so} ≤ 3,50

Tanto a zona bioclimática 3 quanto a 4 recomendam coberturas leves isoladas, portanto utilizou-se uma cobertura conforme a descrição do subitem 5.1.2.

Avaliação pela ASHRAE Standard 55

Para verificar o conforto térmico da edificação foi realizada uma avaliação utilizando o modelo adaptativo descrito na ASHRAE Standard 55 (2013). A Figura 5.15 apresenta o resultado para a sala, a Figura 5.16 para o Quarto 1 e a Figura 5.17 para o Quarto 2.

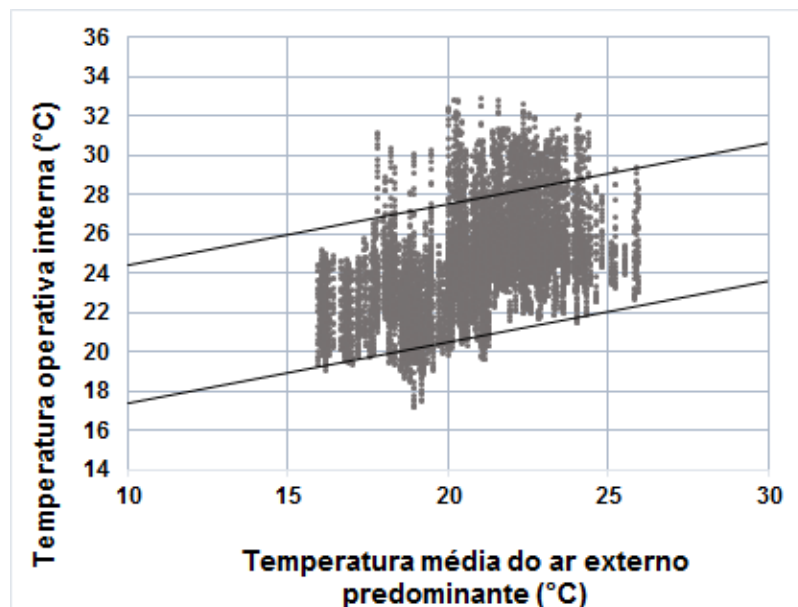


Figura 5.15 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.220 ZB4)

A Sala contou com um total anual de 86% de horas de conforto térmico e 14% de horas de desconforto térmico. 11% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 3% representam desconforto por frio.

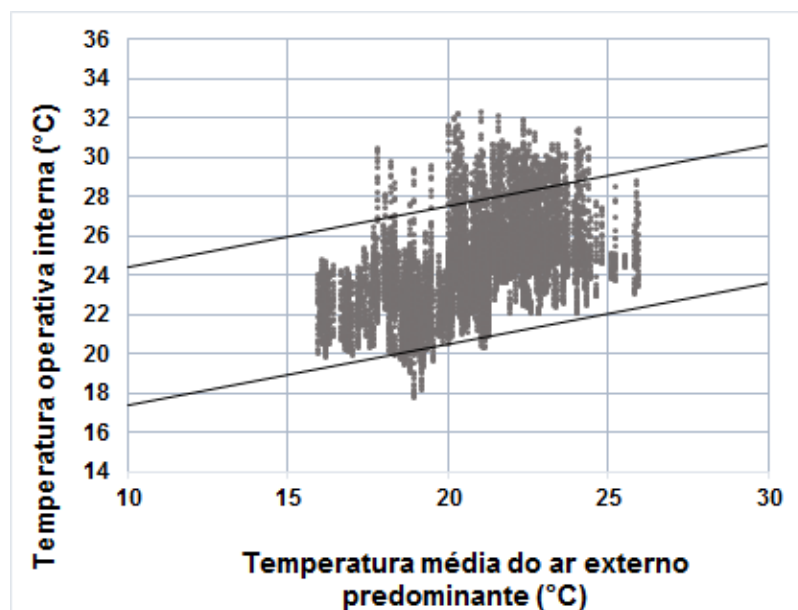


Figura 5.16 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.220 ZB4)

O Quarto 1 obteve um total anual de 90% de horas de conforto térmico e 10% de horas de desconforto térmico. 9% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 1% representam desconforto por frio.

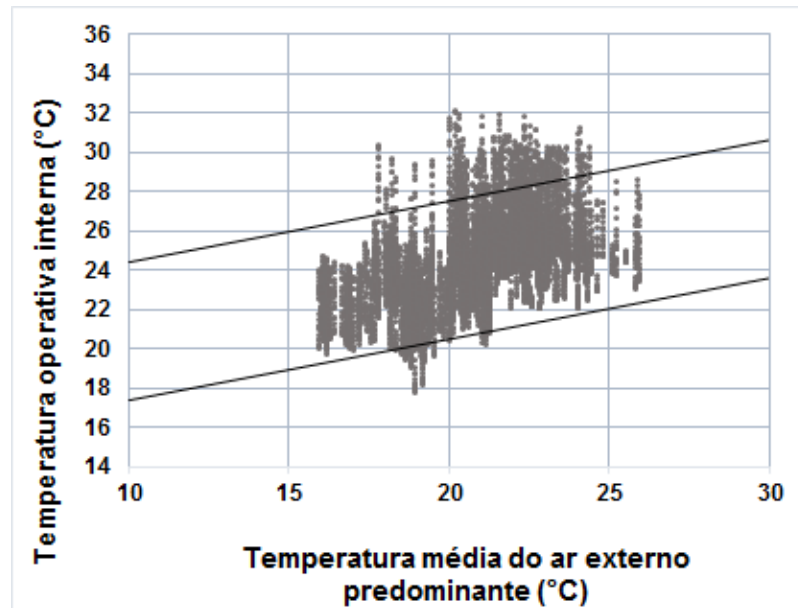


Figura 5.17 - Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.220 ZB4)

O Quarto 2 apresentou um total anual de 90% de horas de conforto térmico e 10% de horas de desconforto térmico. Das horas de desconforto, 9% representaram desconforto por calor e 1% por frio.

A Figura 5.18 apresenta a variação da temperatura operativa interna dos ambientes analisados no dia típico de verão (14/01) e a Figura 5.19 no dia típico de inverno (20/05).

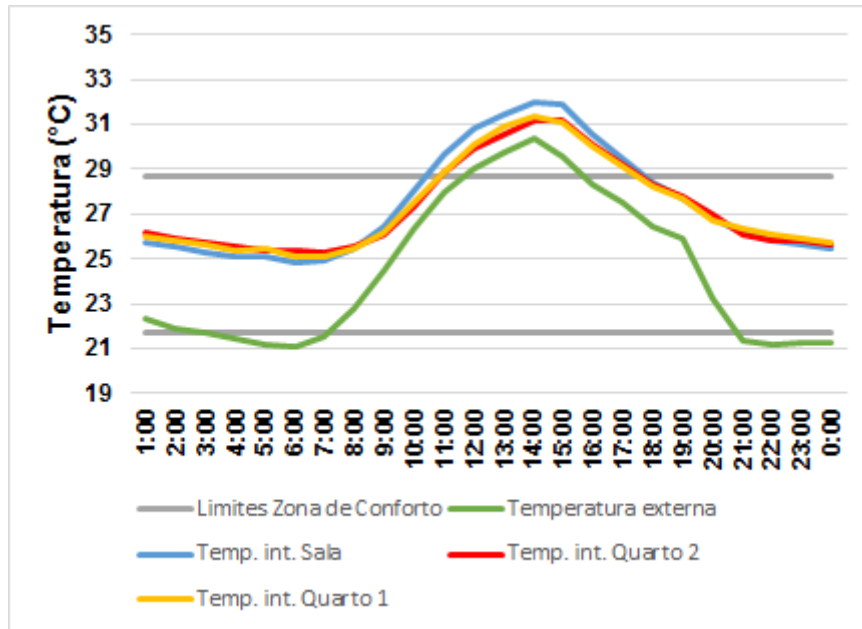


Figura 5.18 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.220 ZB4

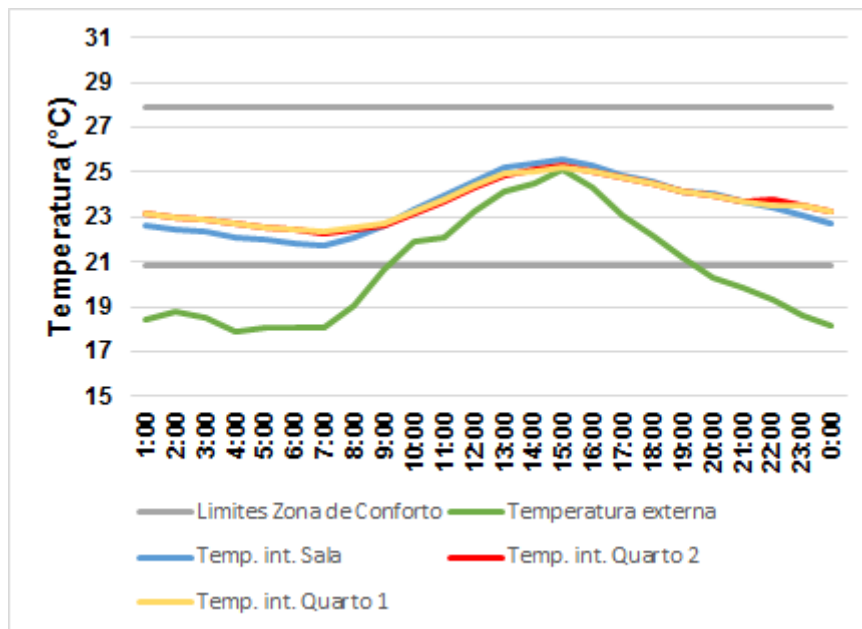


Figura 5.19 – Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB4

A partir dos resultados apresentados pode-se verificar que:

- a residência não apresenta conforto para 80% dos usuários em 100% das horas do ano;
- o desempenho térmico da edificação melhorou em relação à edificação com adequações para atender à zona bioclimática 3. Na Sala houve um decréscimo de 4% de horas de desconforto por frio e 1% de horas de desconforto por calor. No Quarto 1 houve um decréscimo de 4% de horas de desconforto por frio e de 2% de horas de desconforto por calor. No Quarto 2, por sua vez, houve uma diminuição de 3% nas horas de desconforto por frio e 3% nas horas de desconforto por calor;
- o desconforto térmico tanto por frio quanto por calor é menor devido à substituição das paredes externas por paredes mais pesadas. A inércia térmica das paredes internas e externas ajuda a reter calor na edificação durante o dia para ser liberado à noite, diminuindo a amplitude térmica tanto no verão quanto no inverno. O uso dos brises na fachada Noroeste também contribui para diminuir o ganho de calor no período da tarde;
- assim como nas duas simulações anteriores, a Sala é o ambiente com maior número de horas por desconforto, tanto por calor quanto por frio, por ter a maior área envidraçada (J1 e P1), o que aumenta as trocas de calor entre o ambiente interno e o externo;
- para aumentar a porcentagem de horas de conforto durante o ano, atendendo às recomendações para a zona bioclimática 4, a edificação poderia contar com estratégias de resfriamento evaporativo para diminuir o desconforto por calor nos horários de pico e outras estratégias de aquecimento solar passivo, como adequação da posição das superfícies envidraçadas para aumentar os ganhos solares e evitar as perdas de calor nos horários de desconforto por frio.

5.1.4 Discussão dos resultados

A edificação real, sem adequações, não atendeu a todas as recomendações da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) tanto para a zona bioclimática 3 quanto para a zona bioclimática 4.

Após a realização das adequações para atender aos requisitos da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) tanto para a ZB3 quanto para a ZB4, a porcentagem de horas de conforto obtida na avaliação de conforto térmico da edificação foi maior. Nesse sentido, é possível verificar que nos dois casos o desempenho da edificação melhorou.

A adequação da edificação que atendeu às diretrizes construtivas para a ZB4, zona proposta por Pereira e Assis (2005) como mais adequada para a cidade de Belo Horizonte, proporcionou um melhor desempenho térmico em relação à edificação adaptada para satisfazer às diretrizes construtivas para a ZB3. Essa inconsistência no zoneamento bioclimático brasileiro pode ser justificada, conforme descrito na revisão bibliográfica, pela falta de dados para elaboração do zoneamento, que agregou níveis altos de incerteza no mapa final.

5.2 NBR 15.575

5.2.1 Avaliação da edificação real

Nesta etapa foi realizada uma avaliação da edificação descrita no item 4.2 com suas características originais.

Definição da zona bioclimática

A cidade de Belo Horizonte está localizada na zona bioclimática 3, conforme a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005c).

Aberturas para ventilação

O requisito de aberturas para ventilação só se aplica aos ambientes de permanência prolongada. Para a NBR 15.575 (ABNT, 2013) esses ambientes são salas e dormitórios. O

mínimo exigido para a zona bioclimática 3 é uma área de 7% em relação à área do piso do ambiente. A Tabela 5.13 apresenta os valores das áreas para ventilação de cada ambiente.

Tabela 5.13 – Cálculo da área de ventilação para ambientes de permanência prolongada

Ambiente	Área piso (m ²)	Janela	Tipo	Área da Janela (m ²)	Área da abertura para ventilação (m ²)	A (%)
Sala	15,5	J1	Correr (45% livre)	2,4	1,08	7
Quarto 1	8,50	J2	Correr (45% livre)	1,44	0,648	8
Quarto 2	11,63	J3	Correr (45% livre)	1,8	0,81	7

Todos os ambientes atendem ao mínimo exigido pela norma.

Cálculo dos valores de transmitância térmica e capacidade térmica para as paredes externas e coberturas

A Tabela 5.14 apresenta os resultados do cálculo para as paredes externas e as Tabelas 5.15 e 5.16 para as coberturas.

Tabela 5.14 – Resultado dos cálculos de U e CT para as paredes externas

	Valores da parede	Valores 15.575 para Zona 3 (absortância de 0,20)	Atende / Não atende
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))	2,54	$U \leq 3,7$	Atende
Capacidade térmica - CT (kJ/m ² .K)	123,57	$CT \geq 130$	Não atende

As paredes externas atendem ao requisito de transmitância térmica, mas não atendem ao requisito de capacidade térmica estabelecidos para essa zona bioclimática. É necessário que seja realizada uma avaliação da edificação como um todo pelo método de simulação computacional.

Tabela 5.15 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + PVC

	Valores da cobertura	Valores mínimos 15.575 para Zona 3		Atende / Não atende
Transmitância térmica	$\alpha = 0,75$ 2,09 W/(m ² .K)	$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	Não atende
		$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	

Tabela 5.16 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + laje de concreto

	Valores da cobertura	Valores mínimos 15.575 para Zona 3		Atende / Não atende
		$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$	
Transmitância térmica	$\alpha = 0,75$ 2,05 W/(m ² .K)	$U \leq 2,3$	$U \leq 1,5$	Não atende

As coberturas não atendem ao requisito de transmitância térmica para o nível de desempenho mínimo, uma vez que o valor de absorvância da telha cerâmica é maior do que 0,6.

Resumo da avaliação pelo método simplificado da NBR 15.575

Tabela 5.17 – Resumo da avaliação pelo método simplificado da NBR 15.575

Abertura para ventilação	Parede	Cobertura	Deve-se simular o modelo para atender à norma?
Atende à % exigida.	U: Atende CT: Não atende	U: Não atende	Sim

Avaliação pelo método de simulação computacional

Os resultados para a avaliação da edificação do dia típico de inverno são mostrados na Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22.

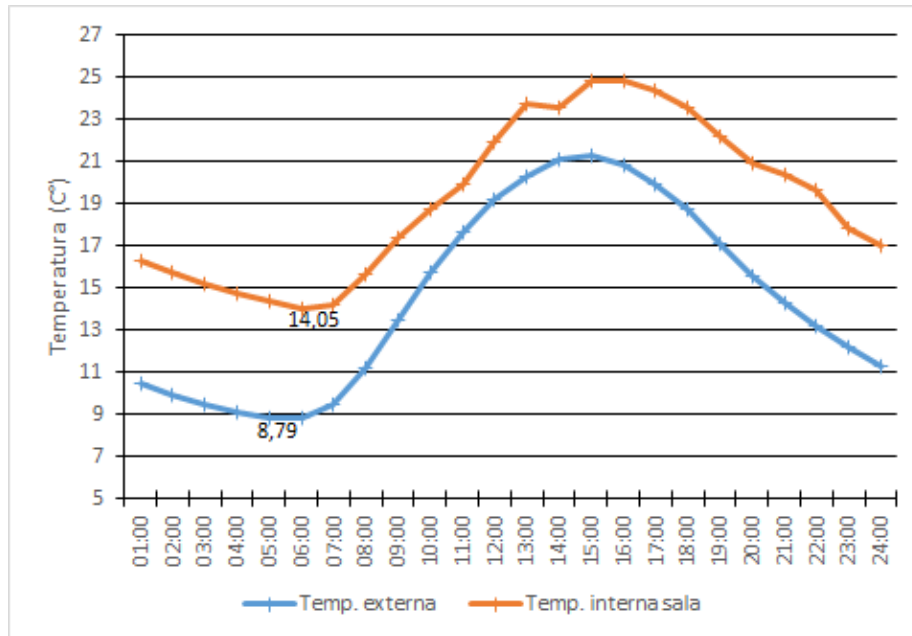


Figura 5.20 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para a Sala

A Sala apresentou uma diferença de 5,26°C entre o valor mínimo diário da temperatura interna e o valor mínimo diário da temperatura externa. O nível de desempenho alcançado foi o intermediário.

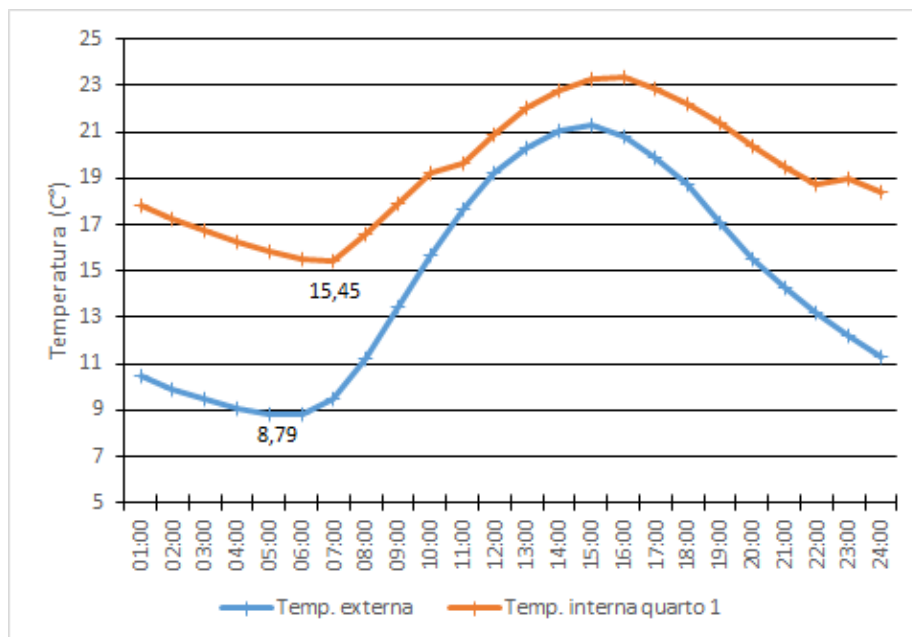


Figura 5.21 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para o Quarto 1

O Quarto 1 apresentou uma diferença de 6,66°C entre o valor mínimo diário da temperatura interna e o valor mínimo diário da temperatura externa, conseguindo um desempenho intermediário.

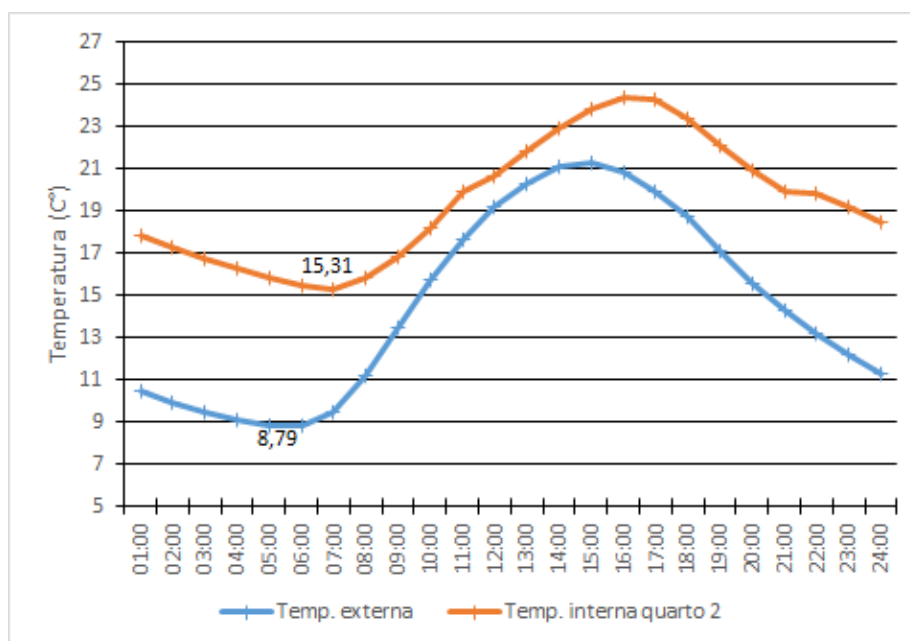


Figura 5.22 – Perfil de temperatura do dia típico de inverno para o Quarto 2

O Quarto 2 apresentou uma diferença de 6,52°C entre o valor mínimo diário da temperatura interna e o valor mínimo diário da temperatura externa, também atingindo um desempenho intermediário.

A Tabela 5.18 exibe os níveis alcançados por ambiente para o dia típico de inverno.

Tabela 5.18 - Níveis de desempenho alcançados no dia típico de inverno

	Sala	Quarto 1	Quarto 2
Nível de desempenho NBR 15.575	Intermediário	Intermediário	Intermediário

Pode-se concluir que a edificação atende ao mínimo exigido pela norma no método de simulação computacional para o dia típico de inverno.

Os resultados para a avaliação do dia típico de verão são apresentados na Figura 5.23, Figura 5.24 e Figura 5.25.

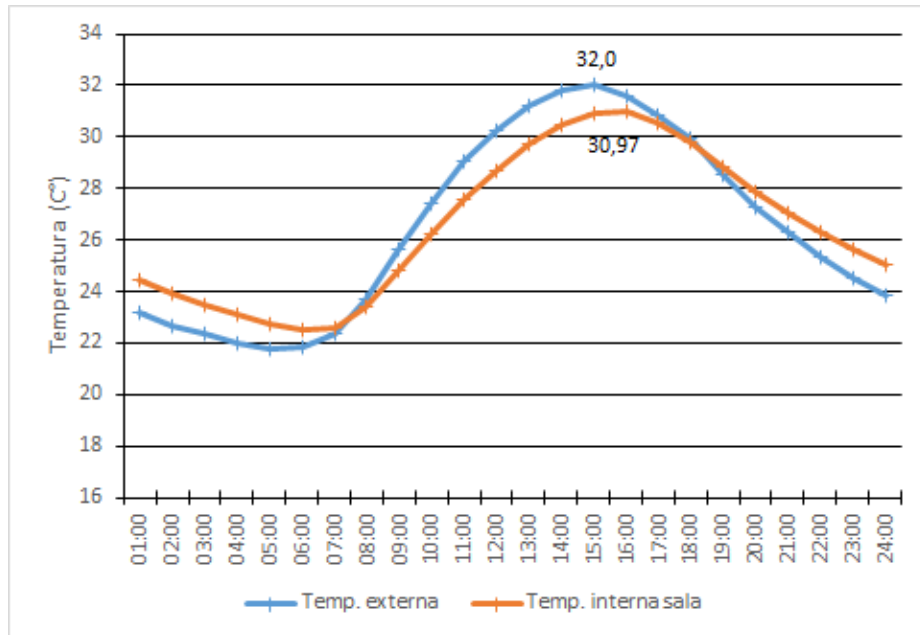


Figura 5.23 - Perfil de temperatura do dia típico de verão para a Sala

A diferença entre o valor máximo diário da temperatura interna da Sala e o valor máximo diário da temperatura externa foi de 1,03°C. Assim, o ambiente conseguiu um desempenho mínimo.

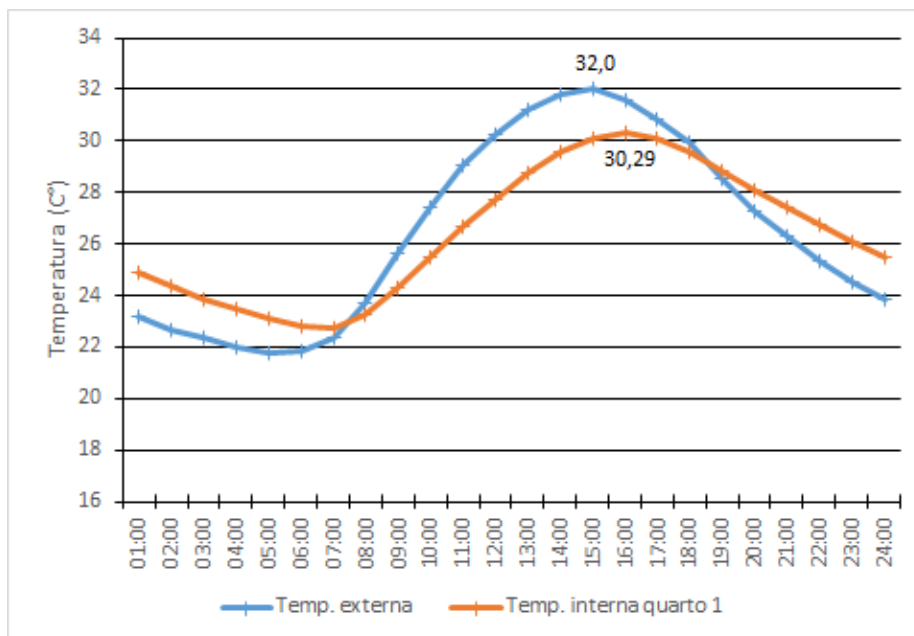


Figura 5.24 – Perfil de temperatura do dia típico de verão para o Quarto 1

O Quarto 1 apresentou uma diferença de $1,71^{\circ}\text{C}$ entre o valor máximo diário da temperatura interna e o valor máximo diário da temperatura externa, alcançando um desempenho mínimo.

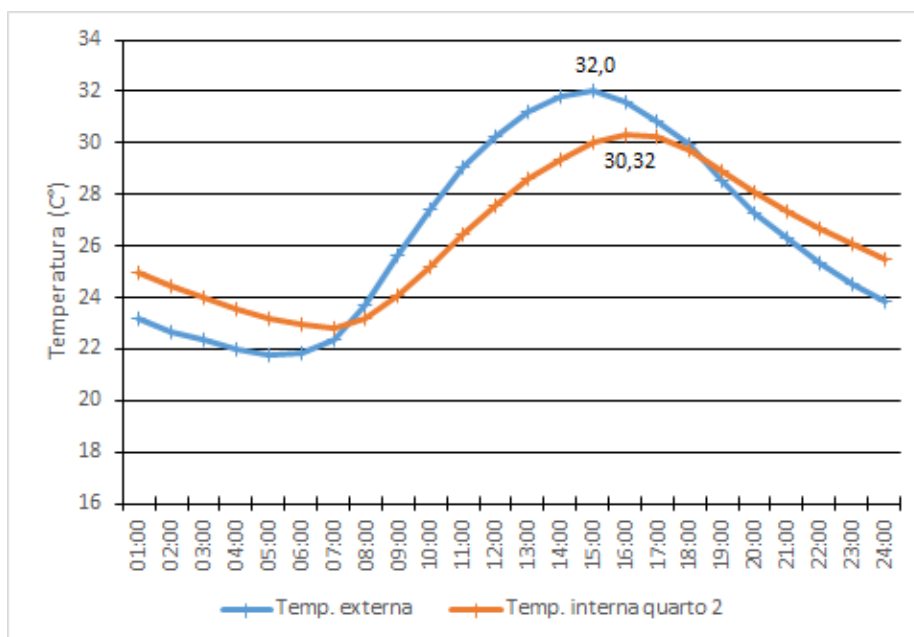


Figura 5.25 – Perfil de temperatura do dia típico de verão para o Quarto 2

O Quarto 2 apresentou uma diferença de 1,68°C entre os valores máximos diários da temperatura interna e da temperatura externa, também alcançando um desempenho mínimo.

A Tabela 5.19 apresenta os níveis alcançados por ambiente para o dia típico de verão.

Tabela 5.19 - Níveis de desempenho alcançados no dia típico de verão

	Sala	Quarto 1	Quarto 2
Nível de desempenho NBR 15.575	Mínimo	Mínimo	Mínimo

O valor máximo diário da temperatura do ar no interior de todos os ambientes de permanência prolongada para o dia típico de verão é menor do que o valor máximo diário de temperatura do ar externo. Portanto, pode-se concluir que a edificação atende ao exigido pela NBR 15.575 (ABNT, 2013) no método de simulação computacional.

5.2.2 Adequação da edificação para atender aos requisitos mínimos do método simplificado

A avaliação da edificação em estudo quanto ao método simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2013) indica que a edificação não atende aos requisitos para desempenho mínimo descritos pela norma. Os valores de capacidade térmica para as paredes externas e de absorvância térmica para as coberturas não estão de acordo com a norma. Ainda que a edificação tenha atendido ao procedimento por simulação computacional, neste subitem a edificação foi adequada para atender aos parâmetros do procedimento simplificado. Posteriormente foi realizada uma nova avaliação utilizando a ASHRAE Standard 55 (2013) para verificar o impacto dessa adequação no conforto térmico da edificação.

Aberturas para ventilação

A área de abertura para ventilação da edificação original atende à área mínima exigida, aberturas de no mínimo 7% da área do piso do ambiente. Assim, foram mantidas as mesmas aberturas.

Cálculo dos valores de transmitância térmica e capacidade térmica para as paredes externas e coberturas

Para atender aos requisitos do método prescritivo da NBR 15.575 (ABNT, 2013), substituiu-se a cobertura com telhas cerâmicas com absorvância de 0,80 por uma cobertura com telhas cerâmicas com absorvância de 0,50. A Tabela 5.20 e a Tabela 5.21 mostram os resultados dessa alteração.

Tabela 5.20 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + PVC

	Valores da cobertura	Valores 15.575 para Zona 3		Atende / Não atende
Transmitância térmica	$\alpha = 0,5$ 2,09 W/(m ² .K)	$\alpha \leq 0,6$ U \leq 2,3	$\alpha > 0,6$ U \leq 1,5	Atende

Tabela 5.21 – Resultado do cálculo de U para cobertura de telha cerâmica + laje de concreto

	Valores da cobertura	Valores 15.575 para Zona 3		Atende / Não atende
Transmitância térmica	$\alpha = 0,5$ 2,05 W/(m ² .K)	$\alpha \leq 0,6$ U \leq 2,3	$\alpha > 0,6$ U \leq 1,5	Atende

Para cumprir com os valores mínimos de capacidade térmica para as paredes externas, manteve-se a mesma composição, apenas modificou-se espessura da argamassa de emboço interna e externa para 2,5 cm. A Figura 5.26 representa a composição final das paredes e a Tabela 5.22 apresenta os valores de transmitância térmica e capacidade térmica encontrados.

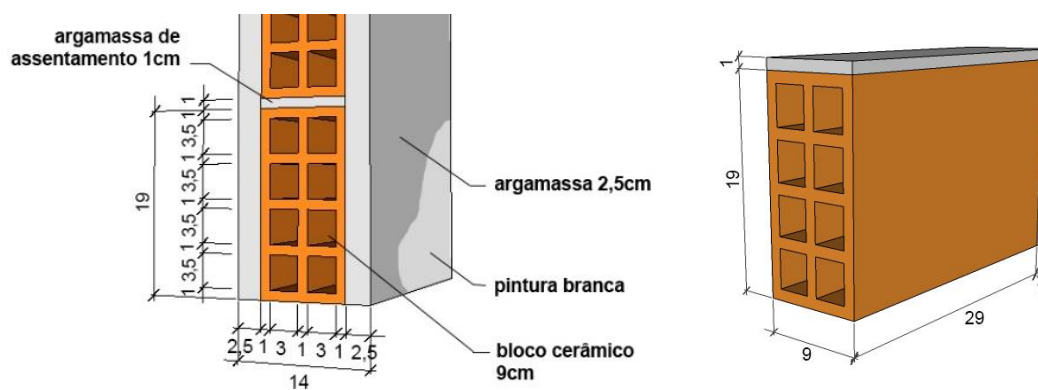


Figura 5.26 – Representação de parede para adequação da edificação

Tabela 5.22 – Resultado dos cálculos de U e CT para as paredes externas

	Valores da parede	Valores 15.575 para Zona 3 (absortância de 0,20)	Atende / Não atende
Transmitância térmica - U (W/(m ² .K))	2,40	$U \leq 3,7$	Atende
Capacidade térmica - CT (kJ/m ² .K)	165,97	$CT \geq 130$	Atende

Avaliação pela ASHRAE Standard 55

Para verificar o conforto térmico da edificação foi realizada uma avaliação utilizando o modelo adaptativo descrito na ASHRAE Standard 55 (2013). A Figura 5.27 apresenta o resultado para a Sala, a Figura 5.28 para o Quarto 1 e a Figura 5.29 para o Quarto 2.

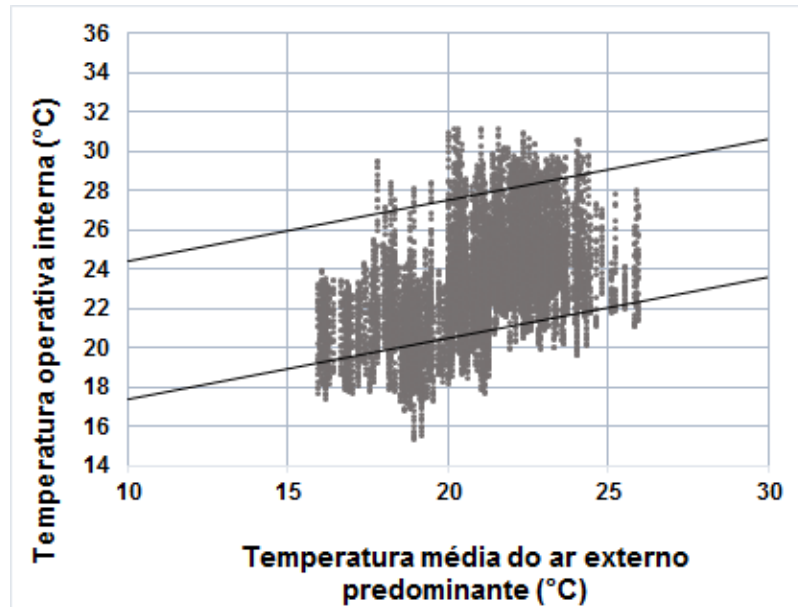


Figura 5.27 – Resultado da ASHRAE 55 para Sala (adequação requisitos 15.575)

A Sala contou com um total anual de 80% de horas de conforto térmico e 20% de horas de desconforto térmico. 6% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 14% representam desconforto por frio.

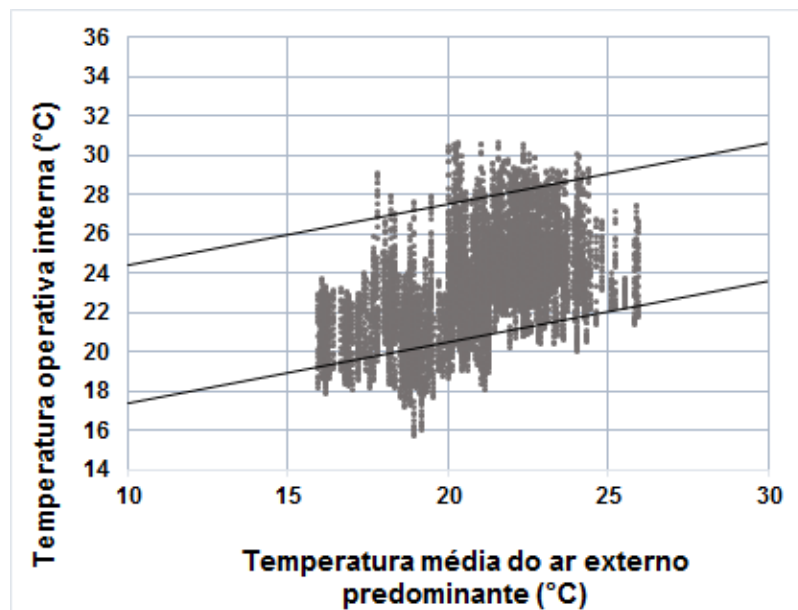


Figura 5.28 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 1 (adequação requisitos 15.575)

O Quarto 1 obteve um total anual de 84% de horas de conforto térmico e 16% de horas de desconforto térmico. 5% das horas de desconforto representam desconforto por calor e 11% representam desconforto por frio.

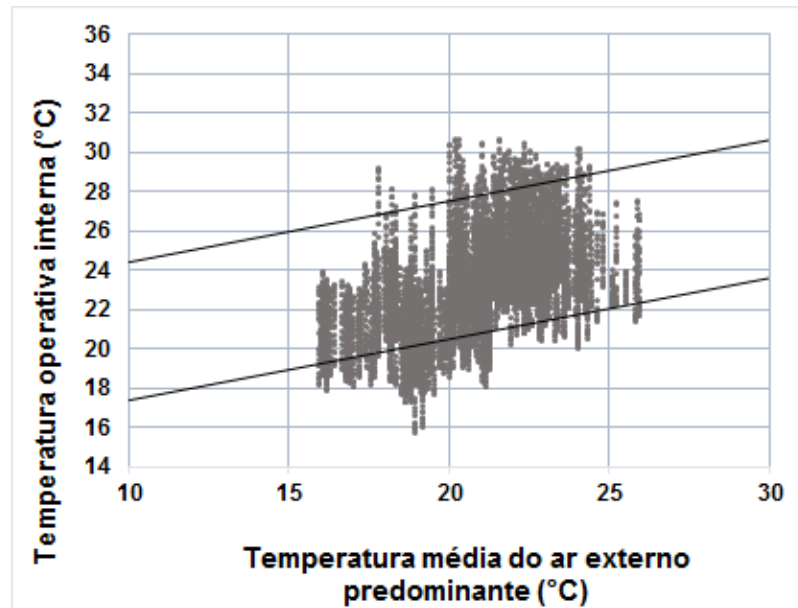


Figura 5.29 – Resultado da ASHRAE 55 para Quarto 2 (adequação requisitos 15.575)

O Quarto 2 apresentou um total anual de 84% de horas de conforto térmico e 16% de horas de desconforto térmico. Das horas de desconforto, 5% representaram desconforto por calor e 11% por frio.

A Figura 5.30 apresenta a variação da temperatura operativa interna dos ambientes analisados no dia típico de verão (14/01) e a Figura 5.31 no dia típico de inverno (20/05).



Figura 5.30 – Variação da temperatura no dia típico de verão (14/01) – adequação requisitos 15.575

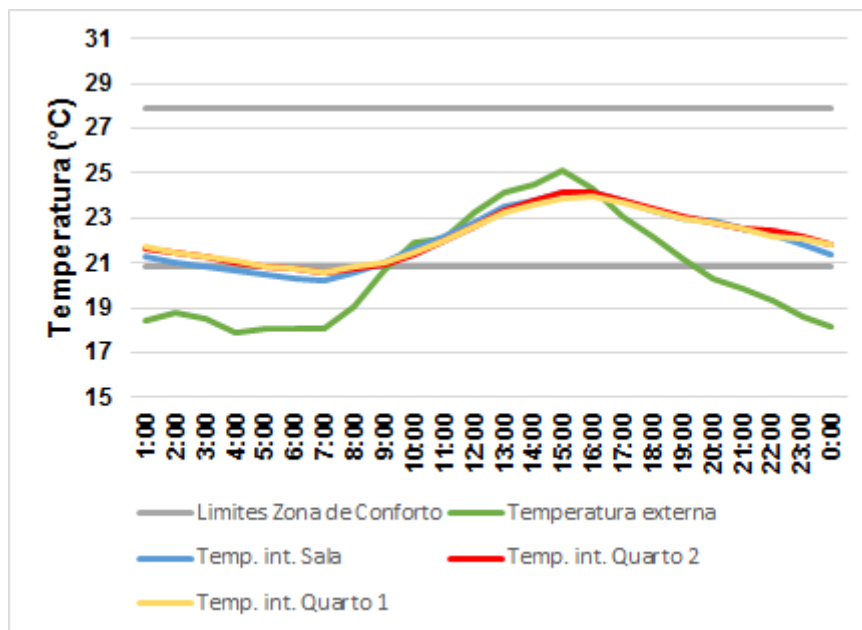


Figura 5.31 - Variação da temperatura no dia típico de inverno (20/05) – adequação requisitos 15.220 ZB4

A partir dos resultados apresentados verificar-se que:

- a residência não apresenta conforto para 80% dos usuários em 100% das horas do ano;
- o desempenho térmico da edificação, como um todo, melhorou em relação à edificação original. A Sala teve um decréscimo de 6% de horas de desconforto por calor, no entanto houve um aumento de 4% de horas de desconforto por frio. O Quarto 1 teve um decréscimo de 6% de horas de desconforto por calor e um aumento de 3% de horas de desconforto por frio. O Quarto 2 teve um decréscimo de 7% de horas de desconforto por calor e um aumento de 3% de horas de desconforto por frio;
- o desconforto térmico por calor diminuiu significativamente com a substituição da cobertura por telhas cerâmicas mais claras. Essa estratégia se mostra muito eficiente para melhorar o desempenho da edificação quanto ao desconforto por calor. No entanto, o desconforto por frio aumenta com a diminuição de ganho de calor em horários onde a temperatura externa é baixa;
- como nas simulações anteriores, a Sala é o ambiente com maior número de horas por desconforto, tanto por calor quanto por frio, por ter a maior área envidraçada (J1 e P1), o que aumenta as trocas de calor entre o ambiente interno e o externo;
- para ficar dentro da temperatura de conforto durante todo o ano a edificação deveria ter uma amplitude térmica menor, ou seja, diminuir ganhos e perdas nos horários de pico.

5.2.3 *Discussão dos resultados*

A edificação real não atendeu aos requisitos da NBR 15.575 (ABNT, 2013) no procedimento simplificado. No entanto, a edificação conseguiu o desempenho mínimo exigido no procedimento por simulação computacional.

Na avaliação da edificação pelo método de simulação computacional a NBR 15.575 (ABNT, 2013) apresenta deficiências. Nesse trabalho, os dados de dia típico de projeto, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos, tipo de céu foram obtidos pelo autor de forma

autônoma, sem qualquer referência à norma. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) também não especifica a condição do piso que deve ser adotada. A norma determina que na avaliação do dia típico de verão não devem ser consideradas cargas internas, no entanto não especifica se as cargas internas devem ser consideradas ou não no dia típico de inverno. Essa falta de dados e de definições deixa margens para a interpretação do profissional que realiza o estudo e compromete o resultado. A avaliação de apenas dias típicos de verão e inverno sem considerar o funcionamento real da edificação, como a influência da presença de cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos) e o uso de estratégia de ventilação natural não é a mais apropriada para avaliar o desempenho térmico da habitação.

Após realizada a adequação na edificação para atender as diretrizes construtivas do procedimento simplificado, o desempenho térmico da edificação encontrado foi superior à edificação original. A estratégia de limitar o valor da absorvância térmica da cobertura melhorou de forma significativa o conforto térmico dos usuários no verão.

6. CONCLUSÕES

O desempenho térmico das edificações que passaram por adequações para atender às diretrizes construtivas do procedimento prescritivo das normas de desempenho térmico brasileiras, NBR 15.575 (ABNT, 2013) e NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c), se apresentou superior ao desempenho térmico da edificação real, que não atendeu aos requisitos prescritivos das normas. A edificação real atendeu apenas ao procedimento por simulação computacional da NBR 15.575 (ABNT, 2013), onde obteve um desempenho intermediário no inverno e mínimo no verão.

Na avaliação de conforto térmico realizada neste trabalho, a edificação que teve melhores resultados foi a adequada para atender às recomendações da NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para a zona bioclimática 4. No entanto, a estratégia de limitar o valor da absorvância térmica da cobertura, utilizada pelo método simplificado da NBR 15.575 (ABNT, 2013) mostra melhorar de forma significativa o conforto térmico dos usuários no verão. O fator solar estabelecido pela NBR 15.220 (ABNT, 2005c) para as zonas bioclimática 3 e 4 não proporcionou essa limitação.

Na análise segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005a, 2005b, 2005c) verifica-se uma inconsistência no zoneamento bioclimático brasileiro, uma vez que o atendimento às diretrizes construtivas para a ZB4 proporciona um melhor desempenho térmico em relação à edificação adaptada para atender às diretrizes construtivas para a ZB3.

Na avaliação segundo a NBR 15.575 (ABNT, 2013) é possível verificar que a norma não disponibiliza todos os dados necessários para utilizar o método de simulação computacional, o que torna o processo impreciso. A avaliação de apenas dias típicos de verão e inverno sem considerar o funcionamento real da edificação, como a influência da presença de cargas internas e de estratégias de ventilação natural, não é a mais apropriada para avaliar seu desempenho térmico.

A aplicabilidade do modelo de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013) possui limitações. Neste trabalho o modelo de conforto adaptativo foi adotado para avaliar o desempenho de uma edificação residencial, onde os usuários desempenham atividades sedentárias, no entanto, as taxas de metabolismo dessas atividades são menores do que as aceitas pela ASHRAE Standard 55 (2013). Além disso, outra limitação da ASHRAE Standard 55 (2013) pode ser observada. Segundo Halawa e Van Hoof (2012) e Jeffe e Westphal (2014) a influência da umidade relativa na determinação da zona de conforto não é considerada pelo gráfico da ASHRAE Standard 55 (2013).

Nesse sentido, acredita-se que os esforços para revisão do zoneamento bioclimático brasileiro, utilizado em ambas as normas NBR 15.220 (ABNT, 2005c) e NBR 15.575 (ABNT, 2013), devem continuar para melhorar a representação das zonas bioclimáticas e diminuir as limitações dos métodos prescritivos. A NBR 15.575 (ABNT, 2013) deve ser acrescida com os dados e definições necessários para realizar a simulação computacional. Também deve ser revista de forma a possibilitar uma avaliação anual, e não apenas dos dias típicos, e que considere o uso real da edificação. E por fim, o modelo de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2013) deve ser aprimorado para diminuir suas limitações.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15.220-1: Desempenho térmico de edificações*: Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005a. 7 p.

_____. *NBR 15.220-2: Desempenho térmico de edificações*: Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b. 21 p.

_____. *NBR 15.220-3: Desempenho térmico de edificações*: Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c. 23 p.

_____. *NBR 15.575: Coletânea de Normas Técnicas: Edificações Habitacionais – Desempenho*. Rio de Janeiro, 2008.

_____. *NBR 15.575: Coletânea de Normas Técnicas: Edificações Habitacionais – Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013. 312 p.

ANSI/ASHRAE – AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE/AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. *ANSI/ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, 2004.

_____. *ANSI/ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, 2010.

_____. *ANSI/ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Atlanta, 2013.

_____. *Handbook of Fundamentals*. Atlanta: ASHRAE, 2009. 926 p.

Analysis Bio: software livre. Versão 2.2. Florianópolis: UFSC, 2010. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/softwares/analysis-bio>>. Acesso em: 5 jan. 2014.

BARBOSA, M. J. *Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares*. 1997. 277 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BATISTA, J. O.; PEIXOTO, I. M. L.; CAVALCANTE, K. E. L.; LIMA, I. M. Desempenho térmico de habitação multifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida em Maceió – AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC/UFAL, 2014. p. 409-410.

BRAGER, G. S.; DE DEAR, R. Climate, Comfort, & Natural Ventilation: A new adaptive comfort standard for ASHRAE Standard 55. In: MOVING THERMAL COMFORT STANDARDS INTO THE 21ST CENTURY, 2001, Windsor. *Proceedings...* Windsor: Oxford Brookes University, 2001. p. 1-18.

BRITO, A. C.; AKUTSU, M.; VITTORINO, F.; AQUILINO, M. M. 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, 14., 2012, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 3191-3193.

CLARKE, J. A. *Energy Simulation in Building Design*. 2. ed. Glasgow: Routledge, 2001. 384 p.

CSIRO Australian Commonwealth Scientific and Industrial. Research Organization. *AccuRate manual*. Australia, 2004.

CURCIO, D. R. *Desempenho termo-energético de Habitações de Interesse Social produzidas pelo Programa de Arrendamento Residencial – PAR na cidade de Pelotas/RS*. 2011. 180 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

DE DEAR, R.; BRAGER, G.; COOPER, D. *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and preference*. Final Report, ASHRAE RP-884. Sydney: Macquire University, 1997.

DIAS, S. A. *Avaliação do desempenho térmico de coberturas metálicas utilizadas em edificações estruturadas em aço*. 2011. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

DOE – DEPARTMENT OF ENERGY – ENERGY. *Programa EnergyPlus – versão 8.1*. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: 5 dez. de 2013.

DOE – DEPARTMENT OF ENERGY. Lecture 8: Schedules and Internal Heat Gains. 2003. Documento disponibilizado pelo LABEEE/UFSC da matéria de Análise Térmica de Edificações. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/antigo/pos-graduacao/ecv_4202/ecv4202_doc.html>. Acesso em: 20 dez. 2013.

DONG, X.; SOEBARTO, V.; GRIFFITH, M. Achieving thermal comfort in naturally ventilated rammed earth houses. *Energy and Building*, v. 82, p. 588-598, out. 2014.

EDSL - ENVIRONMENTAL DESIGN SOLUTIONS LIMITED. *Tas Software*. Disponível em <<http://www.edls.net/>>. Acesso em: 05 mai. de 2015.

ELETROBRÁS. Tabela de estimativa de consumo médio mensal de eletrodomésticos de acordo com um uso hipotético. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/>> Acesso em: 20 dez. 2013.

ENERGYPLUS. *Input Output Reference: The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output*. California: US Department of Energy, 2013b. 2205 pg. Manual do programa EnergyPlus.

ENERGYPLUS. *EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations*. California: US Department of Energy, 2013a. 1375 p. Manual do programa EnergyPlus.

FERREIRA, C. C.; PEREIRA, I. M. Avaliação do desempenho térmico de habitação de interesse social de acordo com a NBR 15575, para as diversas zonas bioclimáticas. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 3590-3595.

FIGUEIREDO, C.; FROTA, A. B. Ventilação Natural para Conforto Térmico em Edifícios de Escritórios – Avaliação com Modelos Adaptativos. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DA ARQUITETURA E URBANISMO DA USP ESPAÇO SUSTENTÁVEL: INOVAÇÕES EM EDIFÍCIOS E CIDADES, 7, 2008, São Paulo. *Anais eletrônicos...* São Paulo: USP, 2008. Disponível em: <<http://www.usp.br/nutau/CD/>>. Acesso em: 3 de out. 2013.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. *Manual de Conforto Térmico*. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 244 p.

GIVONI, B. Comfort Climate Analysis and Building Design Guidelines. *Energy and Buildings*, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GRIGOLETTI, G.; ROTTA, R.; MULLER, S. Avaliação de desempenho térmico de edificação de interesse social unifamiliar em Santa Maria – RS. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 10. 2009, Natal. *Anais...* Natal: ANTAC, 2009. p. 642-650.

HALAWA, E.; VAN HOOFF, J. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *Energy and Building*, v. 51, p. 101-110, ago. 2012.

HENSEN, J. L. M.; LAMBERTS, R. *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Oxon: Spon Press, 2011. 507 p.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. Portaria n.º 449, 25 de novembro de 2010. *Regulamento Técnico da Qualidade para o nível de eficiência energética de edificações residências*. Rio de Janeiro, 2010.

_____. *Requisitos Técnicos de Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Residenciais - RTQ-R*. Rio de Janeiro, 2012. 138 p.

ISO - International Standards Organization. *ISO Standard 7730: Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. Geneva, 2005.

JEFFE, A. P. M.; WESTPHAL, F. S. Desempenho térmico de um ambiente corporativo naturalmente ventilado em Florianópolis, SC. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC/UFAL, 2014. p. 163-172.

LAMBERTS, R.; CÂNDIDO, C.; DE DEAR, R.; VECCHI, R. *Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC, 2013. 123 p. Relatório. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Towards_a_Brazilian_Standard_Complete_Version.pdf>. Acesso em: 5 nov. de 2014.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência Energética na Arquitetura*. 3 ed. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2014a. 366 p. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2014.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PAPST, A. L.; CARLO, J. C.; BATISTA, J. O.; MARINOSKI, D. L.; NARANJO, A. *Desempenho Térmico de Edificações*. Florianópolis: Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia da UFSC, 2011. 196 p. Apostila da Disciplina Desempenho térmico de Edificações. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br>>. Acesso em: 12 dez. de 2013.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C. D.; BATISTA, J. O. *Casa Eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo-Energético*. Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2010. 4 v. 53 p. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_IV_WEB.pdf>. Acesso em: 5 jan. 2014.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S.; VECCHI, D. R. *Conforto e Stress Térmico*. Florianópolis: Centro Tecnológico – Departamento de Engenharia da UFSC, 2014b. 140 p. Apostila da Disciplina de Conforto Ambiental. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila%20Conforto%20T%C3%A9rmico%202014.pdf>>. Acesso em: 29 mar. de 2015.

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 NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2011, Búzios. *Anais...* Búzios: ANTAC, 2011. p. 1-10.

MARCONDES, M. P. *et al.* Conforto e desempenho térmico nas edificações do novo centro de pesquisas da Petrobrás no Rio de Janeiro. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 1. p. 7-29, jan./mar. 2010.

MARTINS, T.; BITTENCOURT, L.; KRAUSE, C. Contribuição ao zoneamento bioclimático brasileiro: reflexões sobre o semiárido nordestino. *Ambiente construído*, Porto Alegre, v. 12, n. 2, p. 59-75, 2012.

MATOS, M. *Simulação computacional do desempenho térmico de residências em Florianópolis utilizando a ventilação natural*. 2007. 97 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MAZZAFERRO, L.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. *Manual de simulação computacional de edifícios com uso do pré-processador Slab no programa EnergyPlus*. Florianópolis: LABEEEE/UFSC, 2013. 29 p.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MENEZES, M. S. *Avaliação do desempenho térmico de habitações sociais de Passo Fundo – RS*. 2006. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

MORISHITA, C.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. *Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas*. Florianópolis: UFSC/LabEEE, 2010. 4 v. 13 p.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*, v. 36, n. 7, p. 628–637, 2004.

OLIVEIRA, L.; SILVA, A. C. S. B.; PINTO, M. M. Avaliação dos limites das propriedades térmicas dos fechamentos opacos da NBR 15220-3, para habitações de interesse social, da zona bioclimática 2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 15., 2014, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC/UFAL, 2014. p. 273-274.

OLIVEIRA, R. D.; SOUZA, R. V. G.; SILVA, R. M. Desempenho térmico: Qual valor devemos atender para a legislação brasileira? In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2013, Brasília. *Anais...* Brasília: ANTAC/FAU, 2013. p. 1-10.

ORDENES, M.; PEDRINI, A.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. *Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no VisualDoe-3.1*. Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2003. 19 p.

PAPST, A. L. *Uso da inércia térmica no clima subtropical: Estudo de caso em Florianópolis – SC*. 1999. 180 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PEREIRA, H. A. C.; MELO, A. P.; SORGATO, M. J.; VERSAGE R.; MATOS, M.; LAMBERTS, R.. *Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus*. Florianópolis: LABEEE/UFSC, 2013. 56 p.

PEREIRA, I.; ASSIS, E. S. Discussão da classificação bioclimática de Belo Horizonte proposta pelo projeto de norma de desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC/UFAL, 2005. p. 1490-1498.

PEREIRA, I.; FERREIRA, C. Avaliação dos impactos da ABNT NBR 15575 no conforto térmico e no consumo de energias nas novas edificações habitacionais brasileiras. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., 2014, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC/UFAL, 2014. p. 518-527.

RAMOS, J. G. L. *Efeito da inércia térmica em edifício de escritórios: Estudo de caso em Belo Horizonte, MG*. 2010. 161 f. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

RORIZ, M. *Arquivos climáticos de Municípios Brasileiros*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. 2012a. Disponível em <<http://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>>. Acesso em dez. 2013.

RORIZ, M. *Classificação de Climas do Brasil – Versão 3.0*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos, 2014. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/Climas_v3.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2015.

RORIZ, M. *Segunda proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos, 2012c. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento.pdf>>. Acesso em: 5 mai. 2015.

RORIZ, M. *Uma proposta de revisão do Zoneamento Bioclimático Brasileiro*. ANTAC – Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Carlos, 2012b. Disponível em: http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Proposta_Revisao_Zoneamento_Bioclimate.pdf>. Acesso em: 5 mai. 2015.

RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 5., 1999, Fortaleza. *Anais...* Fortaleza: ANTAC, 1999. Artigo n. 288. 8 p.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Análise comparativa dos resultados do desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial pelos métodos de simulação do RTQ-R e da NBR 15575-1. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 213-230, jan./mar. 2014.

SILVA, V. A. M. *Influência da cobertura do céu na estimativa da radiação solar utilizando modelo digital de elevação*. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

Sol-Ar: software livre. Versão 6.2 Santa Catarina: UFSC, 2009. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br>>. Acesso em: 5 jan. 2014.

SORGATO, M. J. *et al. Nota Técnica Referente à Avaliação Para a Norma de Desempenho NBR 15575 em Consulta Pública*. Florianópolis: LABEEE, 2012.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do Método de Simulação de Desempenho Térmico da Norma NBR 15575. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., 2013, Brasília. *Anais...* Brasília: ANTAC/FAU, 2013. p. 13-21. Disponível em: <http://paranoa.fau.unb.br:8080/ojs/index.php/paranoa/article/download/87/56>> Acesso em: 15 dez. 2014.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; MARINOSKI, D. L.; LAMBERTS, R. Análise do procedimento de simulação da NBR 15575 para avaliação do desempenho térmico de edificações residenciais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 83-101, out./dez. 2014.

SOUZA, H. A.; AMPARO, L. R.; GOMES, A. P. Influência da inércia térmica do solo e da ventilação natural no desempenho térmico: um estudo de caso de um projeto residencial em *light steel framing*. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 113-128, out./dez. 2011.

TRINDADE, L. C. M. *et al.* Avaliação de desempenho térmico de residência unifamiliar estruturada em aço. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 14., 2012, Juiz de Fora. *Anais...* Juiz de Fora: ANTAC, 2012. p. 1225-1232.

ZBBR: software livre. Versão 1.1. São Carlos: UFSCar, 2004. Disponível em <<http://www.labee.ufsc.br>>. Acesso em: 5 jan. 2014.

8. APÊNDICE A – Cálculo das propriedades térmicas das paredes e coberturas

Cobertura em telha cerâmica (1 cm) e forro de PVC (1 cm)

Dados:

Cerâmica:

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 1,05 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

PVC:

$$\rho_{\text{PVC}} = 1300 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{PVC}} = 0,20 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{PVC}} = 0,96 \text{ kJ/(kg.K)}$$

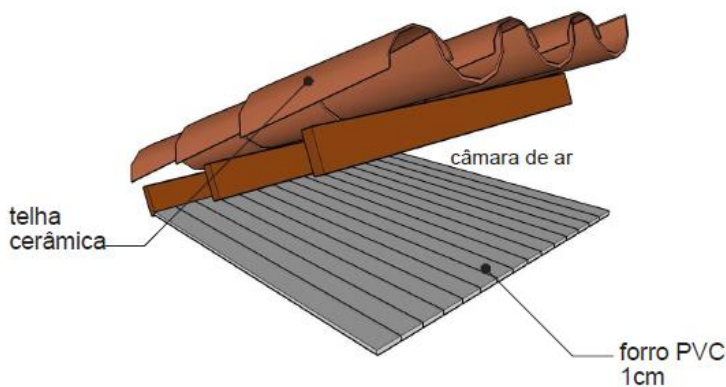


Figura 8.1 - Representação da cobertura da edificação
Telha cerâmica (1 cm) e forro de PVC (1 cm).

Fonte: Catálogo de propriedades térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2010b).

Resistência térmica:

$$R_t = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{PVC}}}{\lambda_{\text{PVC}}} = \frac{0,01}{1,05} + 0,21 + \frac{0,01}{0,20} = 0,2695 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,17 + 0,2695 + 0,04 = 0,4795(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,4795} = 2,09\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

$$C_T = \sum_{I=1}^3 e_I \cdot c_I \cdot \rho_I = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{PVC}}$$

$$C_T = 0,01 \times 0,92 \times 2000 + 0 + 0,01 \times 0,96 \times 1300 = 30,88 \text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Atraso térmico:

$$R_t = 0,2695 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$B_0 = C_T - C_{\text{text}} = 30,88 - 0,010 \times 0,92 \times 2000 = 12,48$$

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_t} = 0,226 \times \frac{12,48}{0,2695} = 10,46$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right) \times \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(1,05 \times 2000 \times 0,92)_{\text{ext}}}{0,2695} \right) \times \left(\frac{0,01}{1,05} - \frac{0,2695 - 0,01/1,05}{10} \right) = -24,21$$

B_2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \times \sqrt{B_1} = 1,382 \times 0,2695 \times \sqrt{10,46} = 1,2 \text{ horas}$$

Fator solar:

$$FS_0 = 4 \times U \times \alpha$$

Com $\alpha = 0,80$, tem-se:

$$FS_0 = 4 \times 2,09 \times 0,80 = 6,7\%$$

Cobertura em telha cerâmica (1 cm) e laje de concreto (10 cm)

Dados:

Cerâmica:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{cerâmica}} &= 2000 \text{ kg/m}^3 \\ \lambda_{\text{cerâmica}} &= 1,05 \text{ W/(m.K)} \\ c_{\text{cerâmica}} &= 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}\end{aligned}$$

Concreto:

$$\begin{aligned}\rho_{\text{concreto}} &= 2200 \text{ kg/m}^3 \\ \lambda_{\text{concreto}} &= 1,75 \text{ W/(m.K)} \\ c_{\text{concreto}} &= 1,00 \text{ kJ/(kg.K)}\end{aligned}$$

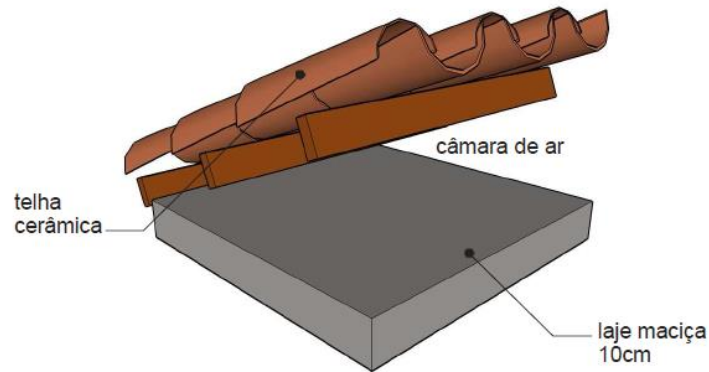


Figura 8.2 - Representação da cobertura da edificação.
Telha cerâmica (1 cm) e laje de concreto (10 cm).

Fonte: Catálogo de propriedades térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2010b).

Resistência térmica:

$$R_t = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{concreto}}}{\lambda_{\text{concreto}}} = \frac{0,01}{1,05} + 0,21 + \frac{0,10}{1,75} = 0,2767(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,17 + 0,2767 + 0,04 = 0,4867(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,4867} = 2,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

$$C_T = \sum_{I=1}^3 e_I \cdot c_I \cdot \rho_I = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{concreto}}$$

$$C_T = 0,01 \times 0,92 \times 2000 + 0 + 0,10 \times 1,00 \times 2200 = 238,40 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Atraso térmico:

$$R_t = 0,2767 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

$$B_0 = C_T - C_{\text{text}} = 238,40 - 0,01 \times 0,92 \times 2000 = 220$$

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_t} = 0,226 \times \frac{220}{0,2767} = 179,69$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right) \times \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(1,05 \times 2000 \times 0,92)_{\text{ext}}}{0,2767} \right) \times \left(\frac{0,01}{1,05} - \frac{0,2767 - 0,01/1,05}{10} \right) = -24,61$$

B_2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \times \sqrt{B_1} = 1,382 \times 0,2767 \times \sqrt{179,69} = 5,13 \text{ horas}$$

Fator solar:

$$FS_0 = 4 \times U \times \alpha$$

Com $\alpha = 0,80$, tem-se:

$$FS_0 = 4 \times 2,05 \times 0,80 = 6,56\%$$

Cobertura em telha cerâmica (1 cm) e forro de gesso (3 cm)

Dados:

Cerâmica:

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 1,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

Gesso:

$$\rho_{\text{gesso}} = 750 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{gesso}} = 0,35 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{gesso}} = 0,84 \text{ kJ/(kg.K)}$$

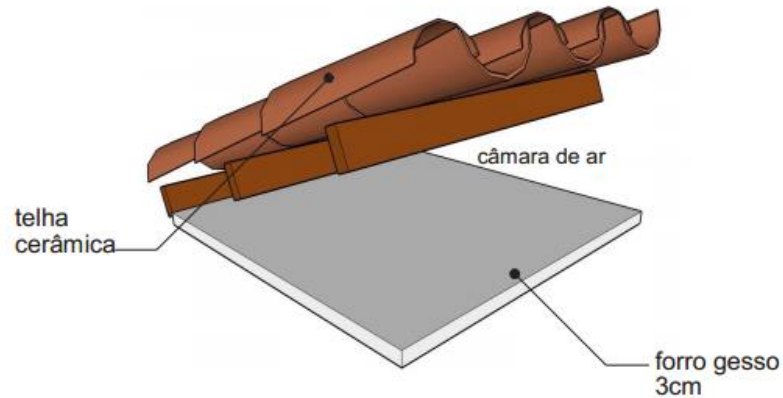


Figura 8.3 - Representação da cobertura para adequação da edificação. Telha cerâmica (1 cm) e forro de gesso (3 cm).

Fonte: Catálogo de propriedades térmicas (LAMBERTS *et al.*, 2010b).

Resistência térmica:

$$R_t = \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}} = \frac{0,01}{1,05} + 0,21 + \frac{0,03}{0,35} = 0,3052(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{\text{si}} + R_t + R_{\text{se}} = 0,17 + 0,3052 + 0,04 = 0,5152(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,5152} = 1,94 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

$$C_T = \sum_{I=1}^3 e_I \cdot c_I \cdot \rho_I = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{gesso}}$$

$$C_T = 0,01 \times 0,92 \times 2000 + 0 + 0,03 \times 0,84 \times 750 = 37,30 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Atraso térmico:

$$R_t = 0,3052 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

$$B_0 = C_T - C_{\text{text}} = 37,30 - 0,01 \times 0,92 \times 2000 = 18,90$$

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_t} = 0,226 \times \frac{18,90}{0,3052} = 13,99$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right) \times \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(1,05 \times 2000 \times 0,92)_{\text{ext}}}{0,3052} \right) \times \left(\frac{0,01}{1,05} - \frac{0,3052 - 0,01/1,05}{10} \right) = -26,01$$

B_2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \times \sqrt{B_1} = 1,382 \times 0,3052 \times \sqrt{13,99} = 1,58 \text{ horas}$$

Fator solar:

$$FS_0 = 4 \times U \times \alpha$$

Com $\alpha = 0,80$, tem-se:

$$FS_0 = 4 \times 1,94 \times 0,80 = 6,21\%$$

Parede de tijolos de 8 furos com argamassa de emboço de 1,5 cm

Dados:

Cerâmica:

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,90 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

Argamassa:

$$\rho_{\text{argamassa}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{argamassa}} = 1,00 \text{ kJ/(kg.K)}$$

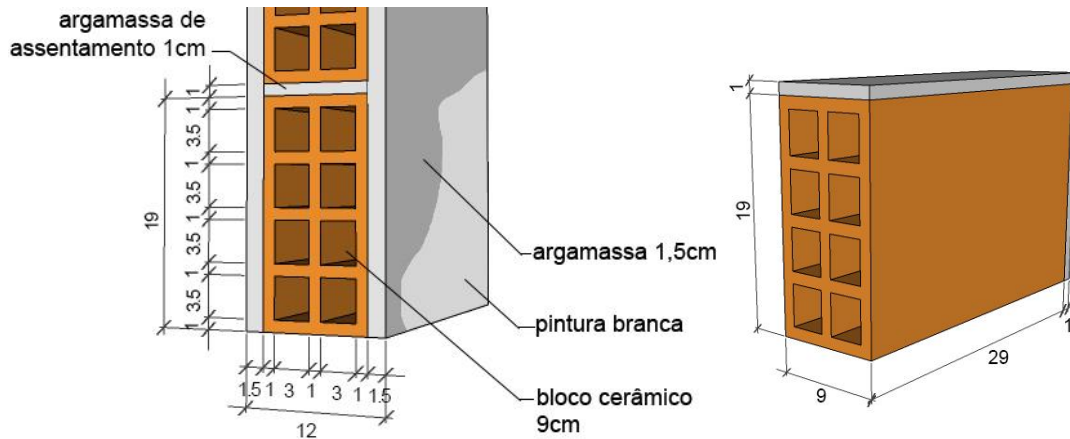


Figura 8.4 - Representação das paredes da edificação.
Parede de tijolos de 8 furos de 9 x 19 x 29 cm. Argamassa de emboço 1,5 cm.

Resistência térmica:

Seção A (argamassa + argamassa de assentamento + argamassa):

$$A_a = 0,01 \times 0,29 + 0,01 \times 0,20 = 0,0049\text{m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{arg.assent.}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,015}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,015}{1,15} = 0,1043(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção B (argamassa + tijolo + argamassa)

$$A_b = 0,01 \times 0,29 = 0,0029\text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,015}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,015}{1,15} = 0,1261(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção C (argamassa + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + argamassa)

$$A_c = 0,035 \times 0,29 = 0,01015\text{m}^2$$

$$R_c = 2 \times \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + 3 \times \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + 2 \times R_{\text{ar}} = 2 \times \frac{0,015}{1,15} + 3 \times \frac{0,01}{0,90} + 2 \times 0,16 = 0,3794(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_a + 5 \cdot A_b + 4 \cdot A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{5 \cdot A_b}{R_b} + \frac{4 \cdot A_c}{R_c}} = \frac{0,0049 + 5 \times 0,0029 + 4 \times 0,01015}{\frac{0,0049}{0,1261} + \frac{5 \times 0,0029}{0,1261} + \frac{4 \times 0,01015}{0,3794}} = 0,2231(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,2231 + 0,04 = 0,3931(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,3931} = 2,5439\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

Seção A (argamassa + argamassa de assentamento + argamassa):

$$A_a = 0,01 \times 0,29 + 0,01 \times 0,20 = 0,0049\text{m}^2$$

$$C_{ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{arg.assent.}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}}$$

$$C_{ta} = 0,015 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 1 \times 2000 + 0,015 \times 1 \times 2000 = 240 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção B (argamassa + tijolo + argamassa)

$$A_b = 0,01 \times 0,29 = 0,0029\text{m}^2$$

$$C_{tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}}$$

$$C_{tb} = 0,015 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 0,92 \times 1600 + 0,015 \times 1 \times 2000 \\ = 192,48 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção C (argamassa + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + argamassa)

$$A_c = 0,035 \times 0,29 = 0,01015\text{m}^2$$

$$C_{tc} = 2 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + 3 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + 2 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}}$$

$$C_{tc} = 2 \times 0,015 \times 1 \times 2000 + 3 \times 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0 = 104,16 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$C_T = \frac{A_a + 5 \cdot A_b + 4 \cdot A_c}{\frac{A_a}{C_{ta}} + \frac{5 \cdot A_b}{C_{tb}} + \frac{4 \cdot A_c}{C_{tc}}} = \frac{0,0049 + 5 \times 0,0029 + 4 \times 0,01015}{\frac{0,0049}{240} + \frac{5 \times 0,0029}{192,48} + \frac{4 \times 0,01015}{104,16}} \\ = 123,5753(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Atraso térmico:

$$R_t = 0,2231 (\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

$$B_0 = C_T - C_{\text{text}} = 123,57 - 0,015 \times 1,00 \times 2000 = 93,57$$

$$B_1 = 0,226 \times \frac{B_0}{R_t} = 0,226 \times \frac{93,57}{0,2231} = 94,79$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{\text{ext}}}{R_t} \right) \times \left(R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \times \left(\frac{(1,15 \times 2000 \times 1,00)_{\text{ext}}}{0,2231} \right) \times \left(\frac{0,015}{1,15} - \frac{0,2231 - 0,015/1,15}{10} \right)$$

$$= -16,82$$

B_2 é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \times \sqrt{B_1} = 1,382 \times 0,2231 \times \sqrt{94,79} = 3,00 \text{ horas}$$

Fator solar:

$$FS_0 = 4 \times U \times \alpha$$

Utilizando cor externa branca ($\alpha = 0,20$), tem-se:

$$FS_0 = 4 \times 2,54 \times 0,20 = 2,03\%$$

Parede de tijolos de 8 furos com argamassa de emboço de 2,5 cm

Dados:

Cerâmica:

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,90 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg.K)}$$

Argamassa:

$$\rho_{\text{argamassa}} = 2000 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m.K)}$$

$$c_{\text{argamassa}} = 1,00 \text{ kJ/(kg.K)}$$

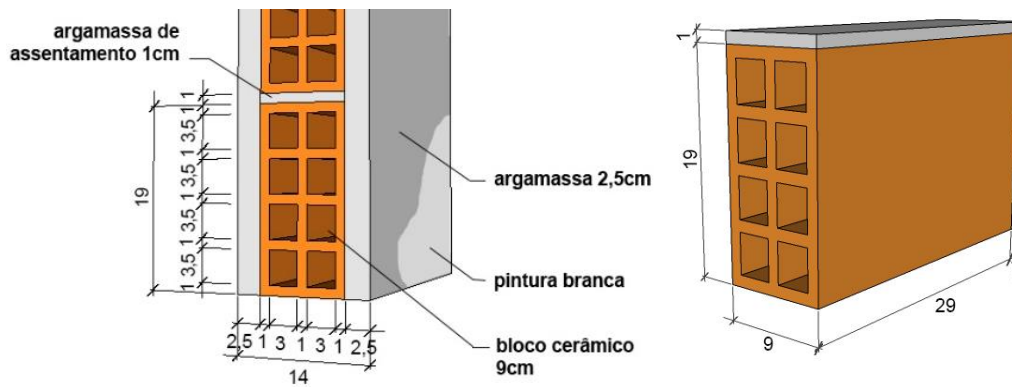


Figura 8.5 - Representação de parede para adequação da edificação. Parede de tijolos de 8 furos de 9 x 19 x 29 cm. Argamassa de emboço de 1,5 cm.

Resistência térmica:

Seção A (argamassa + argamassa de assentamento + argamassa):

$$A_a = 0,01 \times 0,29 + 0,01 \times 0,20 = 0,0049\text{m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{arg.assent.}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1217(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção B (argamassa + tijolo + argamassa)

$$A_b = 0,01 \times 0,29 = 0,0029\text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,025}{1,15} = 0,1435(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Seção C (argamassa + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + argamassa)

$$A_c = 0,035 \times 0,29 = 0,01015\text{m}^2$$

$$R_c = 2 \times \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + 3 \times \frac{e_{\text{cerâmica}}}{\lambda_{\text{cerâmica}}} + 2 \times R_{\text{ar}} =$$

$$2 \times \frac{0,025}{1,15} + 3 \times \frac{0,01}{0,90} + 2 \times 0,16 = 0,3968(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_t = \frac{A_a + 5 \cdot A_b + 4 \cdot A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{5 \cdot A_b}{R_b} + \frac{4 \cdot A_c}{R_c}} = \frac{0,0049 + 5 \times 0,0029 + 4 \times 0,01015}{\frac{0,0049}{0,1217} + \frac{5 \times 0,0029}{0,1435} + \frac{4 \times 0,01015}{0,3968}} = 0,2463(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Resistência térmica total:

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} = 0,13 + 0,2463 + 0,04 = 0,4163(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Transmitância Térmica:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,4163} = 2,4022\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica:

Seção A (argamassa + argamassa de assentamento + argamassa):

$$A_a = 0,01 \times 0,29 + 0,01 \times 0,20 = 0,0049\text{m}^2$$

$$C_{ta} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{arg.assent.}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}}$$

$$C_{ta} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 1 \times 2000 + 0,025 \times 1 \times 2000 = 280 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção B (argamassa + tijolo + argamassa)

$$A_b = 0,01 \times 0,29 = 0,0029\text{m}^2$$

$$C_{tb} = (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}}$$

$$C_{tb} = 0,025 \times 1 \times 2000 + 0,09 \times 0,92 \times 1600 + 0,025 \times 1 \times 2000 \\ = 232,48 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Seção C (argamassa + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + argamassa)

$$A_c = 0,035 \times 0,29 = 0,01015\text{m}^2$$

$$C_{tc} = 2 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{argamassa}} + 3 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{cerâmica}} + 2 \times (e \cdot c \cdot \rho)_{\text{ar}}$$

$$C_{tc} = 2 \times 0,025 \times 1 \times 2000 + 3 \times 0,01 \times 0,92 \times 1600 + 0 = 144,16 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

$$C_T = \frac{A_a + 5 \cdot A_b + 4 \cdot A_c}{\frac{A_a}{C_{ta}} + \frac{5 \cdot A_b}{C_{tb}} + \frac{4 \cdot A_c}{C_{tc}}} = \frac{0,0049 + 5 \times 0,0029 + 4 \times 0,01015}{\frac{0,0049}{280} + \frac{5 \times 0,0029}{232,48} + \frac{4 \times 0,01015}{144,16}} \\ = 165,9740(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$$

Parede dupla de tijolos de 6 furos

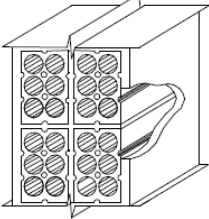
Parede	Descrição	U [W/(m ² .K)]	C _T [kJ/(m ² .K)]	φ [horas]
	Parede dupla de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 26,0 cm	1,52	248	6,5

Figura 8.6 - Representação de parede para adequação da edificação.
Parede dupla de tijolos de 6 furos de 10 x 15 x 20 cm. Argamassa de emboço de 2,5 cm.

Fonte: ABNT, 2005b.

Fator solar:

$$FS_0 = 4 \times U \times \alpha$$

Utilizando cor externa branca ($\alpha = 0,20$), tem-se:

$$FS_0 = 4 \times 1,52 \times 0,20 = 1,216$$