



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

LUIS ANDERSON CONCEIÇÃO DA SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DE HABITAÇÕES
MULTIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO

FORTALEZA

2019

LUIS ANDERSON CONCEIÇÃO DA SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DE HABITAÇÕES
MULTIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S581a Silva, Luis Anderson Conceição da.
Avaliação de Desempenho e Conforto Térmico de Habitações Multifamiliares em Clima Quente e Úmido /
Luis Anderson Conceição da Silva. – 2019.
118 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini.
1. Desempenho Térmico. 2. Conforto Térmico. 3. Edifícios Ventilados Naturalmente. I. Título.
CDD 624.1
-

LUIS ANDERSON CONCEIÇÃO DA SILVA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DE HABITAÇÕES
MULTIFAMILIARES EM CLIMA QUENTE E ÚMIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Estruturas e Construção Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em: 27/11/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Renan Cid Varela Leite
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Adeildo Cabral da Silva
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

A Deus.

Aos meus pais, Marcus Rodrigues e Sandra
Leoni.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alexandre Araújo Bertini, pela excelente orientação.

Ao Prof. Msc. Arquiteto e Urbanista, Alexandre Oliveira pelo essencial auxílio, cooperação, motivação e contribuição com esta pesquisa.

Aos meus pais Marcus Rodrigues e Sandra Leoni, e a minha namorada Danielle Cabral, pelo suporte em todos os momentos da minha jornada acadêmica.

Aos colegas da turma de mestrado, pelo apoio e ajuda no avanço deste trabalho.

RESUMO

O estudo do desempenho e conforto térmico para vedações verticais em edificações habitacionais multifamiliares ventiladas naturalmente é de fundamental importância para o setor da construção civil, pois apresenta grande potencial para racionalização de energia e proporciona ambientes internos com melhor satisfação dos usuários. No Brasil, a metodologia para avaliação de desempenho térmico para habitações de interesse social é apresentada na ABNT NBR 15575-1: 2013 – Edificações Habitacionais – Requisitos Gerais. No entanto, a norma brasileira apresenta-se ainda de forma muito simplificada e não leva em consideração índices adaptativos térmicos e medições reais nas edificações. O presente trabalho tem como objetivo analisar e avaliar o desempenho e conforto térmico de sistemas de vedação vertical externo de habitações residenciais multifamiliares, aplicando o método de medição (informativo) prescrito pela norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 para os sistemas construtivos de paredes maciças de concreto, alvenaria estrutural de bloco de concreto e alvenaria estrutural de bloco cerâmico e realizar método de simulação numérica para análise adaptativa de conforto térmico destes sistemas construtivos no contexto climático quente e úmido. Foram definidos estes 03 sistemas construtivos para coleta de dados e avaliação do desempenho térmico e conforto térmico, e para modelagem numérica. A coleta de dados teve como parâmetros ambientais de medição de temperatura (internas e externas) e umidade relativa do ar. Para os sistemas construtivos avaliados neste trabalho, nota-se que o critério do procedimento informativo de medições (temperaturas internas máximas menores que as externas máximas) da norma ABNT NBR 1557:2013 é difícil de ser atingido na maioria do tempo. O procedimento de simulação vigente na norma brasileira não considera parâmetros importantes que influenciam no desempenho térmico das edificações residenciais, como cargas térmicas internas e ventilação natural. O dia típico mostra-se vulnerável em função das incertezas do método, provocadas principalmente por imprecisões e ausência de dados na norma ABNT NBR 15575:2013. A modelagem adaptativa, utilizando temperatura operativa e parâmetros de ocupação, são indicados em análises e estudos que se aproximam da realidade de operação de unidades habitacionais. A transmitância térmica dos sistemas construtivos e a absorvância dos componentes possui grande influência nos resultados de conforto térmico na abordagem adaptativa deste estudo.

Palavras-chave: Desempenho térmico. Conforto Térmico. Edifícios ventilados naturalmente.

ABSTRACT

The study of thermal performance and thermal comfort for vertical walls in naturally ventilated multifamily residential buildings is fundamental for the building industry, as it has great potential for energy rationalization and provides indoor environments with better user satisfaction. In Brazil, the methodology for thermal performance evaluation for social housing is presented in ABNT NBR 15575-1: 2013 - Housing Buildings - General Requirements. However, the Brazilian standard is still very simplified and does not take into account thermal adaptive indices and real measurements in buildings. The present work aims to analyze and evaluate the performance and thermal comfort of vertical walls systems of multifamily residential habitations, applying the (informative) measurement method prescribed by ABNT NBR 15575: 2013 performance standard for solid wall construction systems, concrete block structural and ceramic block structural. Perform numerical simulation method for adaptive thermal comfort analysis of these building systems in the hot and humid climatic context. These 03 construction systems were defined for data collection and evaluation of thermal performance and thermal comfort, and for numerical modeling. The data collection had as environmental parameters of temperature measurement (internal and external) and relative humidity of the air. For the constructive systems evaluated in this work, it is noted that the criterion of the informative procedure of measurements (maximum internal temperatures lower than the maximum external temperatures) of ABNT NBR 1557: 2013 is difficult to be met most of the time. The simulation procedure in force in the Brazilian standard does not consider important parameters that influence the thermal performance of residential buildings, such as internal thermal loads and natural ventilation. The typical day is vulnerable due to method uncertainties, mainly caused by inaccuracies and lack of data in ABNT NBR 15575: 2013. Adaptive modeling, using operating temperature and occupation parameters, are indicated in analyzes and studies that approximate the reality of operation of housing units. The thermal transmittance of the building systems and the absorbance of the components have a great influence on the thermal comfort results in the adaptive approach of this study.

Keywords: Thermal performance. Thermal Comfort. Buildings naturally ventilated.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da Radiação solar em Fortaleza no mês mais quente	28
Figura 2 – Variação da Umidade relativa para o mês mais quente e o mês mais frio	29
Figura 3 – Ventilação Natural	32
Figura 4 – Experimentos com ocupantes em câmaras climatizadas.....	34
Figura 5 – Porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) em função do Voto Médio predito (PMV)	35
Figura 6 – Limites da zona de conforto.....	37
Figura 7 – Carta bioclimática e as relações entre temperaturas e umidade relativa.....	39
Figura 8 – Carta bioclimática criada por Givoni	40
Figura 9 – Carta Psicrométrica de Fortaleza	40
Figura 10 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	42
Figura 11 – Procedimento de avaliação de desempenho térmico segundo NBR 15.575: 2013	48
Figura 12 – Fluxo de calor através de uma parede com três camadas.....	49
Figura 13 – Esquema explicativo do fenômeno da inércia térmica de uma parede real (q_2) e de uma parede fictícia de peso nulo (q_1).....	53
Figura 14 – Etapas da pesquisa.....	54
Figura 15 – Fachada e localização da edificação de paredes de concreto moldadas <i>in loco</i>	56
Figura 16 – Fachada e localização da edificação de paredes de alvenaria estrutural de bloco de concreto	57
Figura 17 – Fachada e localização da edificação de paredes de alvenaria estrutural de bloco cerâmico.....	57
Figura 18 – Bloco de Concreto estrutural.....	58
Figura 19 – Bloco Cerâmico estrutural	58
Figura 20 – Paredes de concreto moldado <i>in loco</i> ($e = 10\text{cm}$)	58
Figura 21 – Alvenaria estrutural de bloco de concreto	59
Figura 22 – Alvenaria estrutural cerâmica.....	59
Figura 23 – Datalogger de temperatura e umidade.....	60
Figura 24 – Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento com paredes de concreto moldado <i>in loco</i>	62
Figura 25 – Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento de alvenaria estrutural de blocos concreto	62
Figura 26 – Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento de	

alvenaria estrutural de blocos de cerâmico.....	63
Figura 27 – Planta baixa Empreendimento de paredes de concreto <i>in loco</i> e localização dos Datalogger	63
Figura 28 – Planta baixa Empreendimento de alvenaria estrutural com bloco cerâmico e localização dos Datalogger	65
Figura 29 – Planta baixa Empreendimento de alvenaria estrutural com bloco de concreto e localização dos Datalogger	66
Figura 30 – Período das Medições	68
Figura 31 – Planta baixa Modelo Hipotético.....	71
Figura 32 – Modelo design builder.....	73
Figura 33 – O padrão de conforto adaptativo ASHRAE 55 (2017)	74

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quarto parede de bloco de concreto	82
Gráfico 2 – Sala parede de concreto	82
Gráfico 3 – Sala parede de bloco	82
Gráfico 4 – Quarto parede de bloco de concreto estrutural cerâmico	83
Gráfico 5 – Sala parede de concreto.....	84
Gráfico 6 – Sala parede de bloco de concreto.....	84
Gráfico 7 – Amplitudes térmicas do quarto parede de bloco de concreto.....	85
Gráfico 8 – Amplitudes térmicas da sala parede de concreto moldado <i>in loco</i>	85
Gráfico 9 – Amplitudes térmicas da sala parede de bloco de concreto	86
Gráfico 10 – Amplitudes térmicas do quarto parede de bloco de estrutural cerâmico.....	87
Gráfico 11 – Amplitudes térmicas da sala parede de concreto moldado <i>in loco</i>	87
Gráfico 12 – Amplitudes térmicas da sala parede de bloco de concreto estrutural cerâmico ..	88
Gráfico 13 – Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,3$	89
Gráfico 14 – Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,3$	89
Gráfico 15 – Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,5$	91
Gráfico 16 – Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,5$	91
Gráfico 17 – Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,7$	92
Gráfico 18 – Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,7$	93
Gráfico 19 – Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,3$	94
Gráfico 20 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,3$	95
Gráfico 21 – Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,5$	96
Gráfico 22 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,5$	96
Gráfico 23 – Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,7$	98
Gráfico 24 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,7$	98
Gráfico 25 – Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,3$	99
Gráfico 26 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,3$	100
Gráfico 27 – Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,5$	101
Gráfico 28 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,5$	101
Gráfico 29 – Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,7$	102
Gráfico 30 – Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,7$	102
Gráfico 31 – Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,3$	104
Gráfico 32 – Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,5$	105
Gráfico 33 – Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,7$	105

Gráfico 34 – Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,3$	106
Gráfico 35 – Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,5$	106
Gráfico 36 – Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,7$	107
Gráfico 37 – Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,3$	107
Gráfico 38 – Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,5$	108
Gráfico 39 – Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,7$	108

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Aberturas para ventilação	43
Quadro 2 – Fator de Transmitância térmica	44
Quadro 3 – Absortância à radiação solar	45
Quadro 4 – Informações do fabricante Datalogger Interno	61
Quadro 5 – Informações do fabricante Datalogger externo	61
Quadro 6 – Quadro de esquadrias apartamento de paredes de concreto	64
Quadro 7 – Quadro de esquadrias apartamento de alvenaria estrutural cerâmica.....	66
Quadro 8 – Quadro de esquadrias apartamento de alvenaria de bloco de concreto	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variáveis que influenciam no conforto térmico	26
Tabela 2 – Normais Climatológicas para Fortaleza.....	27
Tabela 3 – Direção e velocidade do vento para Fortaleza	30
Tabela 4 – Índices adaptativos aplicados e suas respectivas equações e faixas de conforto	38
Tabela 5 – Transmitância térmica de paredes externas e coberturas	44
Tabela 6 – Capacidade térmica de paredes externas.....	45
Tabela 7 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão.....	46
Tabela 8 – Critério de avaliação de desempenho térmico para condição de inverno	46
Tabela 9 – Resistência térmica de Câmaras de Ar.	50
Tabela 10 – Resistência superficial externa e interna.....	50
Tabela 11 – Características Gerais das obras analisadas.	55
Tabela 12 – Intervalos de medição.	69
Tabela 13 – Características do projeto e parâmetros de entrada de dados para simulação.	72
Tabela 14 – Acréscimos aceitáveis aos limites de temperatura operativa	75
Tabela 15 – Características das principais propriedades termo físicas dos sistemas construtivos	78
Tabela 16 – Propriedades térmicas dos materiais.....	78
Tabela 17 – Máximas e mínimas - Parede de Concreto x Bloco de Concreto estrutural	80
Tabela 18 – Máximas e mínimas - Parede de Concreto x Bloco estrutural cerâmico	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
USP	Universidade de São Paulo
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
trad.	Tradutor
PMV	Voto Médio Predito
PPD	Porcentagem de pessoas satisfeitas
T _n	Temperatura Neutra
FT	Fator de Transmitância
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
Text	Temperatura externa
T _s	Temperatura sala
T _q	Temperatura quarto
Co	Concreto moldado 'in loco'
Ce	Bloco estrutural cerâmico
Bc	Bloco de Concreto estrutural
UR	Umidade Relativa
T _a	Temperatura do ar interna
T _r	Temperatura radiante interna
T _o	Temperatura operativa interna
V _a	Velocidade do ar em m/s
Max	Máxima
Amp T	Amplitude Térmica

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
R	Resistência térmica de um componente
U	Transmitância térmica de um componente
C_T	Capacidade térmica de um componente
φ	Atraso térmico de um componente
FS_o	Fator solar de elementos opacos
FS_t	Fator solar de elementos transparentes ou translúcidos
CS	Coefficiente de sombreamento
c	Calor específico
e	Espessura de uma camada
λ	Condutividade térmica do material
ρ	Densidade de massa aparente do material
ε	Emissividade hemisférica total
ΔS	Troca de calor armazenado
α	Absortância
R_t	Resistência da seção
R_{se}	Resistência superficial externa
R_{si}	Resistência superficial interna
R_{ar}	Resistência da câmara de ar

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Justificativa	22
1.2	Objetivos	24
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	24
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	24
2	DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES	25
2.1	Fatores que influenciam no conforto térmico de edificações	26
2.1.1	<i>Fatores Climáticos e Temperatura do Ar</i>	27
2.1.2	<i>Radiação Solar</i>	28
2.1.3	<i>Umidade Atmosférica</i>	29
2.1.4	<i>Ventos (movimento do ar)</i>	30
2.1.5	<i>Considerações finais sobre clima no Brasil</i>	30
2.2	Ventilação Natural	31
2.3	Índices de avaliação do conforto térmico	33
2.3.1	<i>Modelo estático</i>	34
2.3.2	<i>Modelo adaptativo</i>	36
2.3.3	<i>Cartas bioclimáticas</i>	39
2.4	Desempenho térmico de edificações segundo a ABNT NBR 15575:2013	41
2.4.1	<i>Modelo Simplificado</i>	43
2.4.2	<i>Modelo por simulação computacional</i>	45
2.4.3	<i>Procedimento de Medição (Informativo)</i>	46
2.5	Resistência térmica	48
2.5.1	<i>Camadas homogêneas</i>	48
2.5.2	<i>Câmara de ar</i>	49
2.5.3	<i>Superfícies</i>	50
2.6	Transmitância térmica	50
2.7	Capacidade térmica de componentes	51
2.7.1	<i>Componentes com camadas homogêneas e não homogêneas</i>	51
2.8	Inércia Térmica	51
2.8.1	<i>Inércia térmica da construção</i>	52
3	METODOLOGIA	54
3.1	Definição das edificações avaliadas para medições in loco	55
3.2	Geometria dos Blocos das paredes utilizadas	57

3.3	Revestimentos das paredes.....	58
3.4	Descrição dos procedimentos de medição em campo	59
3.4.1	<i>Instrumentação</i>	60
3.5	Técnicas de medição	61
3.6	Planta baixa e ambientes medidos em cada edificação	63
3.7	Tempo e intervalos das medições.....	67
3.8	Descrição dos procedimentos de simulação computacional.....	69
3.8.1	<i>Parâmetros da modelagem computacional</i>	69
3.8.2	<i>Materiais e sistemas construtivos</i>	70
3.8.3	<i>Características gerais da simulação</i>	72
3.8.4	<i>Critério de avaliação de conforto térmico</i>	74
3.9	Método de análise de Desempenho e conforto térmico	75
3.9.1	<i>Metodologia Simplificada para paredes e metodologia de medições</i> <i>(informativa)</i>	75
3.9.2	<i>Metodologia de Simulação Computacional</i>	76
3.10	Avaliação dos dados obtidos nas medições e simulação numérica	76
3.10.1	<i>Amplitude térmica diária e diferenças de temperatura</i>	76
3.10.2	<i>Temperaturas máximas e mínimas internas</i>	76
3.10.3	<i>Horas de conforto e desconforto térmico com abordagem adaptativa</i>	76
3.11	Análise crítica de desempenho e conforto térmico	77
4	RESULTADOS E ANÁLISES	78
4.1	Desempenho térmico de paredes pela NBR 15575:2013 (Simplificado)	78
4.2	Medições – Método Informativo.....	79
4.2.1	<i>Máximas e mínimas – Parede de Concreto e Bloco de concreto estrutural</i>	80
4.2.2	<i>Máximas e mínimas – Parede de Concreto e Bloco de Estrutural Cerâmico</i>	81
4.2.3	<i>Diferenças de temperaturas máximas externas e internas – Apartamento de</i> <i>Paredes de Concreto e apartamento de Bloco de concreto</i>	82
4.2.4	<i>Diferenças de temperaturas máximas externas e internas – Apartamento de</i> <i>Paredes de Concreto e apartamento de Bloco Estrutural Cerâmico</i>	83
4.2.5	<i>Amplitudes de temperatura máxima e mínima externas e internas –</i> <i>Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco de concreto</i>	85
4.2.6	<i>Amplitudes de temperatura máxima e mínima externas e internas -</i> <i>Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco Estrutural</i> <i>Cerâmico</i>	87

4.3	Simulação parede de concreto moldado <i>in loco</i>	89
4.4	Simulação de paredes de bloco de concreto estrutural	94
4.5	Simulação bloco estrutural cerâmico	99
4.6	Dia representativo de alta incidência solar para cada sistema construtivo..	104
4.6.1	<i>Dia representativo de alta incidência solar: parede de concreto maciço</i>	104
4.6.2	<i>Dia representativo de alta incidência solar: parede de bloco de concreto</i>	106
4.6.3	<i>Dia representativo de alta incidência solar: parede de bloco cerâmico</i>	107
5	CONCLUSÕES.....	109
	REFERÊNCIAS.....	111
	ANEXOS	118
	APÊNDICES.....	121

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico em edificações de interesse social é de fundamental importância para a satisfação dos usuários. Quando os edifícios não proporcionam conforto térmico em seu interior, este aspecto influencia diretamente no consumo energético, uma vez que os ocupantes tendem a tomar medidas para torná-lo confortável, como exemplo, o uso de ar-condicionado (ROAF; CRICHTON; NICOL, 2009).

Edifícios contribuem com cerca de 40% do consumo global de energia e são responsáveis por cerca de 30% das emissões de gás carbônico (CO₂). Uma considerável parcela desta energia é usada para o conforto térmico dos edifícios (YANG; YAN; LAM, 2014).

Os estudos de desempenho térmico para edifícios ventilados apresentam-se em destaque, uma vez que apresentam grande potencial no incentivo do uso racional de energia, desejável no setor da construção civil, e por estes proporcionarem ambientes internos com porcentagens elevadas de satisfação dos ocupantes (CÂNDIDO, 2010). Segundo Leite (2015), as edificações residenciais apresentam maior potencial para aplicação de meios naturais para garantir o conforto térmico se comparados a prédios comerciais, públicos ou industriais.

A intensificação de pesquisas em ambientes naturalmente ventilados tem demonstrado uma preocupação, especialmente nos países tropicais de clima quente e úmido, na definição de projetos de edifícios que tornem viável o uso mais evidente da ventilação natural como condicionante térmico passivo.

Segundo a norma americana ASHRAE STANDARD 55 (2012), o conforto térmico é definido como sendo a condição da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico. Ou seja, a condição de conforto é algo subjetivo. O desempenho térmico satisfatório da edificação é uma das condições necessárias para que essa edificação ofereça conforto ambiental aos seus ocupantes e usuários na realização de suas diversas atividades.

O conforto térmico, como uma sensação humana, situa-se no campo da subjetividade e depende de fatores físicos, fisiológicos e psicológicos. Os fatores físicos determinam as trocas de calor do corpo com o meio, já os fatores fisiológicos referem-se a alterações na resposta fisiológica do organismo, resultantes da exposição contínua a determinada condição térmica. Por fim, os fatores psicológicos, são aqueles que se relacionam às diferenças na percepção e na resposta a estímulos sensoriais, frutos da experiência passada e da expectativa do indivíduo (CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011).

Para definir esta sensação e quais os parâmetros que influenciam a resposta dos usuários, muitos estudos têm sido desenvolvidos. Podem-se separar os estudos de conforto térmico em

duas vertentes. A primeira, influenciada pelos estudos realizados pelo professor dinamarquês Povl Ole Fanger, na década de 70 em câmaras climáticas, é chamada de analítica e sugere que os limites de conforto podem ser universais.

A segunda corrente é a chamada de adaptativa, e considera que ocorre alguma mudança ambiental que resulte em desconforto. Dessa forma, os usuários dos ambientes agem no sentido de restabelecer as condições de conforto. Humphreys (1975) defende que a temperatura de conforto não é uma constante, e sim varia de acordo com a estação, e temperatura a que as pessoas estão acostumadas.

Os estudos em conforto térmico visam principalmente analisar e estabelecer as condições necessárias para avaliação e concepção de um ambiente térmico adequado às atividades e ocupação humanas, bem como estabelecer métodos e princípios para uma detalhada análise térmica de um ambiente (CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011).

A importância do estudo de conforto térmico está baseada principalmente em três fatores: a satisfação do homem ou seu bem-estar, a performance humana e a conservação de energia, pois devido a industrialização da sociedade, as pessoas passam grande parte de suas vidas em ambientes condicionados artificialmente. Saúde e conforto humano são percebidos como os parâmetros mais importantes durante avaliações térmicas de ambientes internos (MANZANO-AGUGLIARO *et al.*, 2015).

Nos últimos anos, muitos países desenvolveram normas e regulamentos do desempenho termo energético para as edificações residenciais com o objetivo de reduzir o consumo de energia das edificações (SORGATO, 2015). O desempenho termo energético das edificações é influenciado por diversos fatores, tais como: características arquitetônicas, propriedades termo físicas da envoltória da edificação (materiais), orientação, equipamentos, sistemas de iluminação, de ventilação e de condicionamento artificial, dispositivos de sombreamento e condições externas do clima.

A análise de desempenho térmico de habitações populares tem o objetivo de colaborar com o desenvolvimento de tecnologias de construção, regulamentação e fiscalização de edificações de interesse social. Historicamente, estas habitações possuem o fator custo como prioridade sobre o desempenho, e, como consequência, há uma piora na qualidade da edificação e o surgimento de patologias das mais variadas. Estas, por sua vez, apresentam altos custos para o seu reparo do que sua prevenção custaria (LOPES, 2010).

Atualmente, os estudos de conforto térmico visam principalmente analisar e estabelecer as condições necessárias para a concepção de um ambiente termicamente adequado às atividades e ocupação humanas, bem como estabelecer métodos e

princípios para uma avaliação térmica detalhada de um ambiente (LAMBERTS *et al.*, 2016).

No Brasil, as normativas referentes à melhoria da eficiência energética nas edificações foram aprovadas em 1985, com o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), objetivando a racionalização da produção e consumo de energia elétrica. Em 2005 foi aprovada a NBR 15220 (ABNT, 2005) regulamentando o desempenho térmico de edificações. Entre outros aspectos, suas partes normatizam o zoneamento bioclimático brasileiro associado às diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social por meio de estratégias de condicionamento térmico passivo.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) também estabelece requisitos e critérios de desempenho aplicáveis às edificações habitacionais, determinando as condições de habitabilidade por meio de requisitos dos usuários expressos por diversos fatores, dentre os quais o desempenho térmico dos ambientes.

As normas brasileiras apresentam para a análise do desempenho térmico da edificação um método prescritivo (que descreve os critérios para a avaliação do desempenho térmico), e que pode utilizar a simulação computacional, sendo tais alternativas propostas pela ABNT NBR 15575-1:2013. Destaca-se que a essência da norma está nos requisitos do usuário para o edifício habitacional voltado para seu comportamento em uso, não sendo direcionado para a prescrição de como os sistemas devem ser construídos, caracterizando-se, assim, como uma norma complementar às prescritivas sem, no entanto, substituí-las (ABNT NBR 15575-1, 2013).

A norma de desempenho entrou em vigor em julho de 2013 estabelecendo requisitos mínimos de desempenho, vida útil e de garantia para os sistemas que compõem as edificações. Os requisitos são: desempenho estrutural, resistência ao fogo, segurança ao uso e operação, estanqueidade, desempenho térmico, desempenho acústico, desempenho lumínico, durabilidade, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico e adequação ambiental.

A NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece um procedimento para a avaliação do desempenho térmico: o método simplificado. No método simplificado, verifica-se o atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação. Caso a edificação não atinja os requisitos estabelecidos pelo método, é permitido avaliar-se o desempenho térmico da edificação como um todo pelo método de simulação computacional.

1.1 Justificativa

Uma vez que a norma de desempenho brasileira é estabelecida para atender aos requisitos do usuário (qualitativos), por meio da definição de critérios (quantitativos) e métodos de avaliação, para o desempenho térmico, os requisitos do usuário referem-se ao conforto térmico e o método de avaliação deveria permitir a mensuração do atendimento a tal requisito. Constata-se, no entanto, que a NBR 15575-1:2013 não engloba ou recomenda medições e indicadores de conforto térmico (SANTO; ALVAREZ; NICO-RODRIGUES, 2013).

As normas internacionais, em contrapartida, foram elaboradas com base em pesquisas de aceitabilidade térmica dos ambientes pelo usuário a partir de índices de conforto térmico (SANTO; ALVAREZ; NICO-RODRIGUES, 2013). Estudos indicam a necessidade de melhorar os padrões brasileiros com parâmetros de conforto do usuário para atualizar, na prática, o desempenho térmico do edifício e obter efetivamente economia de energia (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

O Brasil passa por uma crise hídrica e fornecimento de energia hidrelétrica, com momentos críticos em 2015. As mudanças climáticas aumentaram a temperatura no verão e reduziu o período de chuvas. Assim, o consumo energético para resfriamento aumentou, causando em momentos de pico, interrupção da alimentação em várias grandes cidades (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo a Agência Internacional de Energia (AIE), entre 2010 e 2050 a demanda projetada de energia será duplicada. O Balanço Energético Nacional indicou que, em 2014, as edificações residenciais estavam entre as maiores consumidoras de energia elétrica, com 24,9% de representatividade, superada apenas pelas indústrias, com 38,8% (OLIVEIRA; SOUZA; SILVA, 2017). O setor da construção responde por 48,5% do consumo total de energia elétrica do país (BRASIL, 2014).

Segundo Frota (2001), a racionalização do uso da energia apresenta estreitos laços com a adequação da arquitetura ao clima, evitando ou reduzindo os sistemas de condicionamento artificial de ar, quer com a finalidade de refrigerar, quer com a de aquecer os ambientes. Os controles térmicos naturais propiciam a redução do excesso de calor resultante no interior dos edifícios, minimizando, por vezes, os efeitos de climas excessivamente quentes.

Considerando o impacto e o crescimento da habitação social, é fundamental para o setor da construção atingir as metas de redução de energia do governo brasileiro. De acordo com uma pesquisa baseada em dados fornecidos pela Caixa Econômica Federal, o déficit

habitacional atingiu 5,7 milhões em 2009, diminuindo para 5,2 milhões em 2014.

Moreno, Morais e Souza (2017) alertam que moradias populares estão crescendo no Brasil, e configura-se um desafio importante para a indústria da construção civil aliar produtividade com qualidade, no que diz respeito ao desempenho energético e térmico dos edifícios.

Devido a limitações de custo, as habitações que estão sendo construídas no Brasil para amenizar o déficit habitacional usam projetos repetitivos, baixa inovação, baixa qualidade de construção e sem considerações sobre o contexto local ou clima (TUBELO *et al.*, 2018).

Uma caracterização dos projetos que estão sendo construídos hoje, com a formulação de tipologias e análise do seu desempenho térmico e energético, ajudaria formando a base para uma política eficaz na indústria da habitação (TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2015).

Considerando o exposto e a notável simplificação da norma de desempenho NBR 15575-1: 2013, faz-se necessária a análise dos índices de conforto térmico que são mais aplicáveis às habitações ventiladas naturalmente e às regiões de clima quente e úmido.

Os métodos simplificados da ABNT NBR 15575:2013, apesar de fornecerem uma ferramenta rápida para a avaliação do desempenho da edificação, podem compreender uma incerteza considerável em seus resultados (SORGATO, 2013). Muitas vezes estes métodos podem comprometer o processo de análise da edificação em questão.

O modelo adaptativo, que é derivado de uma extensa base de dados, configura-se numa alternativa que hoje é bem aceita pelos estudiosos da área. Com este modelo pode-se ter uma satisfação do usuário de até 90%, conforme estudos realizados na década de 90 por BRAGER e DEAR (1998).

É importante investigar as diretrizes metodológicas da ABNT NBR 15575-1:2013 em relação aos critérios de avaliação de desempenho térmico, tanto pelo método simplificado quanto pelo método de simulação computacional, relacionando-as com referenciais de conforto dos usuários adotados pelas normas internacionais.

Destaca-se outros aspectos relevantes como ocupação dos ambientes e eventuais usos de equipamentos que produzem calor e influenciam no conforto térmico dos usuários. A desconsideração destes fatores pela NBR 15575-1:2013 gera resultados distorcidos e processos muito simplificados (SANTO; ALVAREZ; NICO-RODRIGUES, 2013).

1.2 Objetivos

1.2.1 *Objetivo Geral*

Analisar e avaliar o desempenho e conforto térmico de habitações multifamiliares, aplicando o método de medição (informativo) prescrito pela norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 para diferentes tipos de sistemas construtivos, e realizar método de simulação numérica para análise adaptativa de conforto térmico destes sistemas construtivos no contexto climático quente e úmido.

1.2.2 *Objetivos Específicos*

- Definir os sistemas construtivos e coletar dados de temperatura (interna e externa) e umidade relativa do ar, nos períodos de verão da região metropolitana de Fortaleza-CE.
- Avaliar para os dados coletados, através do modelo simplificado, o desempenho térmico dos sistemas construtivos escolhidos de vedação vertical externa, utilizando os critérios da norma de desempenho ABNT NBR 15575: 2013.
- Avaliar para os dados coletados nas medições in loco (método informativo da ABNT NBR 15575:2013) as temperaturas máximas e mínimas internas com relação às temperaturas externas, assim como suas diferenças de temperatura e amplitudes.
- Avaliar o conforto térmico de sistemas de vedação vertical externa, utilizando modelagem computacional através do software *DesignBuilder*®, utilizando metodologia definida e critérios do modelo adaptativo proposto pela norma americana *ASHRAE STANDARD 55-2017: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy*.
- Análise crítica dos critérios de desempenho e conforto térmico dos sistemas construtivos de paredes escolhidos.

2 DESEMPENHO E CONFORTO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

O desempenho térmico de uma edificação pode ser entendido como o comportamento térmico dessa edificação frente a parâmetros pré-determinados de condições de conforto e desempenho dos materiais, assim como dos sistemas utilizados na sua construção. Sua mensuração ajuda a estabelecer os limites mínimos ideais para garantir à edificação boas condições térmicas de habitabilidade (LOPES, 2010).

Em países em desenvolvimento que apresentam climas tropicais e subtropicais, vários aspectos relacionados ao desempenho das edificações entregues a população de baixa renda devem ser verificados. O desempenho térmico de habitações sociais está diretamente ligado a melhoria do seu conforto térmico interno (KRÜGER; LAROCA, 2009).

Lopes (2010) afirma que o conceito de desempenho se refere ao comportamento em uso de determinado produto, correspondente aos requisitos e critérios necessários para sua resposta adequada diante das condições de exposição do mesmo.

Uma vez que existem grandes variações de pessoa para pessoa em termos de satisfação fisiológica e psicológica, é difícil encontrar uma temperatura ideal para todos em um determinado espaço. As pessoas têm diferentes taxas metabólicas que podem flutuar devido ao nível de atividade e condições ambientais (KHODAKARAMI; KNIGHT, 2009, tradução nossa).

Com isso, o conhecimento das exigências humanas de conforto térmico e do clima, associado ao das características térmicas dos materiais e das premissas genéricas para o projeto arquitetônico adequado a climas particulares, proporciona condições de projetar edifícios e espaços urbanos cuja resposta térmica atenda às exigências de conforto térmico (FROTA, 2001).

Lamberts *et al.* (2016) destaca que, devido à variação biológica entre as pessoas, é impossível que todos os ocupantes do ambiente se sintam confortáveis termicamente, desta forma, busca-se sempre criar condições de conforto nas quais a maior porcentagem das pessoas se encontre em conforto térmico.

Em diferentes regiões do mundo as necessidades térmicas de desempenho e conforto variam. Na China, por exemplo, há verões quentes e úmidos e invernos frios. O conforto térmico tornou-se um desafio nas últimas décadas devido ao grande crescimento populacional e econômico do país. (YU *et al.*, 2009).

Larasati e Mochtar (2013) pontuam que em Jakarta, na Indonésia, as umidades máximas podem chegar a 96%. Isto, por vezes, pode levar a uma temperatura interna relativamente maior

que a temperatura externa. Tal condição gera um grande consumo de energia ocasionada pelo uso de ar condicionado.

A estratégia para responder a este tipo de clima é ajustar as massas de projeto, formas de construção e seleção dos materiais de vedação do edifício (LARASATI; MOCHTAR, 2013). Portanto, o desempenho e conforto térmico de edifícios está diretamente ligado às opções de projeto, clima, umidade, radiação, etc. (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Segundo Szokolay (2014), o comportamento térmico de edifícios pode ser considerado como um sistema térmico de entradas e saídas de calor, conforme Eq. (1):

Q_i - ganho de calor interno

Q_c - ganho ou perda de calor na condução

Q_s - ganho de calor solar

Q_v - ganho ou perda de calor na ventilação

Q_e - perda de calor por evaporação.

O sistema pode ser representado pela seguinte equação:

$$Q_i + Q_c + Q_s + Q_v + Q_e = \Delta S \quad (1)$$

Onde ΔS é a troca de calor armazenado no prédio.

O desafio para se obter bom desempenho e conforto térmico em ambientes naturalmente ventilados torna-se eficiente quando uma circulação de ar adequada dentro do ambiente construído contribui para renovação do ar e diminuição do gradiente térmico. Tal alternativa contribui para uma redução do consumo energético (SOUZA; RODRIGUES, 2012).

2.1 Fatores que influenciam no conforto térmico de edificações

Muitos fatores influenciam no desempenho e conforto térmico das edificações. Segundo Szokolay (2014), as principais variáveis térmicas que possuem influência no conforto e desempenho térmico são apresentadas abaixo, de acordo com a Tabela 01:

Tabela 1 - Variáveis que influenciam no conforto térmico

Ambientais	Pessoais	Outros Fatores
Temperatura do Ar	Atividade metabólica	Alimentação
Movimento do Ar	Vestimentas	Forma do Corpo
Umidade	Estado de Saúde	Gordura subcutânea
Radiação	Aclimatação	Idade, sexo, hábitos

Fonte: Adaptado de Szokolay (2014).

2.1.1 Fatores Climáticos e Temperatura do Ar

Clima é o conjunto de condições atmosféricas que caracterizam uma região. Uma forma mais simples de classificação climática para projetos foi adotada por Atkinson, 1953. Nela, os climas podem ser analisados em 04 classificações: climas frios, temperados, quente e seco e quente e úmido.

A região de Fortaleza-CE segundo Ceará (2019), está localizado numa zona de clima quente e úmido. Com temperaturas médias acima de 26°C, alto índice de umidade relativa e alta taxa de evaporação. As médias mais elevadas de temperatura (27,1°C) concentram-se nos meses de novembro, dezembro, janeiro até fevereiro (Tabela 02).

Tabela 2 - Normais Climatológicas para Fortaleza

Cidade	Lat (s)	Long. (W.Gr.w.)	Alt. (m)										
Fortaleza	3.46	38.4	26.5										
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	ANO
Pressão Atmos (hPA)	1007	1008	1008	1008	1009	1010	1011	1010	1010	1009	1008	1008	1008.7
Temperatura Média (°C)	27,3	26,7	26,3	26,5	26,3	25,9	25,7	26,1	26,6	27	27,2	27,3	26,6
Temperatura Máxima (°C)	30,5	30,1	29,7	29,7	29,1	29,6	29,5	29,1	29,2	30,5	30,7	30,8	29,9
Temperatura Mínima (°C)	24,7	23,2	23,8	23,4	23,4	22,1	21,8	22,6	23,4	24,5	24,4	24,6	23,5
Temp Máx Absoluta (°C)	33	33,3	32,8	32,6	32,8	32	33	34,4	33,4	33,4	33	33,2	34,4
Temp Mín Absoluta (°C)	20,1	21,2	20,6	20	21	20,3	19,3	19,5	20,1	20,9	20,6	21	19,3
Precipitação Total (mm)	130	216	339	348	226	160	91,4	31,2	22,8	15,6	13,4	49,8	1642,3
Precip-Máx em 24h (mm)	81,2	211	128	196	131	142	149	131	38,1	36	19,1	74,4	211,4
Evaporação Total (mm)	120	95,5	72,4	68,1	84,6	94,7	118	152	168	174	168	154	1469,2
Umidade Relativa (%)	78	79	84	85	82	80	80	75	74	73	74	76	78,3
Insolação Total (horas)	216	176	149	153	209	240	263	169	283	296	283	257	2694,3
Nebulosidade (0-10)	6	6	7	7	6	5	4	4	4	4	5	5	5,3

Fonte: Normais Climatológicas (1961-1990), Brasília, 1992

Ministério da Agricultura e Reforma Agrária

Secretaria Nacional de Irrigação

Departamento Nacional de Meteorologia

Fonte: Adaptado de *Climaticus*®, desenvolvido por Alucci, (2005).

Normais climatológicas correspondem à média dos dados medidos durante 30 anos, controlados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A série de registros compreende ao período de 1961 a 1990, e foram compilados no software *Climaticus*®, desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP).

A temperatura do ar corresponde a temperatura de bulbo seco, expresso em °C. A sua importância nos estudos de conforto térmico é para a determinação da transferência de calor por convecção entre a pessoa e o ambiente ao seu redor (WALLAUER, 2003).

A localização geográfica tem grande influência nas condições de conforto térmico dos

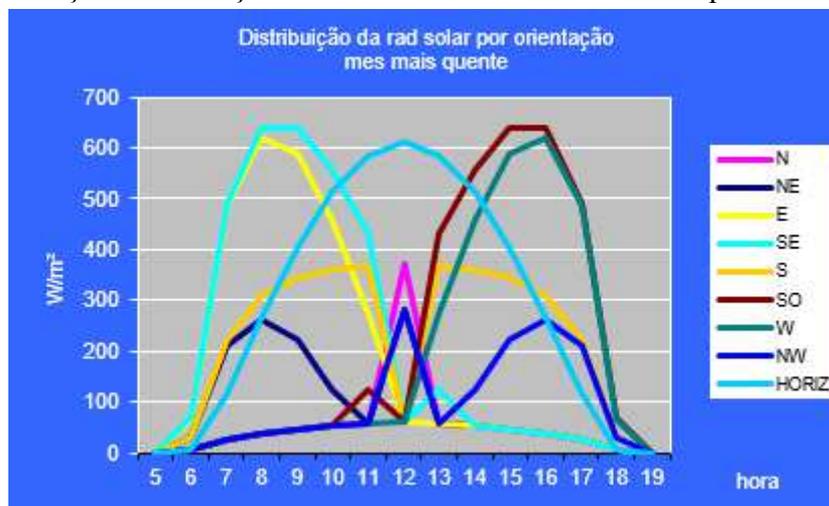
edifícios. Considerando a localização e característica de cada localidade, projetistas adotam estratégias adequadas de conforto, gerando edificações com maior harmonia com seu entorno, respondendo as demandas ambientais e entregando maior conforto aos ocupantes (LARASATI; MOCHTAR, 2013).

2.1.2 Radiação Solar

Radiação solar é toda radiação eletromagnética proveniente do Sol que atinge o planeta (Querino et al. 2006). Aproximadamente 25% desta radiação solar penetra na superfície da Terra de forma direta.

A cidade de Fortaleza situa-se próximo ao equador (3°S) e a distribuição de radiação solar apresenta incidência em praticamente todas as orientações. Orientações leste e oeste tem variação similar durante o ano, sempre com elevados níveis de radiação (LEITE, 2015). A Figura 01 apresenta a média de distribuição de radiação (W/m²) no mês mais quente durante o dia.

Figura 1 - Distribuição da Radiação solar em Fortaleza no mês mais quente



Fonte: *Climaticus*®, desenvolvido por Alucci, (2005).

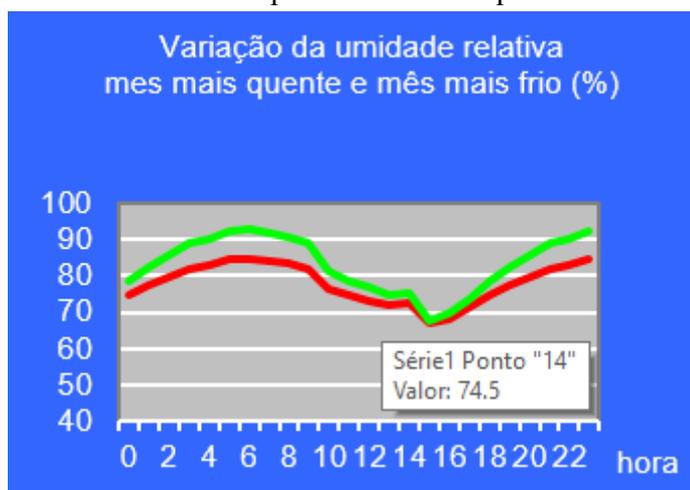
O projeto passivo (que tira proveito do clima para manter temperaturas confortáveis) em regiões tropicais úmidas busca maneiras de prevenir aquecimento das edificações gerado pela radiação solar, sem sacrificar as necessidades de iluminação natural. A luz solar, que consiste de luz e calor, só será usada o seu componente de luz, enquanto o componente de calor será eliminado (LARASATI; MOCHTAR, 2013).

2.1.3 Umidade Atmosférica

A umidade atmosférica é consequência da evaporação das águas e da transpiração das plantas. Como definição de umidade absoluta tem-se que é o peso do vapor de água contido em uma unidade de volume de ar (g/m^3), e a umidade relativa se trata da relação entre a umidade absoluta com a capacidade máxima do ar de reter vapor d'água, àquela temperatura. Isto equivale a dizer que a umidade relativa é uma porcentagem da umidade absoluta de saturação (FROTA, 2001).

Frota (2001) comenta a maior influência do grau de umidade relativa do ar nas condições climáticas de um local é quanto à amplitude da temperatura diária. Isto é: quanto mais seco for o clima, mais acentuadas serão suas temperaturas máximas e mínimas. Na cidade de Fortaleza, as médias de umidade relativa do ar situam-se acima de 70% durante todo ano, como podemos observar Figura 2:

Figura 2 - Variação da Umidade relativa para o mês mais quente e o mês mais frio



Fonte: *Climaticus*®, desenvolvido por Alucci, (2005).

Importante salientar que falta de umidade pode causar distúrbios respiratórios. As estratégias de arquitetura mais comuns visam introduzir umidade através de correntes de ar, para as quais é necessário considerar as condições de circulação de ar dominante, a fim de fornecer umidade para as salas vizinhas (MANZANO-AGUGLIARO et al., 2015).

2.1.4 Ventos (movimento do ar)

O vento é definido como o módulo do vetor velocidade do fluxo de ar, comumente expresso em m/s. A velocidade do vento deve ser levada em consideração nos estudos de conforto térmico para determinação de transferência de calor por convecção e por evaporação.

Na cidade de Fortaleza, os dados médios mensais de velocidade do vento são apresentados na Tabela 03. De maneira geral, o vento em Fortaleza apresenta intensidade moderada, tendo em sua predominância valores acima de 3,00m/s.

Tabela 3 - Direção e velocidade do vento para Fortaleza

Cidade: Fortaleza				
Primeira predominância			Segunda Predominância	
mês	Direção(°)	Velocidade(m/s)	Direção(°)	Velocidade(m/s)
janeiro	120	3,50	150	3,50
fevereiro	120	3,50	150	3,00
março	120	3,50	150	3,50
abril	120	3,50	150	3,00
maio	100	3,00	120	3,00
junho	120	3,00	100	3,00
julho	150	3,50	120	3,00
agosto	120	3,50	150	3,00
setembro	120	4,50	150	3,50
outubro	120	3,50	150	5,00
novembro	120	4,50	150	5,00
dezembro	120	3,50	150	4,00
media/ano	120	3,50	140	4,00

Fonte: Adaptado de *Climaticus*®, desenvolvido por Alucci, (2005).

Nos edifícios residenciais, Leite (2015) explica que entre os elementos que compõem o clima, o vento é o que mais facilmente pode ter seu comportamento alterado pela urbanização. Ao analisar o vento sobre o ambiente construído é possível concluir que o comportamento dos fluxos é influenciado pela geometria e orientações de obstáculos e estruturas urbanas (LEITE, 2015).

2.1.5 Considerações finais sobre clima no Brasil

No Brasil há predominância de climas quentes e úmidos e quentes e secos. Nas regiões predominantemente quentes no Brasil, a arquitetura deve contribuir para minimizar a diferença entre as temperaturas externas e internas do ar (FROTA, 2001).

Em casos de condições muito severas de temperatura, deve-se procurar sempre por soluções arquitetônicas que maximizem o desempenho térmico natural reduzindo a potência de equipamentos de refrigeração.

De acordo com Szokolay (2014), climas quentes e úmidos são difíceis de projetar quanto ao desempenho térmico pois as temperaturas máximas podem não ser tão altas quanto as temperaturas dos climas quentes e secos, porém a variação diurna é menor.

Leite (2015) afirma que regiões quentes e úmidas, onde a variação da temperatura do ar ao longo do dia é pequena e têm-se elevados níveis de umidade relativa, é fundamental o controle da radiação solar e o incremento da ventilação natural no interior das edificações.

Altas taxas de umidade do ar dificultam o resfriamento dos ambientes. Nas regiões quentes e úmidas, a maioria das zonas de conforto térmico estabelecidas determinam que a temperatura do ar não ultrapasse 30°C, associado a uma umidade relativa do ar acima de 60% (SZOKOLAY, 2004).

2.2 Ventilação Natural

A ventilação natural proporciona a renovação do ar do ambiente, sendo importante para o conforto térmico de verão em regiões de clima temperado e de clima quente e úmido. A renovação do ar dos ambientes proporciona a dissipação de calor e a desconcentração de vapores, fumaça, poeiras, de poluentes, entre outros. A ventilação pode também ser feita via meios mecânicos (FROTA, 2001), porém, neste trabalho, aborda-se a ventilação natural como um dos meios de controle térmico do ambiente.

Tecnologias passivas, como a ventilação natural, dissipam cargas de aquecimento. O projeto de edifícios deve, desta forma, minimizar o consumo de energia. Portanto, parece fundamental entender as implicações de conforto de acordo as condições climáticas específicas da região (BECCALI *et al.*, 2018).

Segundo Frota (2001), a ventilação natural é o deslocamento do ar através do edifício, através de aberturas, umas funcionando como entrada e outras, como saída. Assim, as aberturas para ventilação deverão estar dimensionadas e posicionadas de modo a proporcionar um fluxo de ar adequado ao recinto. Ventilação natural, portanto, segundo ASHRAE (2012), constitui acesso intencional de fluxo de ar do exterior para o interior do edifício através das aberturas.

A ventilação se dá pela diferença de pressão entre diferentes zonas. Essas diferenças de

pressão podem ser causadas pelo movimento do ar ou por diferenças de temperatura.

O fluxo de ar que entra ou sai do edifício depende da diferença de pressão do ar entre os ambientes internos e externos, da resistência ao fluxo de ar oferecida pelas aberturas, pelas obstruções internas e de uma série de implicações relativas à incidência do vento e forma do edifício. A diferença de pressões exercidas pelo ar sobre um edifício pode ser causada pelo vento ou pela diferença de densidade do ar interno e externo, ou por ambas as forças agindo simultaneamente (LAMBERTS, 2016; FROTA, 2001; LEITE, 2015).

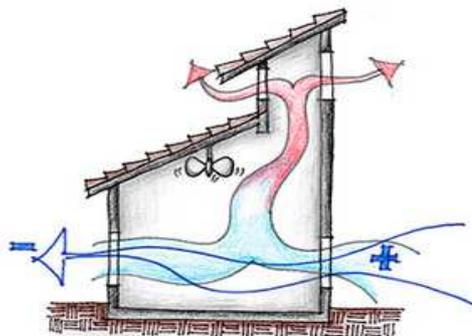
A força dos ventos promove a movimentação do ar através do ambiente, produzindo a ventilação denominada ação dos ventos. O efeito da diferença de densidade provoca o chamado efeito chaminé.

O termo "ventilação" é usado para três processos totalmente diferentes e serve para três propósitos diferentes:

1. Fornecimento de ar fresco, para remover odores, CO_2 e outros contaminantes;
2. Remover algum calor interno;
3. Para promover dissipação de calor da pele, isto é, arrefecimento fisiológico (SZOKOLAY, 2014)

Os sistemas passivos de ventilação baseiam-se em diferenças de pressão para mover o ar fresco através dos edifícios (Figura 03). Quanto mais alta a velocidade do ar, maior é o efeito de resfriamento (LEITE, 2015).

Figura 3 - Ventilação Natural



Fonte: Projetee, 2019.

Sorgato (2018) conclui que a área de ventilação tem influência significativa no desempenho térmico dos ambientes de permanência prolongada de edificações residenciais.

2.3 Índices de avaliação do conforto térmico

Analisando os aspectos relativos ao conforto térmico, são encontradas duas abordagens diferentes e com prescrições distintas a respeito de como as condições microclimáticas das edificações podem ser administradas. A primeira, mais conhecida como estática, ou racional, da avaliação das sensações térmicas humanas, considera o homem como um simples receptor passivo do ambiente térmico. Já a segunda abordagem, conhecida como adaptativa, considera o homem como um agente ativo, que interage com o ambiente em resposta às suas sensações e preferências térmicas.

Os índices de conforto térmico determinam os limites de exposição humana às condições ambientais e indicam a melhor estratégia para estabelecer condições de conforto aceitáveis (SZOKOLAY, 2014).

Os estudos em câmaras climatizadas deram origem ao método mais conhecido para avaliação de conforto térmico, conhecido como estático (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). Tais estudos foram realizados no interior de um ambiente totalmente controlados pelo pesquisador, onde tanto as variáveis ambientais, como as variáveis pessoais ou subjetivas, podem ser manipuladas a fim de se encontrar a melhor combinação possível entre elas, resultando em uma situação confortável.

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2016), o professor Ole Fanger realizou diversos experimentos de conforto térmico na Dinamarca na década de 70, e é o principal representante da linha analítica de avaliação das sensações térmicas humanas. Suas equações e métodos têm sido utilizados mundialmente e serviram de base para a elaboração de normas internacionais importantes, fornecendo subsídios para o equacionamento e cálculos analíticos de conforto térmico conhecido hoje como PMV (*Predicted Mean Vote*) e PPD (*Percentage of Dissatisfied*).

O índice PMV, segundo Szokolay (2014), constitui relação térmica do corpo com ambiente. Porém, o modelo estático foi posteriormente muito discutido, já que considerava os limites confortáveis de temperatura como sendo “universais”. Com o avanço das pesquisas, muitos estudos foram realizados não só em câmaras climatizadas, mas também em situações reais do cotidiano. O modelo de Ole Fanger é referência para Norma Internacional ISO 7730 e ASHRAE Standard 55 (LEITE, 2015).

A partir desta avaliação da sensação térmica em ambientes reais, Michael Humphreys, em 1975, propôs o modelo adaptativo, que supõe que um grupo de pessoas pode se adaptar diferentemente quando habitam em diferentes locais geográficos, como uma forma de ajuste do

corpo ao meio térmico local (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

Na essência do modelo adaptativo encontra-se uma tendência humana natural de adaptar-se às mudanças ambientais (BRAGER,1998; HUMPREYS, 1975). Neste modelo as temperaturas de conforto estão relacionadas às temperaturas externas.

Existem também outras ferramentas que podem ajudar a definir os índices térmicos, como exemplo têm-se as cartas bioclimáticas que são ferramentas capazes de ajudar os projetos de edifícios em locais definidos.

2.3.1 Modelo estático

Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2016), o modelo estático de avaliação do conforto térmico foi criado através de análises estatísticas em estudos com câmaras climatizadas (Figura 04).

Figura 4 - Experimentos com ocupantes em câmaras climatizadas



Fonte: OLESEN, 1982.

Neste modelo utiliza-se o índice PMV (ou voto médio estimado), em que as pessoas registram seus votos numa escala sétima (que varia de +3 a -3) da norma americana ASHRAE (2010), que aponta desde muito frio (-3) até muito quente (+3). A sensação real sentida pela pessoa é representada pela “equação do PMV” ou equação do voto médio estimado, que pode ser assim representada pela equação (2):

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028) \cdot L \quad (2)$$

onde:

PMV: voto médio estimado, ou voto de sensação de conforto térmico;

M: atividade desempenhada pelo indivíduo;

L: carga térmica atuante no corpo.

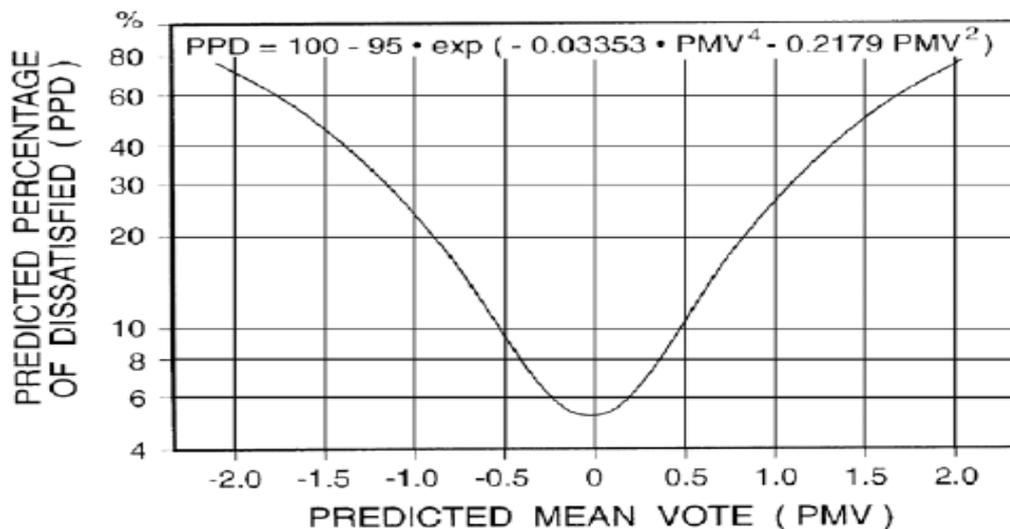
O índice PPD (porcentagem de pessoas insatisfeitas) estabelece a quantidade de pessoas

insatisfeitas termicamente com o ambiente (CALVINO *et al.* 2004). Ele se baseia na percentagem de um grande grupo de pessoas que gostariam que o ambiente estivesse mais quente ou mais frio, votando +3, +2 ou -3 e -2, na escala sétima de sensações. O PPD pode ser determinado analiticamente conforme a equação 3:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-[0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2]} \quad (3)$$

A partir destas equações conseguimos traçar um diagrama apresentado na Figura 05 da percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) em função do voto médio predito (PMV):

Figura 5 - Percentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) em função do Voto Médio predito (PMV)



Fonte: ASHRAE STANDARD 55, 2013.

Em posse dos resultados analíticos obtidos, algumas normas internacionais correlacionam os resultados do PPD e PMV. Como exemplo a norma ISO 7730 de 2005, que recomenda que em espaços de ocupação humana termicamente moderada o PPD deve ser menor que 10%, o que corresponde a uma faixa de PMV de -0,5 a 0,5 (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016).

O índice PMV é proposto para avaliação do conforto interno em edifícios com radiação solar (ZHANG *et al.*, 2018). O modelo estático (PMV) funciona muito bem em ambientes climatizados, mas verifica-se falho em ambientes ventilados naturalmente, onde os ocupantes interagem em busca da melhor situação de conforto (YANG; YAN; LAM, 2014).

2.3.2 *Modelo adaptativo*

A abordagem adaptativa considera que a tendência natural das pessoas a adaptar-se às mudanças que ocorrem no ambiente diminui a sensação de desconforto (BRAGER; DEAR, 1998).

O modelo adaptativo é baseado no princípio que estabelece que as temperaturas termicamente confortáveis são socialmente, historicamente, tecnologicamente e economicamente condicionadas e dependentes das variações estacionais. A principal variável contextual na abordagem adaptativa é o clima (FERREIRA; SOUZA, 2013).

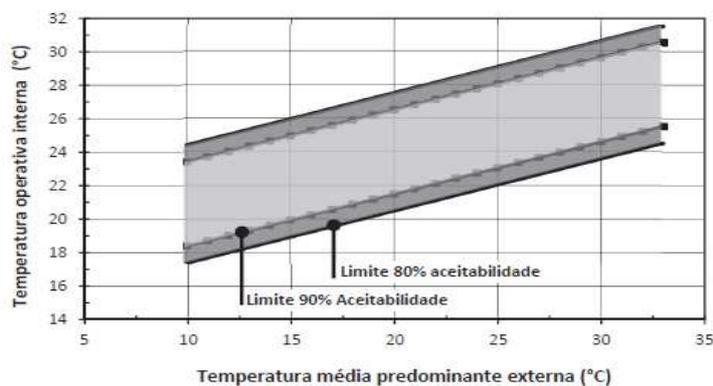
A satisfação da sensação térmica e aceitabilidade são influenciadas pela equiparação entre uma expectativa do clima do ambiente com um contexto particular, relacionada com condições existentes. As normas mais conceituadas que adotam o modelo adaptativo de conforto térmico são a ASHRAE STANDARD 55:2017 e a EN 15251, ambas desenvolvidas em edificações reais sem condicionamento artificial (SORGATO, 2015).

As diferenças nas variações fisiológicas e psicológicas de cada pessoa são aspectos que impedem a definição de um nível de 100% de satisfação para todos, em um mesmo espaço, visto que as condições necessárias para obtenção do conforto não são iguais para os diferentes usuários. Assim, os limites de aceitabilidade de 90% devem ser usados quando se deseja um padrão mais elevado de conforto térmico (ASHRAE, 2013).

Alguns modelos de conforto adaptativo propõem uma correlação entre a temperatura do interior da edificação e a temperatura externa do ar, considerando que os usuários se adaptam às variações sazonais e ao clima local. O modelo adaptativo está baseado em correlações entre a impressão subjetiva de conforto descrita pelos ocupantes e a temperatura interior em centenas de edificações reais (SORGATO, 2015).

A Figura 06 mostra os limites da zona de conforto da ASHRAE 55, com porcentagem de aceitabilidade dos usuários em 80% e 90% utilizando a metodologia adaptativa para conforto térmico de edificações:

Figura 6 - Limites da zona de conforto.



Fonte: Adaptado de ASHRAE STANDARD 55, 2013.

A principal variável contextual na abordagem adaptativa é o clima. O clima no qual habitam irá influenciar de sobremaneira as pessoas, de forma cumulativa na resposta do indivíduo no clima interno. Outro fator que irá influenciar é a edificação em si e suas instalações, de forma a determinar se o usuário poderá atuar sobre as variáveis que influenciam o clima interno (FERREIRA; SOUZA, 2013).

O conforto adaptativo leva em conta fatores culturais e o comportamento de pessoas em um sistema mais complexo de análise, tendo em vista que as pessoas não são passivas em relação ao ambiente e tendem a realizar ações para ficarem mais confortáveis. O equilíbrio desse sistema depende do clima, hábitos e da própria operação do edifício (DEAR; BRAGER, 2001).

Modelos adaptativos tendem a obter maior alcance de temperaturas de conforto e podem obter economia de energia tanto em ambientes climatizados quanto em ambientes ventilados naturalmente (YANG; YAN; LAM, 2014).

Os índices de conforto térmico compõem-se como importantes ferramentas para desenvolvimento do projeto arquitetônico. Contudo, a dificuldade deste tipo de abordagem está na grande variação climática existente no Brasil, país de dimensões continentais, uma vez que há a necessidade de enfatizar fatores ambientais distintos de acordo com a aclimação da população para cumprir com os requisitos de conforto térmico (ASSIS, 2001).

A literatura apresenta alguns índices de conforto adaptativo, os quais apresentam-se a seguir:

1. O modelo de Humphreys (HUMPHREYS, 1975);
2. O modelo de Auliciems (AULICIEMS; SZOKOLAY, 2002);
3. O modelo de Nicol e Humphreys (NICOL; HUMPHREYS, 2002);
4. O modelo de DeDear e Brager (DEAR; BRAGER, 2002), adotado pela norma ASHRAE 55 (2004) como modelo adaptativo alternativo para edificações

naturalmente ventiladas;

5. O modelo desenvolvido por Xavier (XAVIER, 1999), baseado em dados de Florianópolis e considerando o contexto climático regional.

Na Tabela 04 estão apresentadas as equações de cada um dos modelos e suas respectivas faixas de conforto, sendo T a temperatura externa média mensal.

Tabela 4 - Índices adaptativos aplicados e suas respectivas equações e faixas de conforto

ÍNDICES ADAPTATIVOS	EQUAÇÃO	FAIXA DE CONFORTO
Auliciems (1981)	$T_n = 0,314 T + 17,6^{\circ}\text{C}$	Sem definição
Humphreys (1975)	$T_n = 0,534 T + 12,9^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2$ a 3°C e em condições de umidade relativa elevada, $T_n \pm 1^{\circ}\text{C}$
Nicol e Humphreys (2002)	$T_n = 0,540 T + 13,5^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2^{\circ}\text{C}$ em situações onde não há possibilidades de mudança de vestimenta, nível de atividade ou taxa de ventilação
De Dear e Brager (2002)	$T_n = 0,310 T + 17,8^{\circ}\text{C}$	$T_n \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ (90% de aceitabilidade) e $T_n \pm 3,5^{\circ}\text{C}$ (80 % de aceitabilidade)
Xavier (1999)	$T_n = 0,351 T + 16,051^{\circ}\text{C}$	Sem definição

Fonte: Adaptado de PEREIRA e ASSIS, 2010

Legenda:

T_n : temperatura de conforto ou de neutralidade;

T: temperatura média mensal externa.

Humphreys (1975) observou que o centro da zona de conforto poderia ser determinado a partir da temperatura ambiente mais frequentemente apontada como confortável, chamada de temperatura neutra (T_n).

Como alternativa ao uso do PMV, alguns autores brasileiros têm adotado diferentes índices adaptativos. Esses índices caracterizam-se por sua simplicidade. De modo geral, apresentam uma temperatura de conforto térmico em função da temperatura média mensal registrada (PEREIRA; ASSIS, 2010).

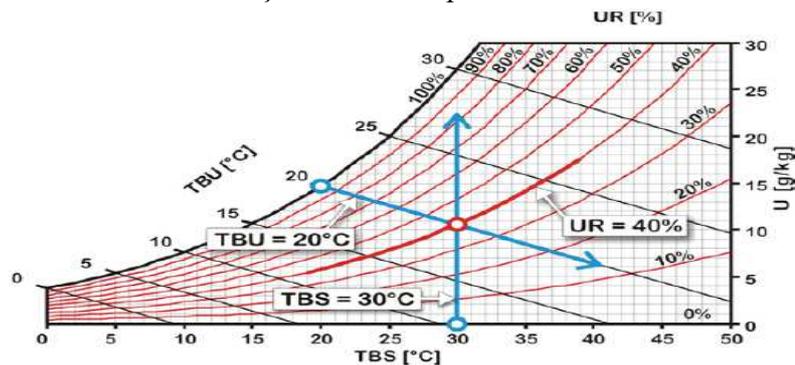
Por esse motivo, servem como modelo exploratório nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, nas quais o projetista possui poucos dados e necessita de informações objetivas para direcionar as estratégias que adotará. Contudo, não existe consenso sobre qual índice adaptativo usar, visto que existem vários modelos desenvolvidos no mundo. No Brasil, a ABNT NBR 15575:2013 não valida índices de conforto adaptativo. (PEREIRA; ASSIS, 2010).

2.3.3 Cartas bioclimáticas

Cartas bioclimáticas são ferramentas importantes no entendimento das transformações do ar úmido, ou seja, diferentes combinações das variações de temperatura e de umidade influenciam nos processos de transferência de calor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016). Estas cartas são bastante utilizadas para analisar processos de condicionamento de ar e conforto térmico.

Tamanini (2002) afirma que as cartas bioclimáticas são uma forma de traduzir o clima de um local em estratégias de projeto. Essas Cartas associam informações sobre a zona de conforto térmico, o comportamento climático do local e as estratégias de projetos indicadas para cada período do ano. As estratégias indicadas podem ser naturais (sistemas passivos) ou artificiais (sistemas ativos). A Figura 07 apresenta um modelo genérico de carta bioclimática.

Figura 7 - Carta bioclimática e as relações entre temperaturas e umidade relativa.



Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2016.

A carta bioclimática proposta por Givoni (1992) para o clima do Brasil utiliza-se dos dados climáticos das 8.760 horas de um ano climático típico (*Test Reference Year - TRY*). A Figura 08 apresenta a Carta Bioclimática que Givoni (1992) concebeu sobre o diagrama psicrométrico, que relaciona a temperatura e umidade relativa do ar. Conforme Papst e Lamberts (2001), com os valores destas duas variáveis num ano climático da localidade, o projetista pode ter indicações fundamentais sobre as estratégias bioclimáticas a serem adotadas no projeto de uma edificação.

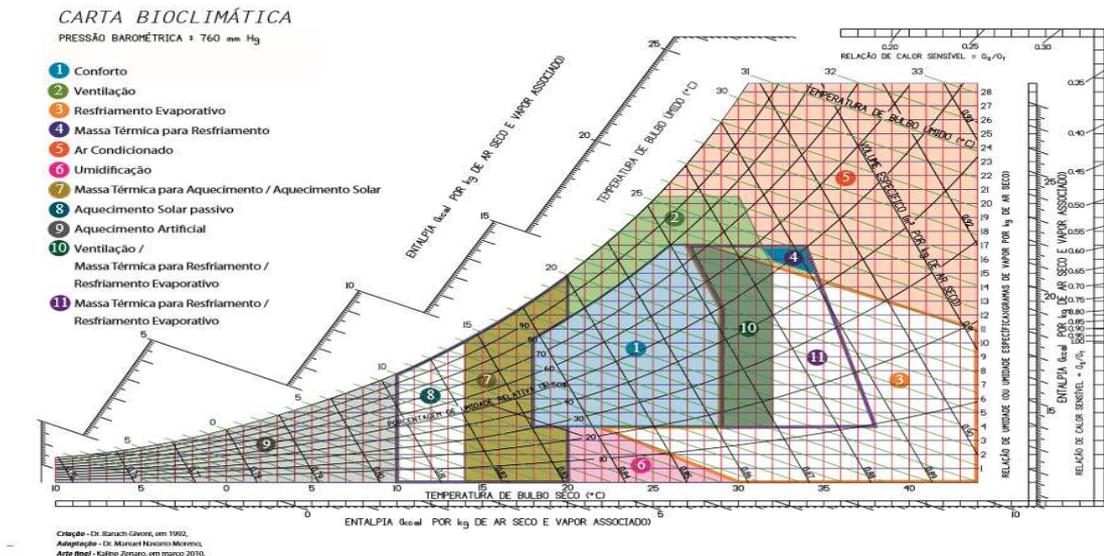
O diagrama de Givoni, apresentado na Figura 08, é um diagrama bioclimático que foi dividido em diferentes zonas para as quais é necessário usar estratégias para alcançar o conforto humano dentro de um edifício (MANZANO-AGUGLIARO *et al.*, 2015).

A zona de conforto, identificada na carta de Givoni, exhibe condições ideais de conforto térmico para o corpo humano. Estatisticamente falando, esta zona é confortável para 70% da

população (MANZANO-AGUGLIARO *et al.*, 2015).

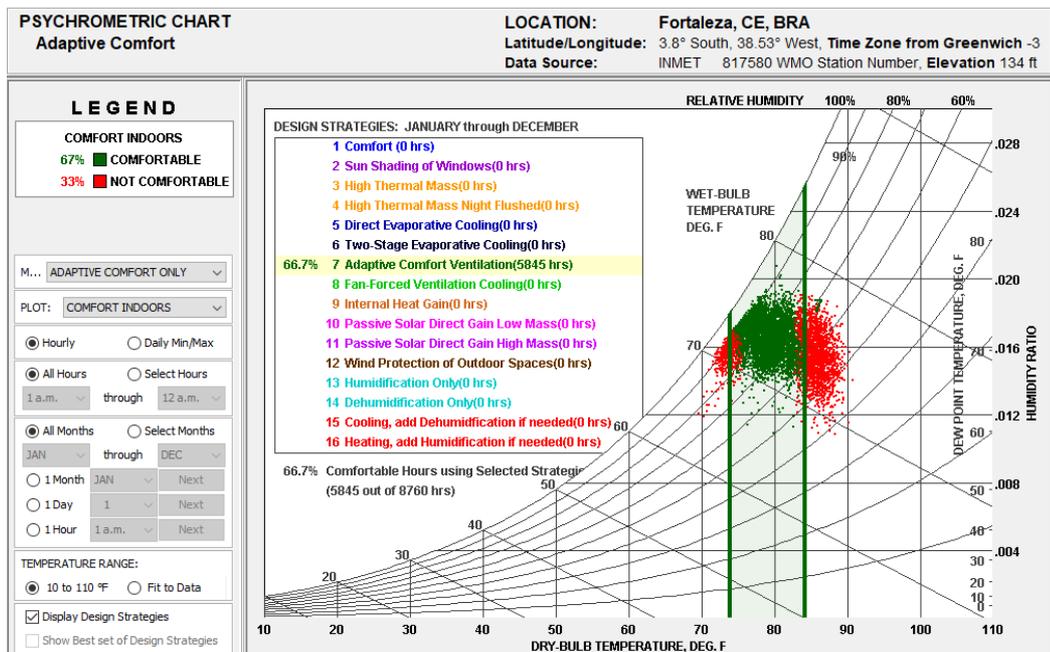
Na Figura 09, apresenta-se a carta psicrométrica de Fortaleza. A zona de conforto de acordo com a carta psicrométrica para 66,7% da população seria com umidades entre 60% e 90% e temperaturas de bulbo seco entre 23,3°C (74°F) e 28,8°C (84°F).

Figura 8 - Carta bioclimática criada por Givoni



Fonte: Givoni, 1992.

Figura 9 - Carta Psicrométrica de Fortaleza



Fonte: Climate Consultant 6.0 ®, 2019.

2.4 Desempenho térmico de edificações segundo a ABNT NBR 15575:2013

A norma brasileira NBR 15575: Edificações habitacionais - Desempenho (ABNT, 2013) representa um avanço no setor da construção civil. É importante que se mantenha uma discussão constante sobre ela, a fim de estimular seu aprimoramento (CHVATAL, 2014).

As normas de desempenho de edificações avaliam e regulamentam o setor da construção civil, garantindo um padrão mínimo de qualidade e desempenho das edificações residenciais (SORGATO, 2013).

Ainda de acordo com Sorgato (2013), as normas de desempenho das edificações avaliam e regulamentam desde os ganhos através das superfícies externas e aberturas existentes até as condições de ventilação do ambiente. Tais normas permitem identificar os materiais construtivos mais adequados à determinada edificação, de acordo com o clima em que está inserida

A NBR 15575 (ABNT, 2013) tem causado um grande impacto no setor da construção civil desde a publicação de sua primeira versão em 2008. Ela não é uma norma prescritiva, porém é uma norma que indica como o prédio deve ser construído para que o desempenho desejado (mínimo, intermediário ou superior) seja atingido, independentemente de seu sistema construído. A norma ABNT NBR 15575:2013 foca nas exigências dos usuários para o edifício habitacional e seus sistemas, quanto ao seu comportamento em uso e não na prescrição de como os sistemas são construídos. O objetivo final é atender as necessidades do usuário. Os seguintes aspectos são avaliados na norma:

- a) Segurança (estrutural, contra o fogo, no uso e operação);
- b) Habitabilidade (estanqueidade, desempenho térmico, acústico, lumínico, saúde, higiene e qualidade do ar, funcionalidade, acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico); e
- c) Sustentabilidade (durabilidade, manutenibilidade e impacto ambiental).

A norma de desempenho é composta de 06 partes:

Parte 01 - Requisitos gerais;

Parte 02 - Sistemas estruturais;

Parte 03 - Sistemas de pisos;

Parte 04 - Sistemas de vedação verticais internas e externas;

Parte 05 - Sistemas de coberturas; e

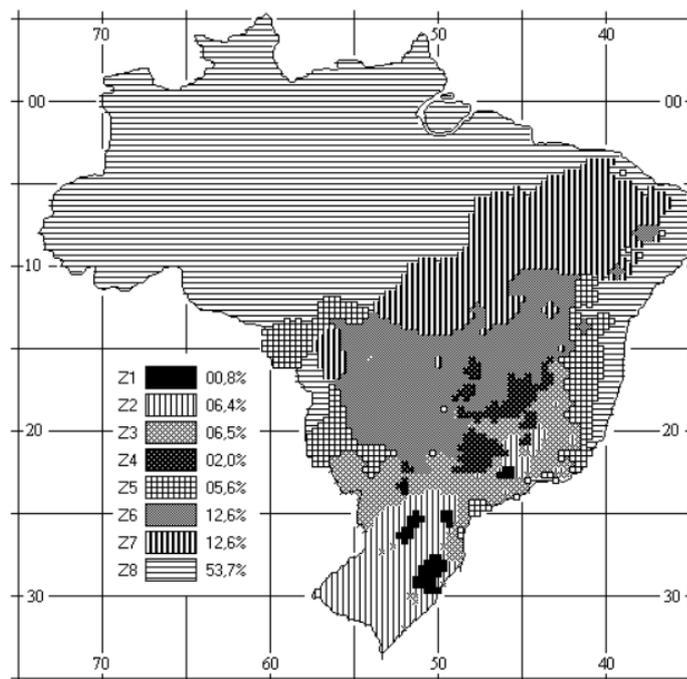
Parte 06 - Sistemas hidrossanitários.

O tema sobre análise de desempenho térmico é tratado na parte 1 da norma de desempenho (requisitos gerais) e na parte 4 (sistemas de vedação verticais internas e externas).

O adequado desempenho térmico repercute no conforto das pessoas e em condições adequadas para o sono e atividades normais em uma habitação, contribuindo ainda para a economia de energia. A avaliação de desempenho pode ser feita de forma simplificada, com base em propriedades térmicas das fachadas e das coberturas, ou por simulação computacional, onde são modelados simultaneamente todos os elementos e todos os fenômenos intervenientes (CBIC, 2013). A norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013), trata o desempenho térmico em condições naturais de ventilação, insolação e outras.

De acordo com a norma NBR 15220-3 (ABNT, 2005), o Brasil é dividido em oito regiões bioclimáticas (Figura 10), considerando a grande extensão territorial do país. Para cada zona bioclimática é definido um dia típico de inverno e um dia típico de verão.

Figura 10 - Zoneamento bioclimático brasileiro



Fonte: NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) utiliza critérios como transmitância térmica, capacidade térmica, aberturas de ventilação e dispositivos de sombreamento definidos pela ABNT NBR 15220:2005, nas suas partes 1 e 3.

A avaliação de desempenho térmico pode ser efetuada de diferentes formas:

1. Procedimento simplificado: verifica-se ao atendimento aos requisitos e critérios para o envelopamento da obra, com base na transmitância térmica (U) e na

capacidade térmica (CT) das paredes de fachadas e das coberturas.

2. Procedimento por simulação: caso os valores obtidos de transmitância e capacidade térmica não sejam satisfatórios, o desempenho térmico global da edificação deve ser avaliado por simulação computacional utilizando o software Energy Plus (software de simulação desenvolvido pelo Departamento de Energia do Governo Federal dos Estados Unidos).
3. Procedimento por medições *in loco*: medições feitas em períodos que correspondam os dias típicos de verão e de inverno. Podem ser realizadas medições em habitações já construídas ou em protótipos. O anexo A da norma NBR 15575-1:2013 apresenta as condições necessárias para medições *in loco*.

2.4.1 Modelo Simplificado

O método de avaliação prescrito pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013) considera duas alternativas para a obtenção do nível de desempenho: o procedimento simplificado; e o método de simulação computacional. Caso o desempenho mínimo não seja obtido através do procedimento simplificado, deve-se obrigatoriamente proceder ao método de simulação.

No procedimento simplificado, devem ser cumpridas três exigências:

- A área de abertura efetiva das janelas dos dormitórios e salas deve atender a um valor mínimo (determinado na ABNT NBR 15575-4), que é indicado em porcentagem, em função da área de piso - essa exigência somente é válida caso não haja legislação específica para o local da obra (código de obras, sanitários ou outros). O Quadro 01 mostra os limites de aberturas de ventilação segundo NBR 15575:2013.

Quadro 1 - Aberturas para ventilação

Nível de desempenho	Aberturas para Ventilação (A)	
	Zonas 1 e 7 Aberturas médias	Zona 8 Aberturas grandes
Mínimo	$A \geq 7\%$ da área de piso	$A \geq 12\%$ da área do piso região norte do Brasil $A \geq 8\%$ da área do piso região nordeste e sudeste do Brasil
Nota: Nas zonas 1 a 6 as áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15575-4 (2013).

- Paredes exteriores devem atender aos valores prescritos na Tabela 05 de transmitância térmica (U) e valores de capacitância térmica (CT) da Tabela 06;

- Coberturas devem atender aos valores prescritos na Tabela 05 de transmitância térmica (U).

Tabela 5 - Transmitância térmica de paredes externas e coberturas

	U (W/m ² .K)	M	Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 8				
			≤ 2,5	α ≤ 0,6	α > 0,6			
Paredes (desempenho mínimo/M)			≤ 2,5	≤ 3,7	≤ 2,5			
Coberturas (desempenho mínimo/M, intermediário/I e superior/S)	U (W/m ² .K)		Zonas bioclimáticas 1 e 2	Zonas bioclimáticas 3 a 6		Zonas bioclimáticas 7 e 8		
			α ≤ 0,6	α > 0,6	α ≤ 0,4	α > 0,4		
			M	≤ 2,3	≤ 2,3	≤ 1,5	≤ 2,3 FT	≤ 1,5 FT
			I	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,0	≤ 1,5 FT	≤ 1,0 FT
S	≤ 1,0	≤ 1,0	≤ 0,5	≤ 1,0 FT	≤ 0,5 FT			

Fonte: Adaptado da NBR 15575(ABNT, 2013).

A transmitância térmica (U, W / m².k) de paredes e telhados é um dos parâmetros mais importantes, que influenciam o desempenho térmico do edifício nos padrões prescritivos brasileiros, juntamente com o estabelecimento de áreas mínimas e ventilação natural (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Estudos dirigidos por Pacheco (2013) em cidades brasileiras como Belém e Curitiba indicam que menores valores de transmitância térmica resultaram em menor consumo de energia.

O fator de transmitância (FT) descrito no Quadro 02 é definido na NBR 15220-3 (ABNT, 2005), em que α é a absorvância à radiação solar externa da parede (Quadro 03).

Quadro 2 - Fator de Transmitância térmica

$FT = 1,17 - 1,07 \cdot h^{-1,04}$ <p>Onde:</p> <p>FT igual ao fator de correção da transmitância aceitável para as coberturas da zona 8 (adimensional);</p> <p>h igual à altura da abertura em dois beirais opostos, em centímetros.</p> <p>NOTA: Para coberturas sem forro ou com áticos não ventilados, FT = 1.</p>
--

Fonte: Adaptado da NBR 15220-3 (ABNT, 2005).

Quadro 3 - Absortância à radiação solar

Parede: assumir o valor da absortância à radiação solar correspondente à cor definida no projeto. Caso a cor não esteja definida, simular para três alternativas de cor:

- cor clara: $\alpha = 0,3$;
- cor média: $\alpha = 0,5$
- cor escura: $\alpha = 0,7$.

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Tabela 6 - Capacidade térmica de paredes externas

Capacidade térmica (CT)
KJ / m².K

Zona 8	Zonas bioclimáticas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
Sem exigência	≥ 130

Fonte: Adaptado da NBR 15575-4 (ABNT, 2013).

Conhecidos os parâmetros descritos na norma de desempenho, são escolhidos materiais e métodos construtivos que devem atender estas exigências normativas. Caso algumas das exigências do modelo simplificado não sejam atendidas, procede-se ao modelo computacional.

2.4.2 Modelo por simulação computacional

A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) estabelece que o desempenho térmico da edificação deve ser avaliado para duas condições: desempenho no verão e desempenho no inverno. O critério da análise é baseado em valores máximos e mínimos de temperatura dos ambientes de permanência prolongada. A norma recomenda que o desempenho da edificação seja avaliado em um ambiente de permanência prolongada (dormitório ou sala de estar, por exemplo) para a condição crítica do ponto de vista térmico (SORGATO *et al.*, 2014).

As informações sobre a localização geográfica de algumas cidades e os dados climáticos correspondentes aos dias típicos de verão e de inverno são apresentadas no anexo A da norma NBR 15575-1 (ABNT, 2013) ou na NBR 15220-3 (ABNT, 2005). Se acontecer falta de dados para a cidade que se pretenda analisar, recomenda-se utilizar os dados climáticos de uma cidade próxima e características semelhantes (LAMBERTS, 2016). Se o clima na cidade não for semelhante ao de nenhuma outra que tenha dados disponíveis, recomenda-se evitar o método de simulação computacional.

Para realização das simulações é recomendado o programa computacional *EnergyPlus*®. A NBR 15575-1 (ABNT, 2013) também permite a utilização de outros programas desde que se permita a determinação do comportamento térmico de edificações sob condições

dinâmicas de exposição ao clima, sendo capazes de reproduzir os efeitos de inércia térmica e sejam validados pela ASHRAE Standard 140.

Lamberts (2016) pontua que para a geometria do modelo de simulação, a habitação deve ser considerada como um todo, considerando cada ambiente como uma zona térmica. As propriedades térmicas dos materiais devem ser obtidas de três formas: em laboratório, junto aos fabricantes ou utilizar os dados de referência da ABNT NBR 15220-2 (2005).

O requisito exigido pela norma de desempenho é que no interior do edifício habitacional as condições térmicas sejam melhores ou iguais às do ambiente externo (Tabela 07). Para o dia crítico de inverno, nos recintos de permanência prolongada da habitação, a norma requer que os valores mínimos diários de temperatura sejam maiores ou iguais à temperatura mínima externa acrescida de 3°C (Tabela 08). Ressalta-se que o critério para avaliação do dia crítico de inverno não se aplica às zonas bioclimáticas 6, 7 e 8.

Tabela 7 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$

$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

Tabela 8 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condição de inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5	Zonas Bioclimáticas 6,7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ}\text{C})$	Nestas zonas, este critério não deve ser verificado.

$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;
 $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;
 NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.

Fonte: Adaptado da NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

2.4.3 Procedimento de Medição (Informativo)

É uma possibilidade adicional para avaliar, de forma menos criteriosa do que os métodos normativos descritos, o desempenho térmico da unidade habitacional. Por meio de

medição, a temperatura de bulbo seco pode ser comparada com os critérios de temperatura estabelecidos no método de simulação computacional (LAMBERTS, 2016).

Segunda a norma ABNT NBR 15575-1 (2013), deve-se medir a temperatura de bulbo seco do ar no centro dos recintos dormitórios e salas, a 1,20 m do piso. Para as medições de temperatura, seguir as especificações de equipamentos e montagem dos sensores, apresentadas na ISO 7726.

Em conjunto habitacional de unidades térreas e edifícios multipiso, a norma ABNT NBR 15575-1 (2013) indica escolher uma ou mais unidades, que possibilitem a avaliação nas condições estabelecidas a seguir:

- a) Verão: janela do dormitório ou sala voltada para oeste e outra parede exposta voltada para norte;
- b) Inverno: janela do dormitório ou sala de estar voltada para sul e outra parede exposta voltada para leste;
- c) No caso de edifício multipiso, selecionar unidades do último andar;
- d) Caso as orientações das janelas dos recintos não correspondam exatamente às especificações anteriores, priorizar as unidades que tenham o maior número de paredes expostas e cujas orientações das janelas sejam mais próximas da orientação especificada.

Para avaliação em protótipos, recomenda-se que eles sejam construídos considerando se as condições estabelecidas a seguir:

- a) Nas regiões bioclimáticas 6 a 8 (ABNT NBR 15220-3), protótipo com janela do dormitório ou sala voltada para oeste;
- b) Nas regiões bioclimáticas 1 a 5 (ABNT NBR 15220-3), construir um protótipo que atenda aos requisitos especificados a seguir:
- c) Condição de inverno: janela do dormitório ou sala de estar voltada para sul e outra parede exposta voltada para leste;
- d) Condição de verão: janela do dormitório ou sala voltada para oeste e outra parede exposta voltada para norte.

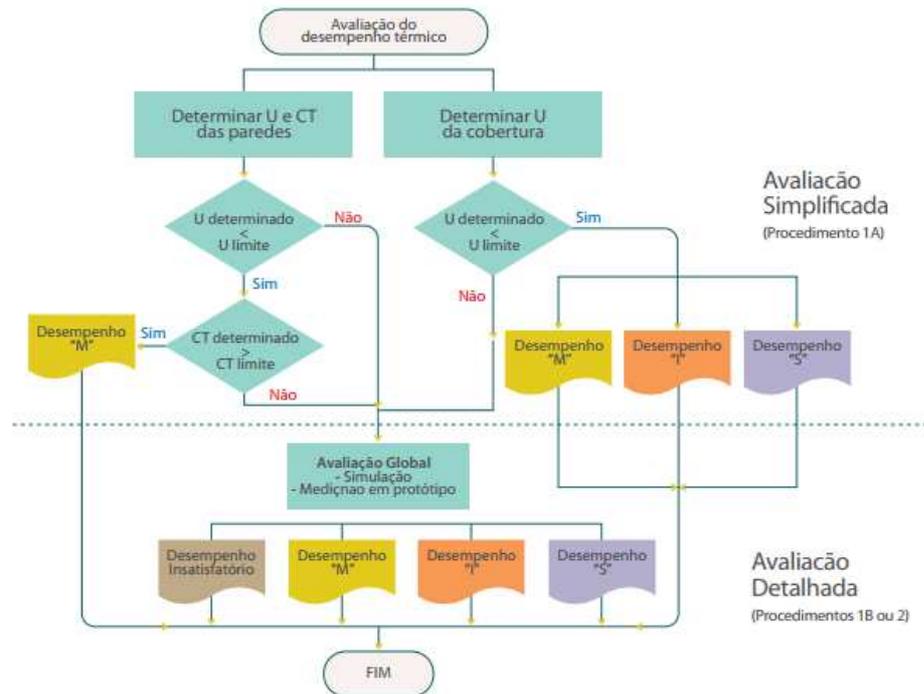
Período de medição: O dia tomado para análise deve corresponder a um dia típico de projeto, de verão ou de inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. Recomenda-se, como regra geral, trabalhar com uma sequência de três dias e analisar os dados do terceiro dia. Para efeito da avaliação por medição, o dia típico é caracterizado unicamente pelos valores da temperatura do ar exterior medidos no local.

A NBR 15.575-1 (ABNT, 2013) estabelece que a verificação e atendimento dos

requisitos e critérios desta norma por meio de realização de medição em edificações são de caráter meramente informativo, e não se sobrepõe aos procedimentos anteriores descritos.

Em resumo, segue fluxograma, apresentado na Figura 11, de metodologia de avaliação de desempenho térmico de acordo com a CBIC (2013).

Figura 11 - Procedimento de avaliação de desempenho térmico segundo NBR 15.575: 2013



Fonte: CBIC (2013).

2.5 Resistência térmica

A resistência térmica é um parâmetro físico muito importante nos estudos de desempenho e conforto térmico. Grandeza inversamente proporcional à transmitância térmica e que pode ser calculada de acordo com as camadas da envoltória da edificação. Cada material possui sua resistência específica e isto influencia diretamente nas análises térmicas de edificações. A Norma ABNT NBR 15220:2005 parte 02 informa os métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações de acordo com os materiais e geometria.

2.5.1 Camadas homogêneas

Valores da resistência térmica, R , obtidos através de medições baseadas em ensaios

normalizados, devem ser usados sempre que possível. Na ausência de valores medidos, conforme ISO 6946, recomenda-se que a resistência térmica, R , de uma camada homogênea de material sólido seja determinada pela expressão dada pela Eq. (04). Observe que a resistência térmica de um material depende da espessura da camada de material (e) e da condutividade térmica (λ) do mesmo:

$$R = e/\lambda \quad (4)$$

Este cálculo é feito para cada uma das seções das camadas do material, sendo que a resistência para cada seção (R_t) não ventilada é obtida de acordo com a Eq. (05), generalizada para o caso da existência de seções com diferentes resistências térmicas.

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (5)$$

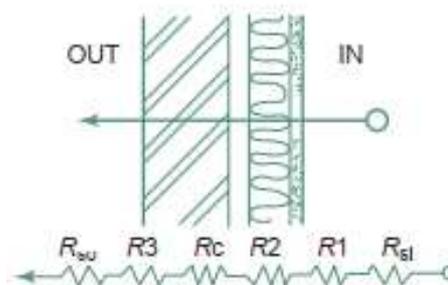
Onde, A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção; R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção. A resistência térmica de superfície a superfície é dada pela Eq. (06).

$$R_T = R_{Se} + R_t + R_{Si} \quad (6)$$

Onde, R_T é a resistência térmica de superfície a superfície; R_{Se} e R_{Si} são as resistências superficiais externas e internas, cujos valores são obtidos na NBR 15220-1:2005.

Quando ocorre em uma parede (envelope) várias camadas de material em série, como apresentada na Figura 12, as resistências térmicas se adicionam (SZOKOLAY, 2014).

Figura 12 - Fluxo de calor através de uma parede com três camadas.



Fonte: SZOKOLAY, (2014).

2.5.2 Câmara de ar

A resistência térmica de câmaras de ar (R_{ar}) não ventiladas pode ser obtida na Tabela 9:

Tabela 9 - Resistência térmica de Câmaras de Ar.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2 \cdot K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		⇒	⇑	⇓
Superfície de alta emissividade	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
$\varepsilon > 0,8$	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
$\varepsilon > 0,2$	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

1 ε é a emissividade hemisférica total.

2 Os valores para as câmaras de ar com uma superfície refletora só podem ser usados se a emissividade da superfície for controlada e previsto que a superfície continue limpa, sem pó, gordura ou água de condensação.

3 Para coberturas, recomenda-se a colocação da superfície refletora paralelamente ao plano das telhas (exemplo C.6 do

anexo C); desta forma, garante-se que pelo menos uma das superfícies - a inferior - continuará limpa, sem poeira.

4 Caso, no processo de cálculo, existam câmaras de ar com espessura inferior a 1,0 cm, pode-se utilizar o valor mínimo fornecido por esta tabela.

Fonte: Adaptado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005)

2.5.3 Superfícies

A resistência superficial externa (R_{se}) e a superficial interna (R_{si}) são obtidas na Tabela 10.

Tabela 10 – Resistência superficial externa e interna

$R_{si} (m^2.K)/W$			$R_{se} (m^2.K)/W$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
⇒	⇑	⇓	⇒	⇑	⇓
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

Fonte: Adaptado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005)

2.6 Transmitância térmica

A transmitância térmica (U) de componentes, de ambiente a ambiente, é o inverso da

resistência térmica total (R_T), conforme a Eq. (07). Tendo obtido o valor total da resistência térmica, é possível obter o valor do coeficiente global de transferência de calor (U), citado por Holman (2010).

$$U = 1/R_T \quad (7)$$

2.7 Capacidade térmica de componentes

A capacidade térmica de componentes pode ser determinada pela Eq. (08).

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (8)$$

Onde:

λ_i é a condutividade térmica do material da camada;

R_i é a resistência térmica da camada;

e_i é a espessura da camada;

c_i é o calor específico do material da camada;

ρ_i é a densidade de massa aparente do material da camada.

2.7.1 Componentes com camadas homogêneas e não homogêneas

A capacidade térmica (C_T) de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela Eq. (09).

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (9)$$

Onde:

C_{Ta} , C_{Tb} , ..., C_{Tn} são as capacidades térmicas do componente para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela Eq. 03; A_a , A_b , ..., A_n são as áreas de cada seção.

Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$), a sua capacidade térmica, em componentes com câmaras de ar, pode ser desprezada.

2.8 Inércia Térmica

Frota (2001) afirma que a inércia térmica está associada a dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico das edificações: o amortecimento e o atraso da onda

de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. A inércia térmica depende das características térmicas da envolvente e dos componentes construtivos internos.

A inércia térmica de um material influencia no tempo em que transcorre os momentos de temperatura máxima externa e a temperatura máxima interna, através de fluxo de calor do elemento construtivo (TAMANINI, 2002).

Quando, por exemplo, a temperatura exterior, suposta inicialmente igual à temperatura interior, se eleva, um certo fluxo de calor penetra na parede. Esse fluxo não atravessa a parede imediatamente, antes aquecendo-a internamente (FROTA, 2001).

Segundo Tamanini (2002), a capacidade de uma edificação de liberar e armazenar calor é chamada de inércia térmica. Sistemas construtivos com maior inércia térmica possuem um menor fluxo de calor entre os seus componentes, fazendo com que altas temperaturas demorem a se dissipar ao meio externo após os períodos de maior incidência de calor.

Com efeito, Verbeke e Audenaert (2018) afirmam que um edifício com uma grande quantidade de massa térmica é capaz de mudar as flutuações do fluxo de calor. Pode-se relacionar este efeito a um atraso térmico entre os materiais, que fazem com que ocorra uma diferença térmica num meio até a manifestação térmica no outro meio (superfície oposta).

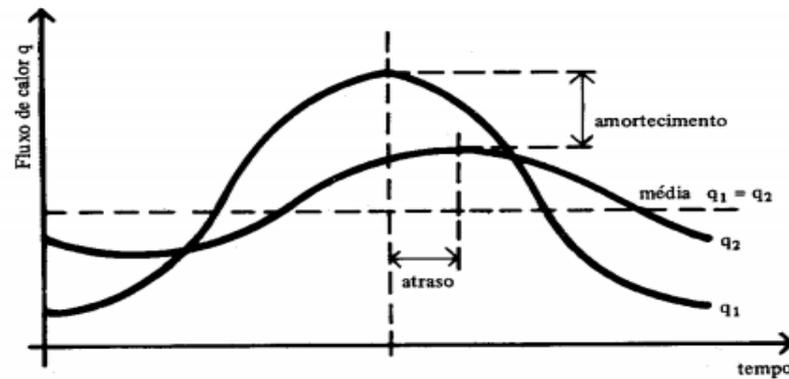
2.8.1 Inércia térmica da construção

Frota e Schiffer (2001) afirmam que para a avaliação da inércia térmica da construção, recorre-se ao conceito de superfície equivalente pesada. Esta é definida como o somatório das áreas das superfícies de cada uma das paredes interiores, inclusive piso e teto, multiplicadas por um coeficiente que será função do peso da parede e da resistência térmica de seus revestimentos em relação à área do piso do local.

Com isso, temos que uma parede apresenta maior ou menor inércia segundo seu peso e sua espessura. Contudo, os revestimentos desempenham importante papel, pois revestimentos isolantes reduzem as trocas de calor com a parede e reduzem sua inércia (FROTA, 2001).

Frota (2001) ainda afirma que o atraso e o amortecimento, juntos, compõem a inércia térmica, a qual é função da densidade, da condutibilidade e da capacidade calorífica da parede. A capacidade calorífica da parede (Figura 13) é expressa através do fator denominado calor específico, que se mede pela quantidade de calor necessária para fazer elevar de uma unidade de temperatura, a sua unidade de massa ($J/kg^{\circ}C$).

Figura 13 - Esquema explicativo do fenômeno da inércia térmica de uma parede real (q_2) e de uma parede fictícia de peso nulo (q_1).



Fonte: Frota, Schiffer; 2001.

A inércia térmica tem sido utilizada milenarmente como estratégia de condicionamento passivo de edifícios visando a obtenção de condições térmicas adequadas ao ser humano, em especial, em locais com alta amplitude da temperatura do ar (AKUTSU; BRITO; CHIEPPE, 2012).

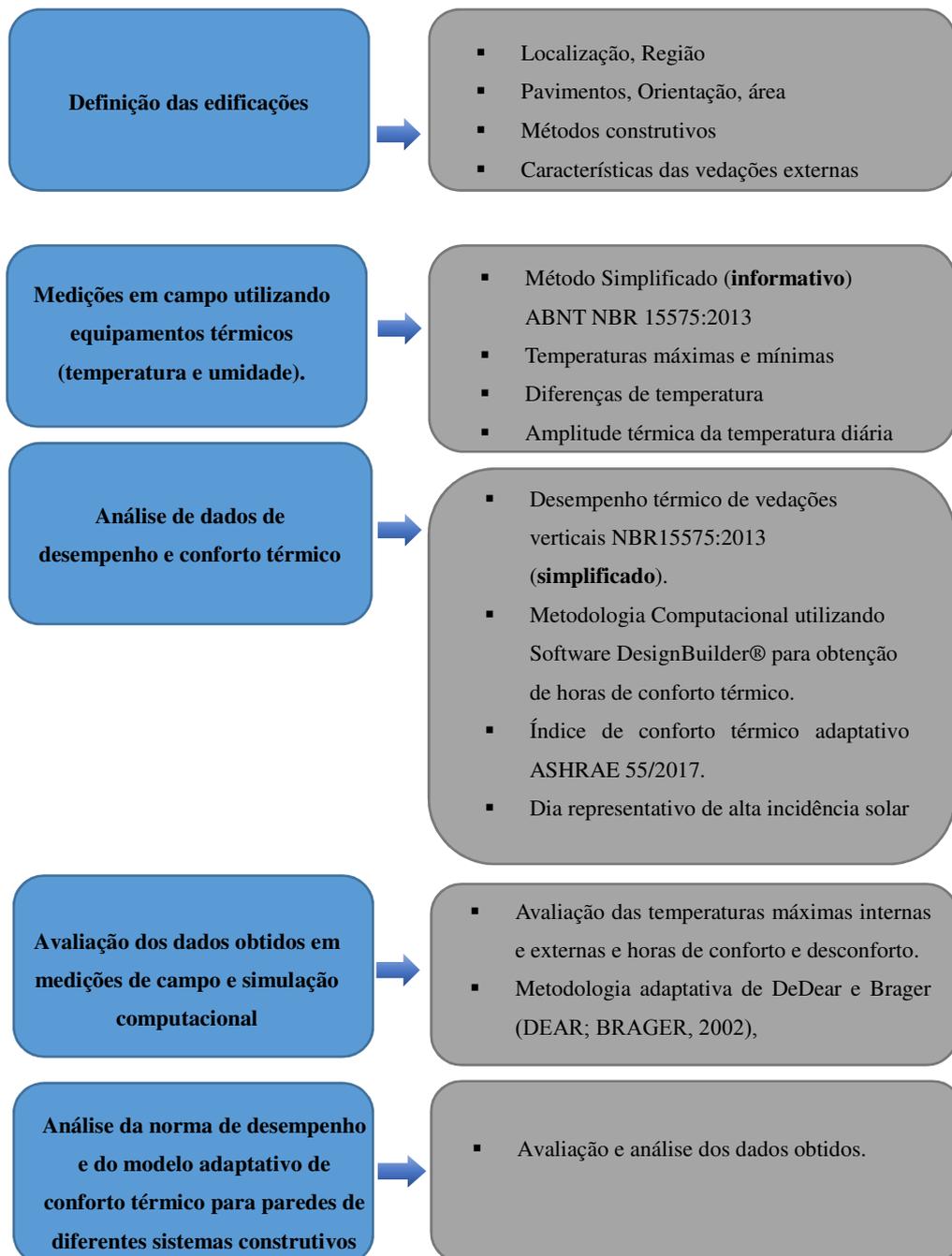
Akutsu, Brito e Chieppe (2012) afirmam que edifícios com alta inércia térmica geralmente possuem componentes construtivos com alta capacidade térmica, com o uso de materiais com valores elevados de calor específico e massa específica, bem como grandes espessuras.

Entretanto, há outros fatores que interferem na inércia térmica de um edifício, dos quais destaca-se a presença de isolantes térmicos e sua posição nos elementos construtivos. Os parâmetros quantitativos mais importantes para projetar paredes exteriores energeticamente eficientes são os coeficientes físicos de transferência de calor e os índices de inércia térmica (FENG, 2004; ASTE; ANGELOTTI; BUZZETTI, 2009).

3 METODOLOGIA

As etapas deste trabalho podem ser resumidas na Figura 14.

Figura 14 - Etapas da pesquisa



Fonte: Autor (2019).

3.1 Definição das edificações avaliadas para medições *in loco*

Dados da Caixa Econômica Federal, no ano de 2015, mostram que o sistema construtivo que utiliza paredes de concreto moldadas no local da obra tem prevalecido no programa Minha Casa Minha Vida. Em 2014, a tecnologia estava presente em 36% das unidades produzidas. A partir do segundo semestre de 2015, o percentual cresceu para 52%. Os métodos construtivos em alvenaria estrutural (cerâmica e com blocos de concreto) ocupam um percentual entre 30% e 35%, ainda segundo dados da Caixa Econômica Federal (2015).

De acordo com o diretor de comunicação da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Eng. MSc. Hugo Rodrigues, o processo rápido para produção em larga escala e em curto prazo faz da parede de concreto, por exemplo, uma alternativa eficiente para a execução de unidades habitacionais populares. Porém, Oliveira *et al.* (2015) destacam que paredes de concreto têm sido largamente utilizadas para a construção de habitações sociais brasileiras, mesmo apresentando maus resultados de desempenho. Estudos indicam a necessidade de mudanças no sistema para melhorar seu desempenho térmico.

Levando estes dados em consideração, os métodos construtivos estudados neste trabalho foram: paredes de concreto moldadas *in loco*, alvenaria estrutural de blocos de concreto e alvenaria estrutural de blocos cerâmicos. As obras escolhidas para serem analisadas foram padronizadas de forma a atender alguns critérios específicos. Área, número de pavimentos (multipiso), método construtivo, tipos de acabamento, padrão, etc. São edificações habitacionais de até 04 pavimentos, com padrão de acabamento baixo ou médio, com 02 (dois) banheiros e área de até 70 m² (Tabela 11).

Tabela 11 - Características Gerais das obras analisadas.

Obra (Método Const.)	Localização (bairro/cidade)	Região	Número de Pavimentos	Orientação	Apto. Escolhido	Área (m ²)
Paredes de concreto moldadas <i>in loco</i> (10cm)	Barroão/ Itaitinga	Metropolitana Fortaleza	Térreo + 03 pavimentos	Oeste/Norte	401 (coberta)	47,77
Alvenaria estrutural de bloco de concreto (família 39cm)	Conj. Pe. Raimundo/ Caucaia	Metropolitana Fortaleza	Térreo + 03 pavimentos	Parede Norte	302 (coberta)	55,8
Alvenaria estrutural de bloco de cerâmico (família 29cm)	Tabapua/ Caucaia	Metropolitana Fortaleza	Térreo + 04 pavimentos	Parede Norte	1044 (coberta)	54,8

Fonte: Autor (2019).

A localização das obras ficou restrita à região metropolitana de Fortaleza-CE. Vale ressaltar que os edifícios escolhidos não possuíam edificações próximas nem vegetação circundante que pudesse interferir nas condições climáticas.

A seguir são detalhadas as características gerais das obras analisadas:

- a. Edificações de mesmo porte e de padrões de acabamentos construtivos similares (revestimento cerâmico para piso, pintura em textura e látex PVA, esquadrias de alumínio e vidro 4mm). Os sistemas construtivos escolhidos foram: Paredes de concreto moldadas *in loco*, alvenaria estrutural de tijolos cerâmicos e alvenaria estrutural de blocos de concreto.
- b. Os ambientes internos analisados das edificações foram ambientes de maior ocupação: um quarto e a sala;
- c. Todos os apartamentos estudados estavam desocupados e ventilados naturalmente;

Os dias de medição escolhidos estão inseridos no período de verão no estado do Ceará de acordo com Ceará (2019);

- d. As condições para escolha de orientação dos apartamentos seguiram as recomendações da ABNT NBR 15575: 2013. As paredes externas deveriam ter orientação norte-oeste ou pelo menos uma parede norte (Fig. 15, 16 e 17);
- e. Caracterização das propriedades termo-físicas de paredes e coberturas, apresentadas posteriormente na tabela 13.

Figura 15 - Fachada e localização da edificação de paredes de concreto moldadas *in loco*



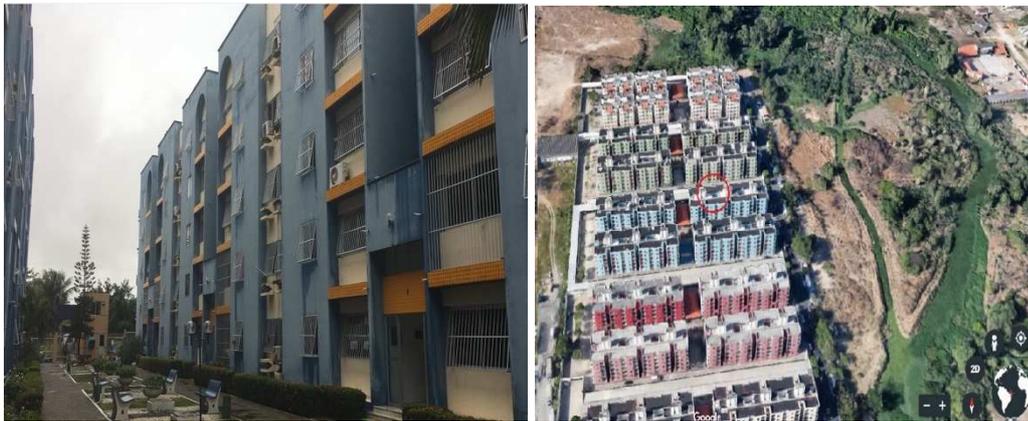
Fonte: Autor, 2019.

Figura 16 - Fachada e localização da edificação de paredes de alvenaria estrutural de bloco de concreto



Fonte: Autor, 2019.

Figura 17 - Fachada e localização da edificação de paredes de alvenaria estrutural de bloco cerâmico

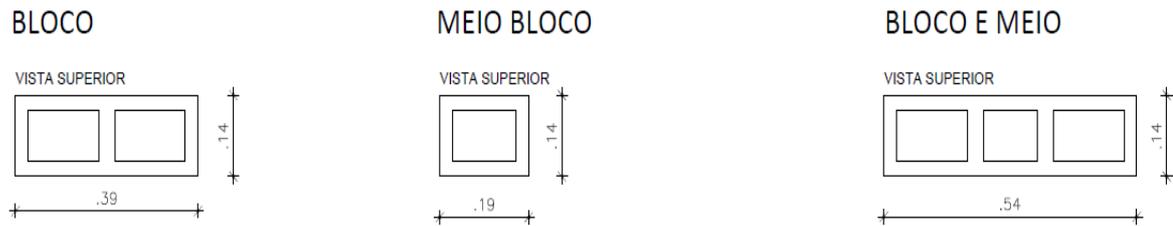


Fonte: Autor, 2019.

3.2 Geometria dos Blocos das paredes utilizadas

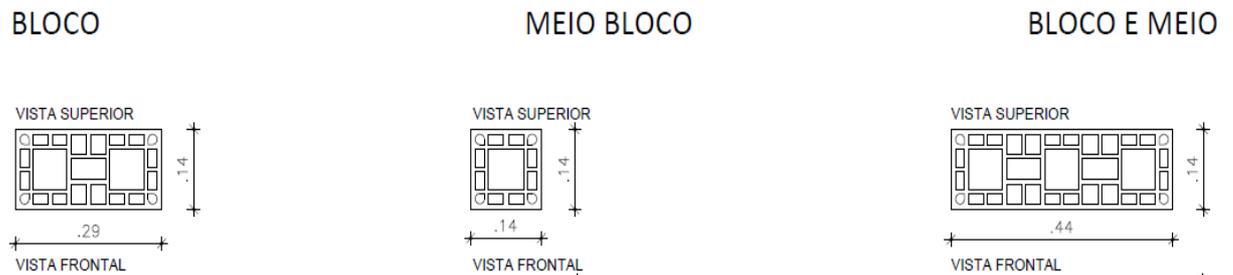
A geometria dos blocos de concreto e dos blocos cerâmicos estruturais é apresentada na Figura 18 e na Figura 19, respectivamente.

Figura 18 - Bloco de Concreto estrutural



Fonte: Autor (2019).

Figura 19 - Bloco Cerâmico estrutural

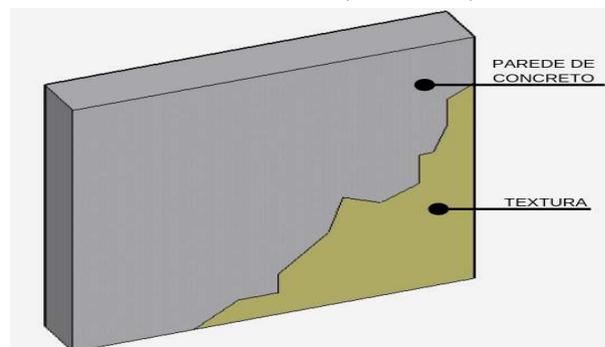


Fonte: Autor (2019).

3.3 Revestimentos das paredes

As paredes de concreto moldado *in loco* possuíam 10cm de espessura, concreto de 25Mpa de resistência (disponibilizado no projeto da edificação da construtora) e armadura em tela de aço (Q196). O revestimento da parede de concreto moldado *in loco* é constituído de textura acrílica interna e externa, conforme indicado na Figura 20.

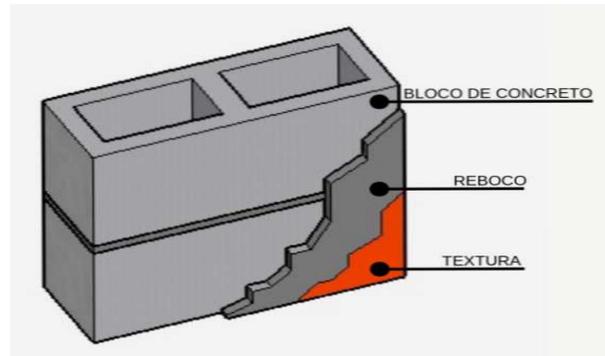
Figura 20 - Paredes de concreto moldado *in loco* (e = 10cm)



Fonte: Autor (2019).

As paredes de alvenaria estrutural de bloco de concreto (família 39cm) possuem reboco interno de 1,00cm e externo de 1,00cm. A pintura em textura interna e externa (Figura 21).

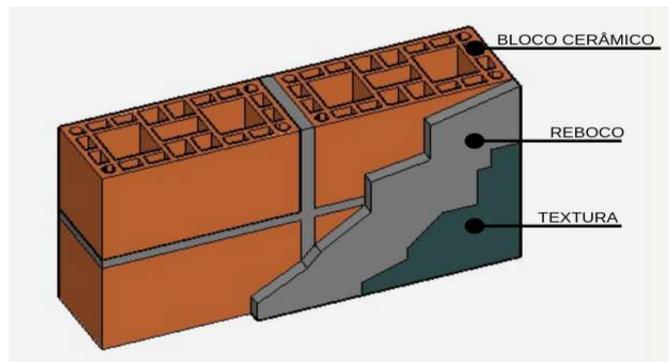
Figura 21 - Alvenaria estrutural de bloco de concreto



Fonte: Autor (2019).

As paredes de alvenaria estrutural cerâmica (Bloco principal Família 29cm), possuíam reboco interno de 1,00cm e externo 2,00cm. A pintura em textura interna e externa (Figura 22).

Figura 22 - Alvenaria estrutural cerâmica



Fonte: Autor (2019).

As cores de fachadas, apresentadas nas Figuras 15, 16 e 17, possuem $\alpha=0,5$ (absortância média) considerados em todos os casos analisados.

3.4 Descrição dos procedimentos de medição em campo

As medições internas serão executadas de forma a não alterar o cotidiano e a realização das atividades diárias nas residências. Internamente, foram escolhidos os compartimentos de quarto e sala. As medições externas são realizadas simultaneamente às medições internas.

Os períodos anuais escolhidos para medições de temperatura nos sistemas construtivos analisados foram os meses de março e abril de 2018, pois segundo a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (CEARÁ, 2019) o quadrimestre fevereiro-março-abril-maio

(verão) tende a apresentar chuvas geralmente mais significativas e mais generalizadas sobre o estado, caracterizando a chamada “Pré-estação Chuvosa”. Ainda, segundo Ceará (2019), quanto mais próximo da linha do Equador, menor é a diferença de temperaturas entre o verão e o inverno.

O posicionamento das edificações seguirá as recomendações do Anexo A da norma de desempenho NBR 15.575-1: 2013. No verão, uma janela do dormitório ou sala deve estar voltada para oeste, e outra parede exposta voltada para o norte. No inverno, uma janela do dormitório ou sala deve estar voltada ao sul e outra parede exposta voltada para leste.

Os valores encontrados nas medições internas e externas servirão de parâmetro para o estudo da amplitude da variação da temperatura do ar no interior das edificações e no estudo das horas de conforto térmico. Essa variação foi relacionada com o sistema construtivo utilizado.

As propriedades térmicas são calculadas com base nos dados de projeto e nos procedimentos de cálculo descritos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Os valores de aceitabilidade das propriedades térmicas sugeridos nas normas NBR 15220-3 (ABNT, 2005) e NBR 15575 partes 4 e 5 (ABNT, 2013) também serão verificados para análise do desempenho térmico.

3.4.1 Instrumentação

Para aquisição dos dados foram utilizados equipamentos *Datalogger HOBO Onset*, como mostra a Figura 23.

Figura 23 - Datalogger de temperatura e umidade



Fonte: Autor (2019).

a. *Datalogger* Interno – Informações do fabricante

O *Datalogger HOBO UX100-011* registra temperatura e umidade relativa do ar (com precisão de 2,5%) em ambientes internos, com os sensores integrados. Este *Datalogger* é ideal

para monitoramento de conforto térmico em edifícios comerciais e residenciais, registrando as tendências de temperatura e umidade relativa do ar (ONSET, 2018). Informações adicionais do fabricante dos equipamentos são descritas no Quadro 04.

Quadro 4 - Informações do fabricante Datalogger Interno

Sensor de Temperatura

Alcance: -20° a 70°C (-4° to 158°F);

Precisão: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ de 0° to 50°C ($\pm 0.38^{\circ}\text{F}$ de 32° a 122°F);

Poder de resolução: 0.024°C em 25°C (0.04°F em 77°F);

Tempo de resposta: 4 minutos no ar movimentado 1 m/s (2.2 mph);

Movimento: $< 0.1^{\circ}\text{C}$ (0.18°F) por ano.

Umidade: 0-100%

Fonte: Adaptado de ONSET, 2019.

b. *Datalogger* Externo – Informações do fabricante

O *Datalogger HOBO Pro v2* registra temperatura e umidade relativa do ar. É à prova de água. O Sensor de umidade relativa proporciona durabilidade superior em ambientes úmidos e é substituível pelo usuário. Este *Datalogger* opera em ambientes externos (ONSET, 2018). Para utilização do *Datalogger* externo é necessário um ‘*shield*’ para proteção contra a radiação incidente. Informações adicionais do *Datalogger* externo são apresentadas no Quadro 05.

Quadro 5 - Informações do fabricante Datalogger externo

Temperatura Sensor

Alcance de operação dos sensores internos: -40° to 70°C (-40° to 158°F);

U23-002 Sensor de temperatura externo: -40° to 70°C (-40° to 158°F);

Umidade: 0-100%

Fonte: Adaptado de ONSET, 2019.

3.5 Técnicas de medição

A instalação dos equipamentos, autorizada pela construtora, que se comprometerá a receber visitas periódicas do pesquisador para coleta de dados e reprogramação dos equipamentos.

Além das temperaturas internas e externas, foram consideradas também, na avaliação do desempenho térmico das edificações, suas características físicas, propriedades térmicas dos elementos construtivos e padrões de uso do usuário. Ainda segundo o Anexo A da NBR 15.575-

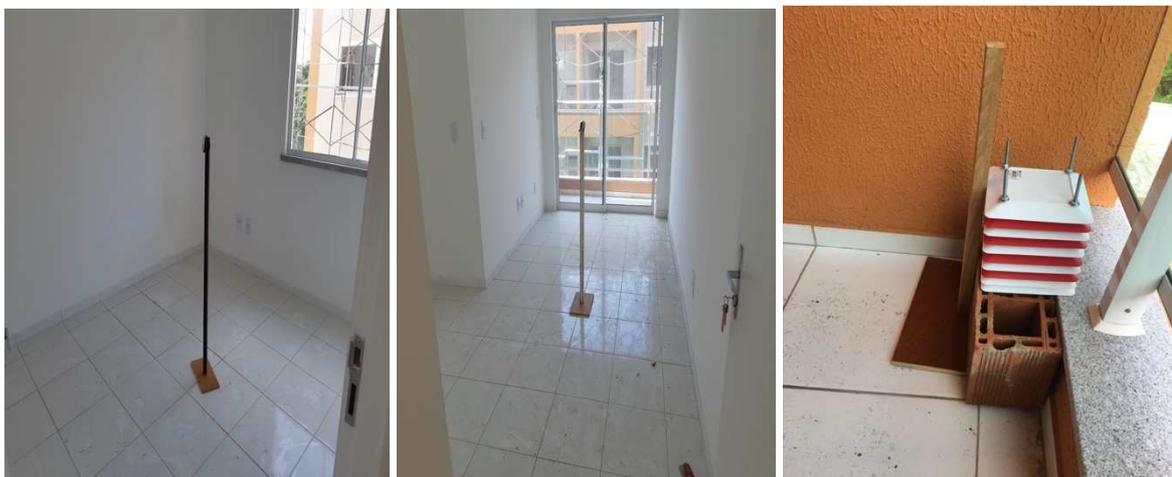
1: 2013, os medidores de temperatura interna dos recintos devem ser posicionados no centro dos ambientes a uma altura de 1,20 m do piso. Seguir as especificações de equipamentos e montagem dos sensores, apresentadas na ISO 7726, *Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities*. As Figuras 24, 25 e 26 demonstram o posicionamento dos aparelhos de medição, internos e externos, nos apartamentos analisados.

Figura 24 - Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento com paredes de concreto moldado *in loco*



Fonte: Autor, 2018.

Figura 25 - Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento de alvenaria estrutural de blocos concreto



Fonte: Autor, 2018.

Figura 26 - Datalogger interno (quarto e sala) e externo (varanda) no empreendimento de alvenaria estrutural de blocos de cerâmico

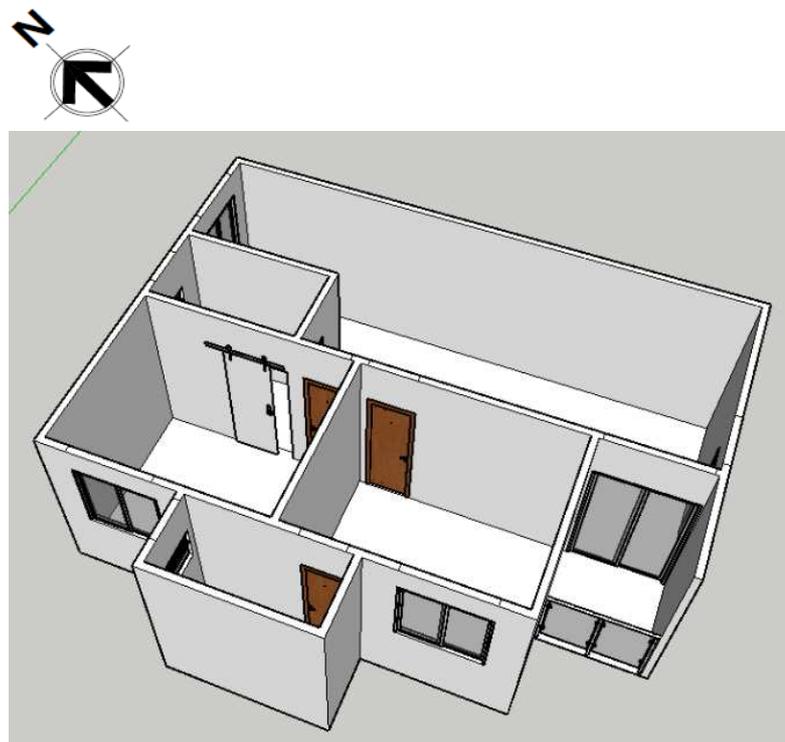


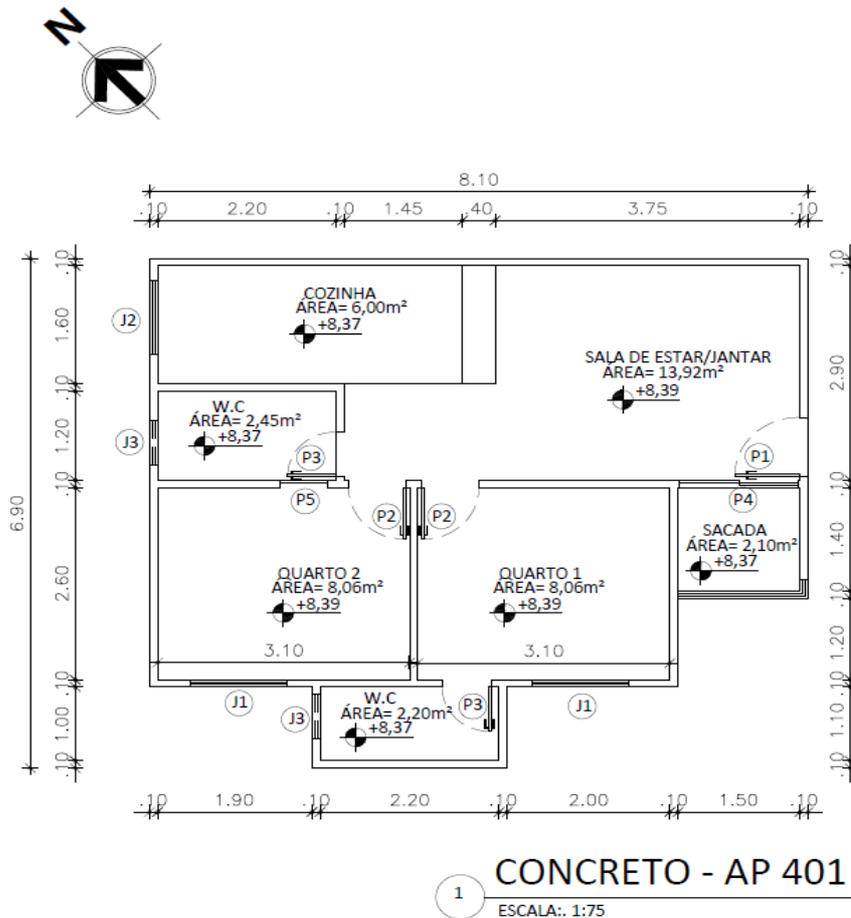
Fonte: Autor, 2018.

3.6 Planta baixa e ambientes medidos em cada edificação

Os projetos em planta baixa foram disponibilizados pelas construtoras e/ou foram levantados pelo autor (Figuras 27, 28 e 29). As dimensões das esquadrias estão apresentadas nos quadros 06, 07 e 08. Os ambientes medidos foram um quarto e sala de cada empreendimento, além do *Datalogger* externo. Todos os *datalogger's* mediam simultaneamente as temperaturas e umidade relativa do ar.

Figura 27 - Planta baixa Empreendimento de paredes de concreto *in loco* e localização dos Datalogger





Fonte: Autor, 2018.

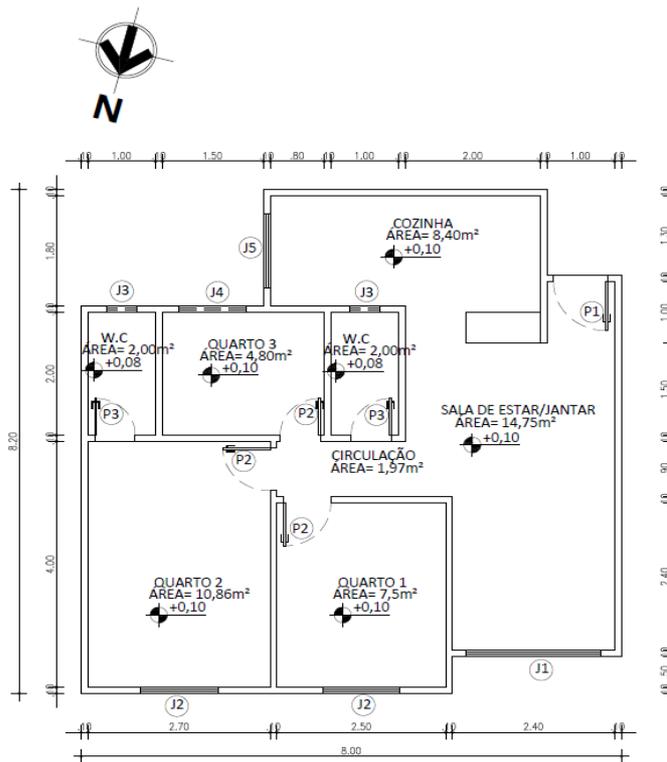
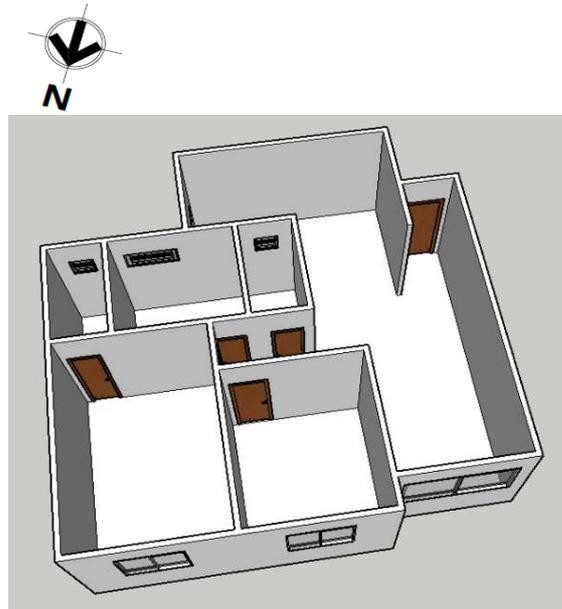
Quadro 06 - Quadro de esquadrias apartamento de paredes de concreto

	LARGURA	ALTURA	PEITORIL	Nº FOLHAS	DESCRIÇÃO
PORTAS					
P1	0,80	2,10	-	1	MADEIRA - ABRIR
P2	0,60	2,10	-	1	MADEIRA - ABRIR
P3	0,70	2,10	-	1	MADEIRA - ABRIR
P4	1,45	2,10	-	2	ALUMÍNIO E VIDRO
P5	0,60	2,10	-	1	MADEIRA - CORRER
JANELAS					
J1	1,20	1,20	1,00	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J2	1,00	1,20	1,00	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J3	0,60	0,60	1,50	2	ALUMÍNIO E VIDRO

Fonte: Autor, 2018.

O quarto 02, a sala de estar/jantar e temperatura externa foram os ambientes medidos no empreendimento de parede de concreto *in loco*.

Figura 28 - Planta baixa Empreendimento de alvenaria estrutural com bloco cerâmico e localização dos Datalogger



1 BLOCO CERÂMICO ESTRUTURAL - AP 1034
ESCALA: 1:75

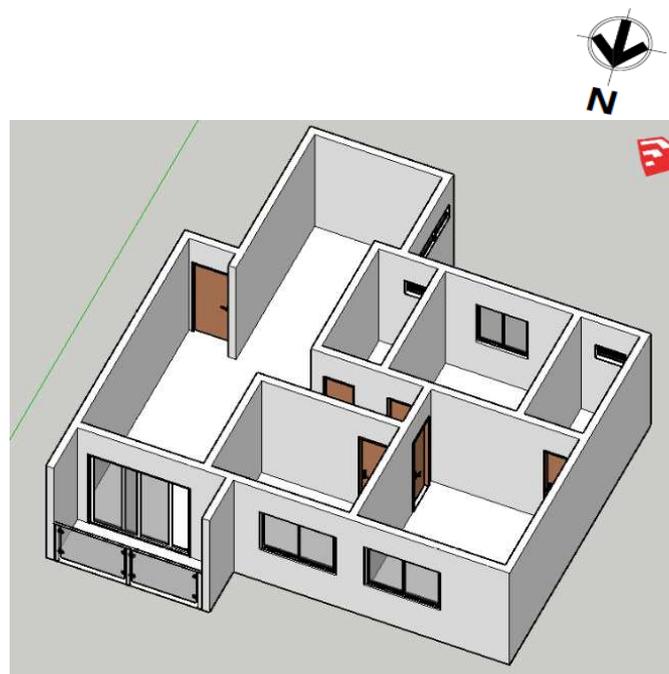
Quadro 7 - Quadro de esquadrias apartamento de alvenaria estrutural cerâmica

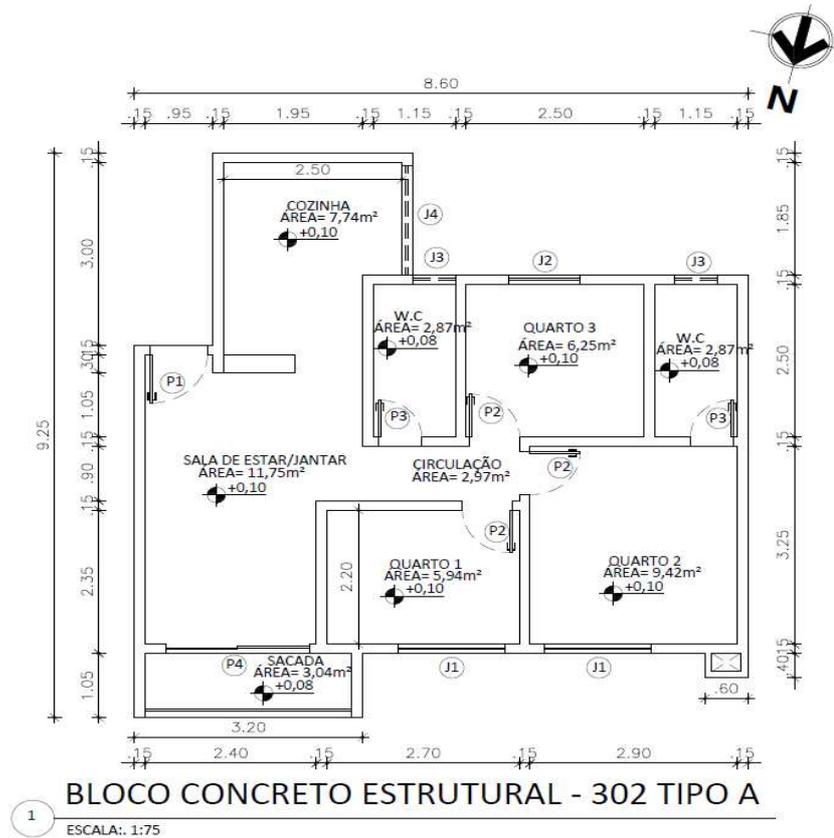
	LARGURA	ALTURA	PEITORIL	Nº FOLHAS	DESCRIÇÃO
PORTAS					
P1	0,80	2,10	-	1	MADEIRA
P2	0,60	2,10	-	1	MADEIRA
P3	0,70	2,10	-	1	MADEIRA
JANELAS					
J1	2,00	1,15	1,10	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J2	1,15	1,15	1,10	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J3	0,45	0,45	1,80	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J4	1,00	0,45	1,80	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J5	1,20	0,40	1,05	3	ALUMÍNIO E VIDRO

Fonte: Autor, 2018

O quarto 02, a sala de estar/jantar e temperatura externa foram os ambientes medidos no empreendimento de parede de bloco de cerâmica estrutural.

Figura 29 - Planta baixa Empreendimento de alvenaria estrutural com bloco de concreto e localização dos Datalogger





Fonte: Autor, 2018

Quadro 8 - Quadro de esquadrias apartamento de alvenaria de bloco de concreto

	LARGURA	ALTURA	PEITORIL	Nº FOLHAS	DESCRIÇÃO
PORTAS					
P1	0,80	2,10	-	1	MADEIRA
P2	0,60	2,10	-	1	MADEIRA
P3	0,70	2,10	-	1	MADEIRA
P4	2,00	2,10	-	2	ALUMÍNIO E VIDRO
JANELAS					
J1	1,50	1,15	0,95	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J2	1,00	1,15	0,95	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J3	0,60	0,40	1,70	2	ALUMÍNIO E VIDRO
J4	1,80	0,40	1,70	2	ALUMÍNIO E VIDRO

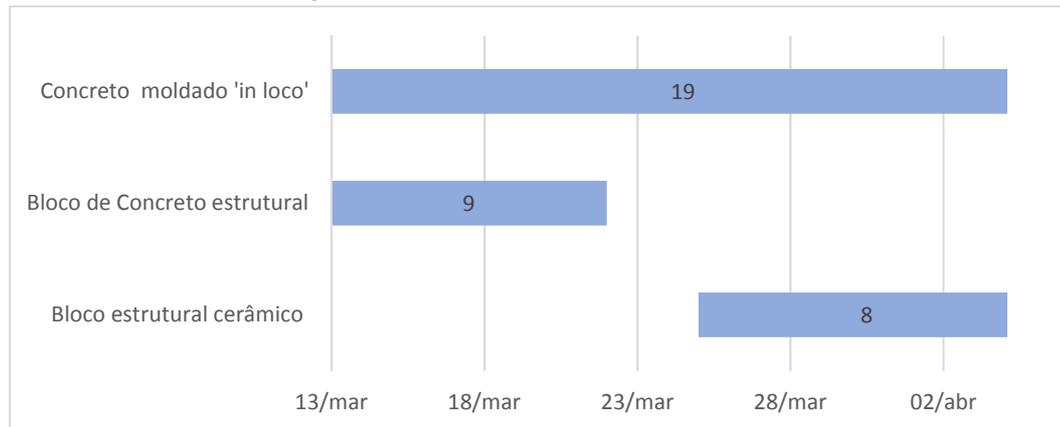
Fonte: Autor, 2018

O quarto 02, a sala de estar/jantar e temperatura externa foram os ambientes medidos no empreendimento de parede de concreto estrutural.

3.7 Tempo e intervalos das medições

O período de medição está discriminado conforme a Figura 30:

Figura 30 - Período das Medições



Fonte: Autor (2019).

Foi monitorada a temperatura do ar nos ambientes do interior das unidades habitacionais e também no exterior da edificação. Esses dados são obtidos, registrados e armazenados num equipamento *Datalogger* que registra as temperaturas internas, externas e umidade relativa do ar, e posteriormente serão tratados em planilha Excel.

O *Datalogger* foi programado para registrar e armazenar as medições ambientais a cada 15 (quinze minutos), criando assim uma base de dados que será transmitida a um computador no laboratório por meio de software específico, de acordo com a metodologia da qualidade dos ambientes internos (PARKINSON; PARKINSON; DEAR, 2015).

Em cada sistema construtivo foram feitas 02 (duas medições) internas, uma no quarto e outra na sala (de acordo com posicionamento previsto pela NBR 15.575-1: 2013), e uma medição externa. As medições serão simultâneas com os equipamentos a serem utilizados.

As medições no apartamento de paredes de concreto foram contínuas com o objetivo de comparar estas medições com os outros dois casos (alvenaria estrutural de bloco cerâmico e alvenaria estrutural de blocos de concreto). Foi adotado o critério de eliminar os dias com pluviosidade acima de 10 mm. Os dados com pluviosidade acima de 10mm, de acordo com Ceará (2019), foram os dias 23/03/2018, 27/03/2018, 28/03/2018, 02/04/2018 e 05/04/2018 (Anexo A).

Em resumo: dos dias 13/03/2018 ao dia 21/03/2018 foram medidas simultaneamente as temperaturas externas e internas dos apartamentos de parede de concreto moldadas *in loco* e bloco estrutural concreto. A partir do dia 25/03/2018 à 04/04/2018 foram medidas simultaneamente as temperaturas externas e internas dos apartamentos de parede de concreto moldadas *in loco* e bloco estrutural cerâmico (ver Tabela 12).

Tabela 12 - Intervalos de medição.

Período de Medição		Dias úteis medidos
Parede de concreto moldado <i>in loco</i>	13.03 a 04.04	19
Bloco de Concreto estrutural	13.03 a 21.03	9
Bloco estrutural Cerâmico	25.03 a 04.04	8

* dias eliminados: 23.03.2018, 27.03.2018, 28.03.2018, 02.04.2018 e 05.04.2018.

Fonte: Autor (2019).

3.8 Descrição dos procedimentos de simulação computacional

O procedimento 1B: simulação para avaliação do desempenho térmico prescrito pela NBR 15575:2013 não foi adotado em função das incertezas no método, provocadas principalmente por imprecisões e ausência de dados na norma para definição do dia típico de projeto para análise (SILVA et al., 2014). O dia típico de verão para Fortaleza/CE apresenta a temperatura de 32°C, de acordo com ABNT NBR 15575:2013. Porém não satisfaz as diversas variáveis e não se tem na norma parâmetros para programação de simulação suficientes e satisfatórios.

A abordagem numérica se baseou em metodologia definida, abordagem adaptativa da ASHRAE 55:2017 e peculiaridades como ventilação, rotinas de ocupação pré-determinadas e ocupação metabólica.

3.8.1 Parâmetros da modelagem computacional

Foram realizadas simulações de um modelo hipotético de edificação residencial multifamiliar, de mesma orientação e utilizando arquivo climático para Fortaleza/CE, caracterizada por quatro pavimentos: pavimento térreo mais três andares.

Uma simulação considerando a ocupação do ambiente foi realizada. O padrão de ocupação considera uma família composta por quatro moradores dados como um casal e dois filhos. Os ambientes da sala e da cozinha são utilizados por toda a família, sendo que a ocupação máxima de cada dormitório é de duas pessoas. Também se considerou que duas pessoas permanecem na residência no período das 9h às 18h e que os usuários aproveitam a iluminação natural acrescentando iluminação artificial no início da manhã e no final da tarde (SORGATO, 2014). Por se tratar de um ambiente com pouco tempo de permanência, o banheiro não foi considerado como um ambiente ocupado.

As cargas internas para a ocupação foi de 81W/pessoa. Dos ambientes da sala de estar

e da cozinha, considerou-se, respectivamente, 108W/pessoa e 171W/pessoa. Em relação ao horário das refeições, somente um usuário com carga interna de 171W/pessoa foi considerada quando ocupada por mais de uma pessoa. Nos ambientes de dormitórios, sala de estar e cozinha, considerou-se uma densidade de potência de iluminação artificial de 5,0 W/m².

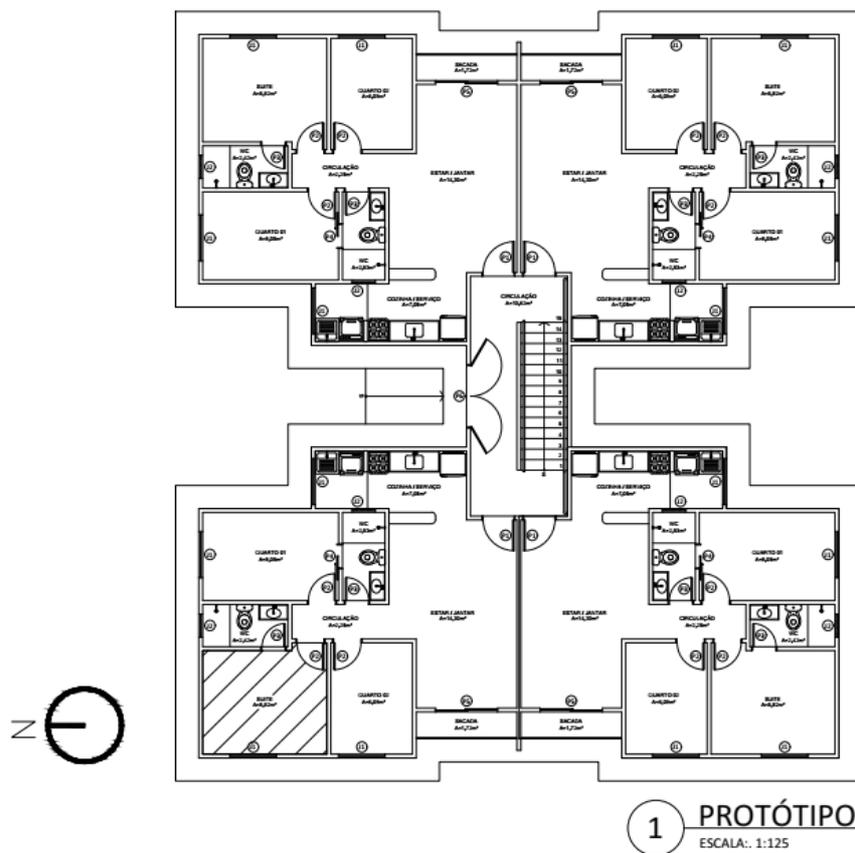
Apenas os resultados de um ambiente de longa permanência no quarto pavimento, foram analisados: uma suíte (dormitório QUARTO 01 indicado) de 8,82 m², pé-direito de 2,80m, com duas paredes expostas à radiação solar (duas faces da fachada), uma para Norte e outra voltada para Oeste, onde se encontra uma janela de caixilho de alumínio e vidro simples claro de 4mm, sem proteção solar interna ou externa, conforme a figura 31. Para todas as análises aqui realizadas, a velocidade do ar adotada foi de 0,6 m/s.

3.8.2 *Materiais e sistemas construtivos*

O modelo adotou um conjunto de materiais e sistemas construtivos típicos para esta tipologia de construção, variando-se apenas os três tipos de paredes em análise (os mesmos materiais, características termo físicas, blocos e dimensões que foram escolhidos nas medições de campo). Os principais dados de entrada de simulação dos materiais e sistemas construtivos, assim como suas principais propriedades termo físicas são apresentadas na tabela 13.

O projeto arquitetônico foi simulado considerando a absorvância de $\alpha = 0,50$ para telha de fibrocimento, e de absorvância $\alpha = 0,30$ até $\alpha = 0,70$ para as vedações verticais externas, equivalente às faixas de cores que podem ser utilizadas.

Figura 31 - Planta baixa Modelo Hipotético.



Fonte: Autor (2019).

Tabela 13 - Características do projeto e parâmetros de entrada de dados para simulação.

SUPERFÍCIE	MATERIAL	ESPESSURA	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA	CAPACIDADE TÉRMICA	ABSORTÂNCIA	FATOR SOLAR	
		e (m)	U (W/m ² .K)	KJ/m ² .K	α	FS	
Paredes	A	Concreto maciço	0,10	4,40	240,00	0,50	-
	B	Alv. estrutural de bloco de concreto	0,16	2,91	185,19	0,50	-
	C	Alv. estrutural de bloco cerâmico	0,17	2,09	194,17	0,50	-
Coberta		Laje de concreto maciça 0,10m, sob telha de fibrocimento	0,10	2,06	233,00	0,50	-
Piso: entre pavimentos		Laje de concreto maciça 0,10m revestida com piso cerâmico	0,13	2,81	-	0,20	-
Janelas		Caixilho de alumínio e vidro e = 4mm	0,004	5,65	-	-	0,86
Portas		Madeira	0,03	2,44	-	0,20	-

Fonte: Autor (2019).

Em função da modelagem de sistemas construtivos em softwares de simulação computacional ocorrerem apenas através de camadas homogêneas paralelas e perpendiculares ao sentido do fluxo de calor, ocorreram pequenas diferenças entre os valores de transmitância térmica e da capacidade térmica calculados, de acordo com a ABNT NBR 15520-2:2005, e os calculados automaticamente pelo *Design Builder*®. Para modelagem e aproximação dos sistemas construtivos heterogêneos, a definição da espessura das camadas de concreto e de cerâmica, bem como de suas densidades, ocorrem de forma a manter a mesma resistência e capacidade térmica equivalente (ORDENES *et al.*, 2003).

A absorvância das paredes ficou definida nos valores de $\alpha = 0,3$ (clara); $\alpha = 0,5$ (média) e $\alpha = 0,7$ (escura) que representam as classes de cores definidas pela norma (NBR 15575, 2013). A escolha desses índices de absorvância é de fundamental importância pois as cores tem grande influência direta no desempenho térmico de edificações.

3.8.3 Características gerais da simulação

Para efeitos de consistência da modelagem das trocas térmicas entre pavimentos, foram

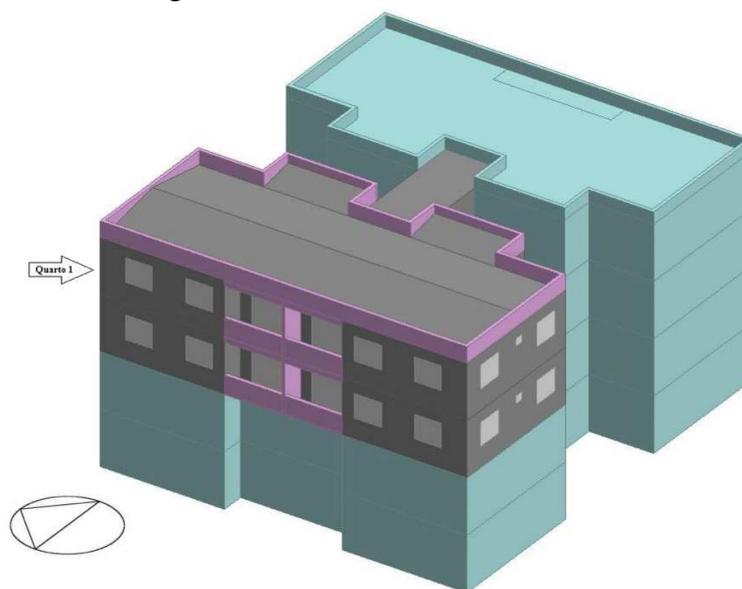
modelados os ambientes do terceiro e do quarto pavimento (Ver Figura 31 e Figura 32), considerando-se adiabáticas as superfícies horizontais entre os segundo e terceiro pavimentos (lajes de piso).

O programa utilizado para as simulações foi *Design Builder Energy Plus® 8.9* (DOE, 2019). As simulações foram realizadas para a cidade de Fortaleza-CE (Lat. 3.8° S, 38.5° O) que possui um clima quente-úmido. Foram realizadas simulações horárias para um ano (8760 horas), usando-se o arquivo climático *BRA_Fortaleza Pinto.Mar.823980_SWERA.epw*.

O projeto arquitetônico foi definido para localidade de Fortaleza-CE que pertence a zona bioclimática Z8, definida pela norma ABNT NBR 15220:2005 – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

As simulações foram feitas de forma a obter ventilações permanentes dos ambientes, vestimenta genérica (0,5) para os ocupantes seguindo o padrão de ocupação descrito na seção 3.8.1, temperatura mínima de 20°C para ventilação e parâmetro de *fresh air* 10,0 l/s/pessoa. As renovações de ar são configuradas a partir de *template*, que o programa determina de acordo com arquivo climático e características das vedações (*Air Flow Networking*). A renovação natural dos ambientes modelados pelo modelo hipotético é calculada pelo próprio *software* DesignBuilder®. O cálculo da ventilação natural considera aspectos como aberturas de janelas, fissuras e a direção do vento.

Figura 32 – Modelo design builder



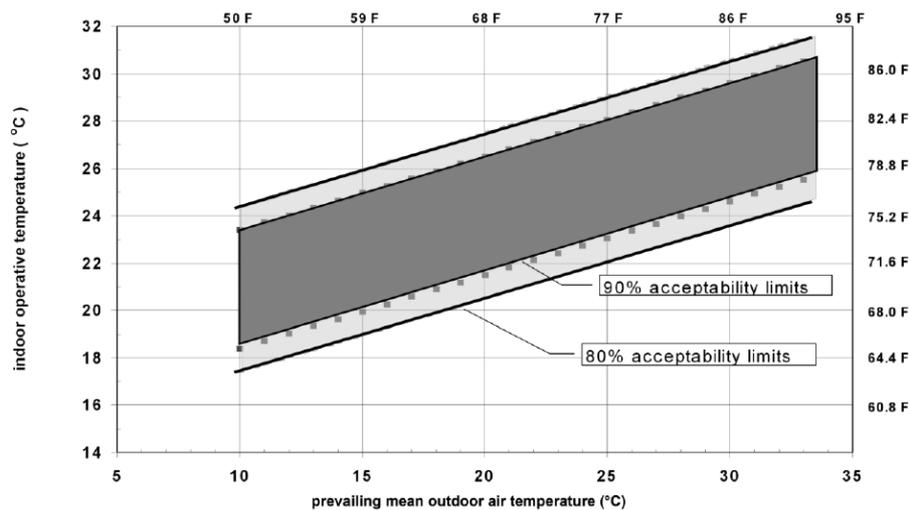
Fonte: Autor (2019).

3.8.4 Critério de avaliação de conforto térmico

O critério de avaliação do desempenho térmico adotado foi o de percentual ou fração de horas conforto térmico ao longo do ano. Este consiste na soma das horas em que a temperatura do ar interno esteve acima ou abaixo da temperatura base de referência (T_n), com margem de 3,5 °C (Ver Tabela 04: índice T_n de De Dear e Brager 2002). A temperatura base de referência foi determinada pelo modelo adaptativo de conforto térmico da norma *ASHRAE Standard 55 – 2017 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

Conforto adaptativo com 80% de satisfação, de acordo com a Figura 33. Simulou-se as Temperaturas médias do ar (internamente e externamente) e Temperatura Operativa (média entre temperatura interna e temperatura radiante).

Figura 33 - O padrão de conforto adaptativo ASHRAE 55 (2017)



Fonte: ASHRAE 55 (2017)

O modelo adaptativo da ASHRAE 2004 (2010) usa originalmente a temperatura média mensal do ar, sua expressão para a temperatura externa prevalecente (como um calendário climatológico dos meses do ano, ou 30 dias em média).

O presente trabalho utilizou a ASHRAE 55 (2017), que apresenta um método que permite ao usuário selecionar livremente a melhor forma de cálculo, que difere no processo de cálculo da temperatura média predominante e no intervalo de tempo escolhido. Pode ser determinado pelo uso de uma média aritmética simples (que pode ser obtida por uma gama de médias considerando no mínimo 7 e no máximo 30 dias antes do dia em questão). Vecchi et al. (2014) utilizaram esta metodologia adaptativa nos critérios de avaliação térmica e modelagem.

A temperatura média ao ar livre predominante ($T_{pma\ out}$) foi determinada de acordo

com o método 02 da ASHRAE 55 (2017). Neste método, vinte dias consecutivos antes do dia em questão foram utilizados para evitar perdas residuais (VECCHI et al., 2014).

A equação exponencial usada da ASHRAE 55 (2017) está descrita na Eq. (10):

$$t_{pma(out)} = (1 - \alpha)[t_{e(d-1)} + \alpha t_{e(d-2)} + \alpha^2 t_{e(d-3)} + \alpha^3 t_{e(d-4)}] \quad (10)$$

A temperatura de avaliação interna na modelagem deste trabalho foi a temperatura operativa. A temperatura operativa é um parâmetro integrado que combina a temperatura do ar (t_a) e a temperatura radiante média (t_r) sob certas condições de movimento do ar (v_a) e afeta globalmente a percepção do usuário sobre o ambiente térmico; portanto, utiliza-se como parâmetro na avaliação do conforto térmico de espaços interiores (KUCHEN et al., 2011).

A norma ASHRAE 55 (2017) estabelece também que acréscimos na temperatura operativa, para análise de conforto, são aceitáveis em função da velocidade do ar. A tabela 14 mostra os valores aceitáveis. O presente trabalho utilizou o acréscimo previsto ao limite aceitável de temperaturas operativas correspondente a velocidade média do ar em $V_a = 0,6\text{m/s}$.

Tabela 14 - Acréscimos aceitáveis aos limites de temperatura operativa

Average Air Speed V_a	Average Air Speed V_a	Average Air Speed V_a
0.6 m/s (118 fpm)	0.9 m/s (177 fpm)	1.2 m/s (236 fpm)
1.2°C (2.2°F)	1.8°C (3.2°F)	2.2°C (4.0°F)

Fonte: ASHRAE 55 (2017)

3.9 Método de análise de Desempenho e conforto térmico

O método de análise dos dados seguiu etapas pré-estabelecidas e direcionadas a entender o comportamento térmico do edifício de paredes de concreto moldadas *in loco* em relação aos outros dois sistemas construtivos analisados (blocos de alvenaria estrutural de concreto e blocos de alvenaria estrutural cerâmico).

3.9.1 Metodologia Simplificada para paredes e metodologia de medições (informativa)

Atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação, conforme ABNT NBR 15575-4 e ABNT NBR 15575-5, e requisitos gerais conforme ABNT NBR 15575-1, esta metodologia foi apresentada de forma detalhada na Seção 2.4.1.

3.9.2 Metodologia de Simulação Computacional

Para edifícios multipiso foi selecionada uma unidade no último andar, com cobertura exposta, e aplicam-se os procedimentos estabelecidos no modelo hipotético descrito na Seção 3.8. A simulação foi dividida em três etapas: modelagem tridimensional, inserção dos dados de entrada e definição dos dados de saída. A simulação é feita através de construção de zonas definidas por ambientes e as características dos balanços energéticos.

3.10 Avaliação dos dados obtidos nas medições e simulação numérica

A avaliação dos dados obtidos via medições *in loco* e apresentados pela simulação numérica realizada foram analisadas considerando os parâmetros de amplitude térmica diária e diferenças de temperatura (Seção 3.10.1), temperaturas máximas e mínimas internas (Seção 3.10.2) e de horas de conforto e desconforto térmico de acordo com abordagem adaptativa (Seção 3.10.3).

3.10.1 Amplitude térmica diária e diferenças de temperatura

Amplitude térmica consiste na diferença entre as temperaturas máximas e mínimas diárias e as diferenças de temperatura consistem na posterior comparação entre temperaturas máximas para os 03 sistemas construtivos escolhidos. Comparação feita entre os modelos construtivos escolhidos e seus compartimentos internos.

3.10.2 Temperaturas máximas e mínimas internas

Determinar as temperaturas (temperatura do ar e temperatura operativa) máximas e mínimas internas, conforme metodologia adaptativa e simulação computacional.

3.10.3 Horas de conforto e desconforto térmico com abordagem adaptativa

As horas de conforto e desconforto térmico serão avaliadas após coleta e análise de dados numéricos. Para as condições climáticas do local e a partir de percentual aceitável de pessoas satisfeitas (80%) com o ambiente térmico são propostas faixas de conforto térmico e limites da zona de conforto conforme o modelo adaptativo.

A fim de uma análise mais pontual do comportamento das temperaturas, um dia de alta

incidência solar foi escolhido e representado graficamente para avaliação das tendências das temperaturas ao longo do dia. A data escolhida foi o equinócio de primavera do hemisfério sul que ocorre no dia 21 de setembro, onde os raios solares incidem perpendicularmente sobre a linha do Equador.

3.11 Análise crítica de desempenho e conforto térmico

Uma análise e comparação foram feitas com os dados obtidos de avaliação de desempenho e conforto térmicos realizados a partir da norma ABNT NBR 15575: 2013 e com o modelo adaptativo proposto nas simulações e medições *in loco*.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados da pesquisa são apresentados neste capítulo, de acordo com método simplificado da norma prescritivo, metodologia de medições em campo (informativa) e análise numérica com abordagem adaptativa.

4.1 Desempenho térmico de paredes pela NBR 15575:2013 (Simplificado)

As características das propriedades termo físicas dos sistemas construtivos analisados e avaliados estão contidos na tabela 15.

Tabela 15 – Características das principais propriedades termo físicas dos sistemas construtivos

Sistema	Caracterização	Transmitância térmica (U)	Capacidade térmica (Ct)	Absortância (α)
	Parede de concreto maciço 0,10m	4,40 W/m ² .K	240,00 kJ/m ² .K	
Paredes	Parede de bloco estrutural de concreto	2,91 W/m ² .K	185,19 kJ/m ² .K	0,50
	Parede de bloco estrutural cerâmico	2,09 W/m ² .K	194,17 kJ/m ² .K	

Fonte: Autor (2019).

Estes valores são referenciados na norma NBR 15220:2005-Parte 3 (ABNT, 2005) e no Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (FRUCK; JUSVICK; BRIDI, 2016), (RIZZATTI et al., 2011), (MOHAMAD et al., 2015).

Os valores das propriedades termo físicas dos materiais construtivos que compõem os sistemas construtivos, como a densidade de massa aparente, condutividade térmica e calor específico, foram referenciados da norma NBR 15.220 Parte 03 (ABNT, 2005) e são apresentados na tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades térmicas dos materiais

Material	Densidade (kg/m ³)	Condutividade Térmica (W/m.K)	Calor Específico (kJ/kg.K)
Argamassa de reboco	2000	1,15	1,00
Argamassa de emboço	2000	1,15	1,00
Cerâmica	1800	1,05	0,92
Concreto	2400	1,75	1,00

Fonte: (ABNT NBR 15220:2005 – Parte 3, 2005)

Pela ABNT NBR 15575:2013, a avaliação simplificada da norma para vedações

verticais externas com $\alpha \leq 0,6$, da zona climática 08 consiste em observar se os parâmetros de transmitância térmica (U) das paredes ficam no intervalo $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{.K}$.

As paredes de blocos estruturais cerâmicos e blocos estruturais de concreto atendem essa especificação. Já as vedações com paredes de concreto maciço moldado in loco de 0,10m de espessura possuem valores de transmitância fora dos limites da norma. Portanto o requisito de desempenho térmico não é atendido. Transmitância térmica (U) representa o coeficiente global de transferência de calor (ABNT NBR 15220:2005). Quanto menor for o valor de transmitância (U) menos se perde calor para o ambiente externo em dias frios e menos se ganha calor do ambiente externo nos dias quentes. Os corpos têm capacidade de transmitir calor com as diferenças de temperatura, sempre do corpo mais quente para o mais frio.

Paredes de concreto maciço têm maior densidade e maior condutividade térmica. A transmitância (U) afeta diretamente o desempenho inferior deste sistema em relação aos blocos de concreto estrutural e blocos de cerâmica estruturais. Por sua vez o bloco de cerâmica estrutural possui o melhor desempenho neste quesito (transmitância térmica), visto que possui as melhores propriedades térmicas.

A consulta das propriedades térmicas das vedações verticais externas é primordial para evitar perdas ou ganhos de calor indesejáveis na hora da construção de edificações.

4.2 Medições – Método Informativo

As medições seguiram o método informativo da ABNT NBR 15575:2013. Na verificação dos dados do ambiente Quarto (Tq-co) de paredes maciças de concreto verificou-se inconformidades (anomalias) possivelmente por problemas no aparelho *Datalogger* interno deste ambiente. A unidade habitacional com paredes de concreto maciças foi analisada então suas temperaturas externas (Text-co) e sua temperatura interna da sala (Ts-co).

Os dados das outras unidades habitacionais foram validados: temperaturas externas das paredes de bloco de concreto estrutural (Text-bc), temperaturas externas do bloco estrutural cerâmico (Text-ce), temperaturas de sala e quarto internas do bloco de concreto estrutural (Ts-bc, Tq-bc) e temperaturas de sala e quarto internas do bloco estrutural cerâmico (Ts-ce e Tq-ce). Os resultados de medições com as temperaturas máximas, mínimas e suas amplitudes são apresentadas nas tabelas 17 e 18.

4.2.1 Máximas e mínimas – Parede de Concreto e Bloco de concreto estrutural

As temperaturas máximas e mínimas medidas in loco nas habitações de paredes de concreto e bloco de concreto estrutural são apresentadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Máximas e mínimas - Parede de Concreto x Bloco de Concreto estrutural

Data	Hora	Text-co	Hora	Ts-co	Hora	Tq-co	Hora	Text-bc	Hora	Ts-bc	Hora	Tq-bc
13/mar	14:00	32,7	16:15	36,2	16:45	31,4	14:15	30,9	16:45	31,7	16:45	32,0
	05:15	26,3	05:45	30,2	07:00	29,9	06:00	26,5	05:45	29,7	05:45	29,1
Amp T °C		6,4		6,0		1,5		4,4		2,0		2,8
14/mar	13:45	32,3	16:45	36,0	16:30	31,5	11:30	31,4	16:45	31,5	16:45	31,6
	06:00	26,5	05:45	30,4	07:00	30,0	04:30	27,0	06:45	30,2	05:45	29,7
Amp T °C		5,8		5,6		1,4		4,3		1,3		2,0
15/mar	13:15	32,5	16:30	36,1	16:30	31,5	10:45	31,1	16:15	31,5	16:30	31,7
	05:45	26,3	06:15	30,3	06:45	30,0	06:00	27,0	06:00	30,0	05:45	29,4
Amp T °C		6,2		5,8		1,5		4,2		1,5		2,2
16/mar	13:15	32,5	16:45	36,0	16:45	31,5	11:15	31,4	17:00	31,9	17:00	32,3
	05:45	25,3	05:45	30,0	08:00	29,9	05:00	26,7	05:45	29,8	05:45	29,3
Amp T °C		7,2		6,1		1,6		4,8		2,0		3,0
17/mar	14:30	33,4	15:45	36,5	15:45	31,7	13:30	31,6	15:30	32,0	17:00	32,4
	05:45	26,3	06:00	30,1	06:30	30,0	06:15	25,8	06:00	30,2	06:00	29,7
Amp T °C		7,1		6,3		1,6		5,8		1,8		2,6
18/mar	14:15	32,9	16:45	36,7	16:45	31,9	14:00	31,5	16:45	32,0	17:15	32,6
	06:00	25,9	06:00	30,0	06:15	30,1	05:15	26,1	06:00	30,1	05:45	29,7
Amp T °C		7,0		6,6		1,8		5,5		1,8		2,9
19/mar	15:30	32,6	17:00	36,2	17:00	31,8	12:30	31,7	17:00	32,3	17:15	33,0
	05:00	26,3	06:00	30,6	09:00	30,2	06:30	26,9	06:45	30,4	06:30	30,1
Amp T °C		6,3		5,6		1,6		4,8		1,9		2,9
20/mar	13:30	33,0	16:00	36,5	16:45	32,0	13:15	31,7	16:30	32,3	17:00	32,9
	05:45	26,2	06:00	30,5	06:15	30,3	05:45	26,7	06:00	30,6	06:00	30,3
Amp T °C		6,8		6,0		1,7		5,0		1,7		2,6
21/mar	13:45	32,8	16:45	36,5	16:45	31,8	13:45	32,7	16:45	32,3	17:00	32,9
	06:00	25,6	05:45	30,2	06:45	30,2	05:15	26,3	06:00	30,4	05:45	30,1
Amp T °C		7,2		6,3		1,7		6,4		1,9		2,8

Temp. Médias - co	°C
Text-co máxima média	32,7
Text-co mínima média	26,1
Ts-co máxima média	36,3
Ts-co mínima média	30,2
Tq-co máxima média	31,7
Tq-co mínima média	30,1

Temp. Médias - bc	°C
Text-bc máxima média	31,6
Text-bc mínima média	26,5
Ts-bc máxima média	31,9
Ts-bc mínima média	30,2
Tq-bc máxima média	32,4
Tq-bc mínima média	29,7

Amplitudes Médias - co	°C
Amplitude média ext-co	6,7
Amplitude média s-co	6,0
Amplitude média q-co	1,6

Amplitudes Médias - bc	°C
Amplitude média ext-bc	5,0
Amplitude média s-bc	1,7
Amplitude média q-bc	2,6

Fonte: Autor (2019).

4.2.2 Máximas e mínimas – Parede de Concreto e Bloco de Estrutural Cerâmico

As temperaturas máximas e mínimas medidas in loco nas habitações de paredes de concreto e bloco estrutural cerâmico são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Máximas e mínimas - Parede de Concreto x Bloco estrutural cerâmico

Data	Hora	Text-co	Hora	Ts-co	Hora	Tq-co	Hora	Text-ce	Hora	Ts-ce	Hora	Tq-ce
25.03	12:30	32,7	15:00	34,8	15:15	30,9	11:30	33,2	14:00	31,7	14:00	31,8
	06:00	25,4	06:00	29,5	07:00	29,4	05:45	26,5	06:00	29,3	05:45	29,4
Amp T °C		7,4		5,3		1,4		6,7		2,4		2,4
26.03	14:00	31,2	14:00	32,3	00:00	30,3	14:45	31,4	15:00	30,5	15:00	30,9
	08:15	25,1	08:00	29,4	08:15	29,4	23:45	24,8	23:45	28,7	23:45	29,0
Amp T °C		6,1		2,9		0,9		6,6		1,8		1,9
29.03	16:00	27,2	00:00	29,2	00:00	28,8	10:45	29,2	13:15	29,0	13:15	29,4
	05:45	24,0	23:45	27,3	23:30	27,5	05:30	24,9	06:00	27,9	06:00	28,0
Amp T °C		3,2		1,9		1,3		4,3		1,2		1,4
30.03	15:45	29,4	16:30	30,7	16:30	28,2	14:00	32,6	14:45	29,7	14:45	30,1
	04:30	24,5	06:30	26,6	08:30	26,9	05:00	25,0	05:00	27,5	05:00	27,6
Amp T °C		5,0		4,1		1,3		7,6		2,2		2,5
31.03	13:45	30,3	16:45	32,5	16:45	28,9	15:45	32,1	14:45	29,5	13:15	29,9
	06:30	24,4	06:00	27,2	06:45	27,1	05:15	25,0	05:45	27,7	05:45	27,8
Amp T °C		5,9		5,3		1,8		7,1		1,8		2,1
01.04	13:15	31,2	16:00	33,5	16:00	29,8	14:15	34,2	13:45	30,9	13:45	31,2
	05:45	25,2	05:45	28,5	05:30	28,0	06:00	26,0	05:30	28,2	05:45	28,3
Amp T °C		6,0		5,0		1,8		8,2		2,6		2,8
03.04	15:15	31,3	17:00	33,1	16:45	29,6	15:45	34,5	15:30	30,3	15:45	30,9
	05:00	24,5	06:00	27,5	07:30	27,6	05:45	25,0	06:00	27,8	05:30	28,0
Amp T °C		6,8		5,6		2,1		9,5		2,6		2,9
04.04	13:45	31,4	15:30	33,4	15:30	30,2	14:16	33,6	14:00	30,7	14:00	31,3
	06:00	25,4	07:30	29,0	07:30	28,6	06:15	25,7	06:00	28,6	06:45	28,8
Amp T °C		6,0		4,4		1,7		7,9		2,1		2,5

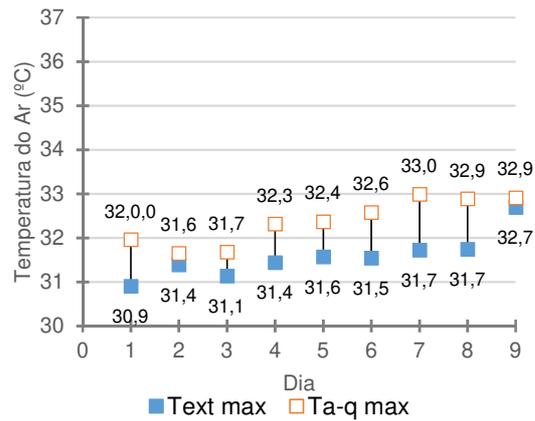
Temp. Médias - co	°C	Temp. Médias - ce	°C
Text-co máxima média	30,6	Text-ce máxima média	32,6
Text-co mínima média	24,8	Text-ce mínima média	25,4
Ts-co máxima média	32,4	Ts-ce máxima média	30,3
Ts-co mínima média	28,1	Ts-ce mínima média	28,2
Tq-co máxima média	29,6	Tq-ce máxima média	30,7
Tq-co mínima média	28,1	Tq-ce mínima média	28,4
Amplitudes Médias - co	°C	Amplitudes Médias - ce	°C
Amplitude média ext-co	5,8	Amplitude média ext-ce	7,2
Amplitude média s-co	4,3	Amplitude média s-ce	2,1
Amplitude média q-co	1,5	Amplitude média q-ce	2,3

Fonte: Autor (2019).

4.2.3 Diferenças de temperaturas máximas externas e internas – Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco de concreto

As diferenças de temperatura entre as habitações de parede de concreto e bloco de concreto estrutural são apresentadas no gráfico 01, 02 e 03.

Gráfico 1 – Quarto parede de bloco de concreto



Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com paredes de bloco de concreto estrutural nas medições feitas no quarto, dos 9 dias medidos e validados em todos os dias a temperatura interna máxima (Ta-q max) foi maior que a temperatura externa máxima (Text max).

Gráfico 2 - Sala parede de concreto Moldado *in loco*

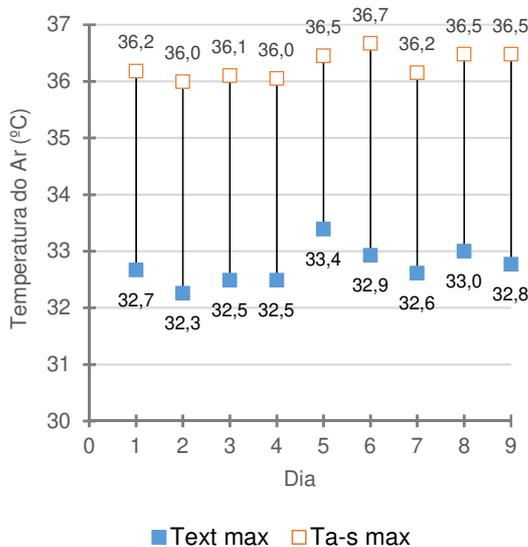
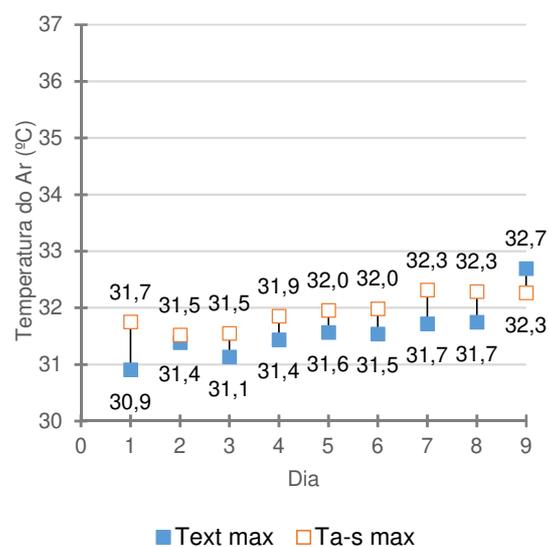


Gráfico 3 – Sala parede de bloco de concreto



Fonte: Autor (2019).

Fonte: Autor (2019).

Na unidade habitacional com paredes de concreto moldado in loco, ambiente sala, vemos que também as temperaturas máximas internas ($T_{a-s \text{ max}}$) estão maiores que as externas ($T_{ext \text{ max}}$) em todos os 09 dias validados. Na unidade habitacional com paredes de blocos de concreto a temperatura interna máxima da sala ($T_{a-s \text{ max}}$) superou a temperatura externa máxima ($T_{ext \text{ max}}$) em 08 dias dos 09 analisados.

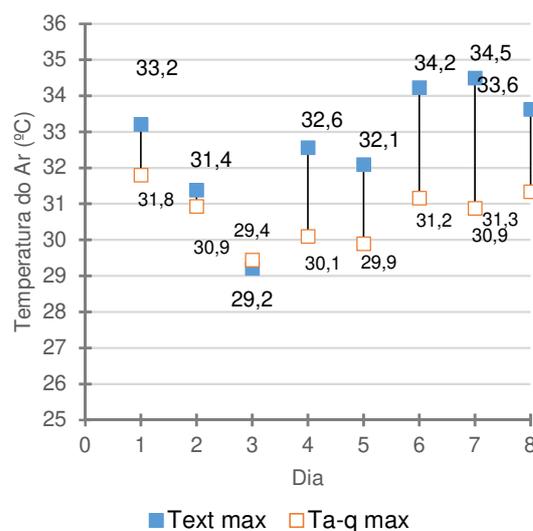
Nota-se também que as diferenças de temperaturas máximas internas e externas são maiores na unidade habitacional com paredes maciças de concreto. Resultado esperado, devido às propriedades térmicas da parede maciça de concreto $e = 10\text{cm}$, como maior transmitância e capacidade térmica do material do que as paredes com bloco de concreto estrutural.

Medições de temperatura nestas unidades mostraram que na grande maioria dos dias o critério da norma de desempenho ABNT NBR 15575:2013 foi difícil de ser alcançado. As temperaturas máximas internas ficaram maiores que as temperaturas máximas externas.

4.2.4 Diferenças de temperaturas máximas externas e internas – Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco Estrutural Cerâmico

As diferenças de temperatura entre as habitações de parede de concreto e bloco cerâmico estrutural são apresentadas no gráfico 04, 05 e 06.

Gráfico 4 – Quarto parede de bloco de concreto estrutural cerâmico



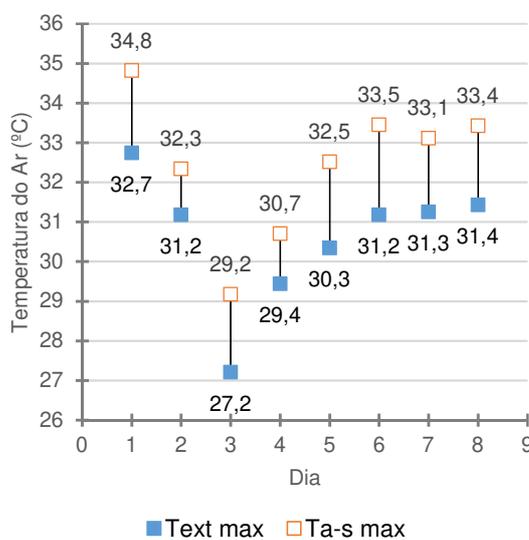
Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com paredes de bloco estrutural cerâmico nas medições

feitas no quarto, dos 8 dias medidos e validados em 7 dias a temperatura interna máxima ($T_a - q \text{ max}$) ficou abaixo da temperatura máxima externa ($T_{\text{ext max}}$). Alcançando assim, nestes 7 dias, o critério de desempenho da norma brasileira ABNT NBR 15575:2013.

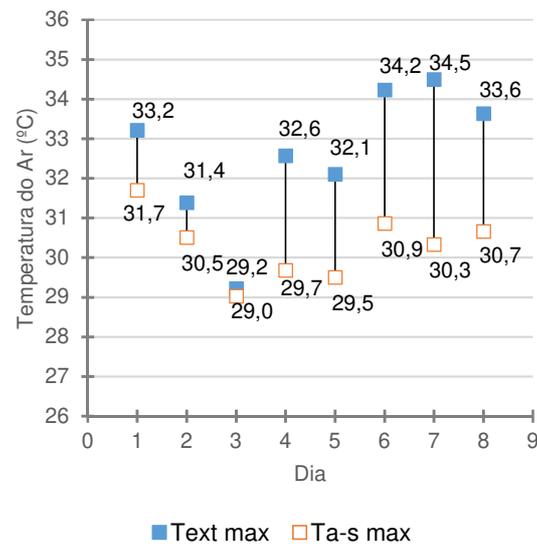
As propriedades térmicas das paredes estruturais cerâmicas contribuem para os melhores resultados. O fator mais baixo de transmitância térmica, dentre os sistemas analisados neste trabalho, tem influência direta no melhor desempenho alcançado.

Gráfico 5 – Sala parede de concreto Moldado *in loco*



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 6 – Sala parede de bloco de concreto estrutural cerâmico



Fonte: Autor (2019).

Na unidade habitacional de paredes de concreto ambiente sala, dos 8 dias analisados e validados em todos a temperatura interna máxima ($T_a - s \text{ max}$) foi superior à temperatura externa máxima ($T_{\text{ext max}}$).

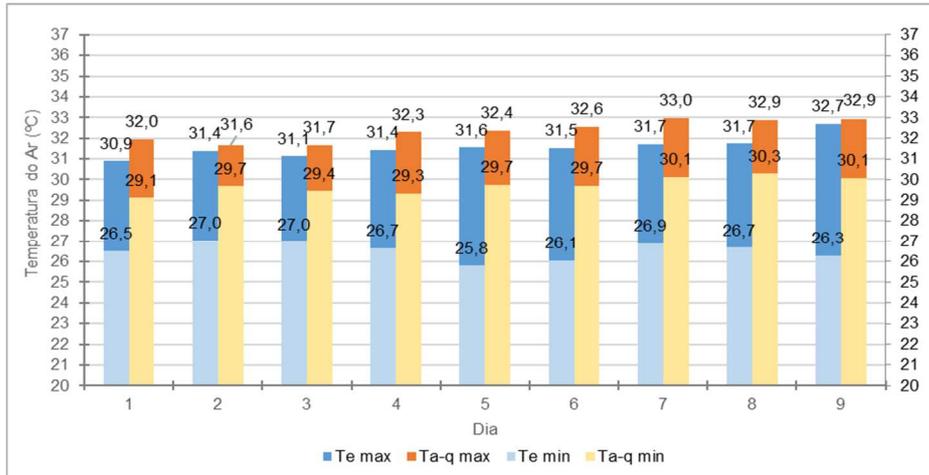
Em contrapartida na unidade com paredes estruturais de cerâmica ambiente sala, dos 8 dias analisados e validados em 7 dias a temperatura interna máxima ($T_a - s \text{ max}$) foi inferior à temperatura máxima externa ($T_{\text{ext max}}$).

Os resultados, considerando apenas as temperaturas máximas internas em relação às temperaturas máximas externas, apontam um melhor desempenho térmico (dias onde a temperatura máxima interna é menor que a temperatura máxima externa) da unidade habitacional de paredes com bloco cerâmico. Porém outras variáveis têm direta influência nestes resultados e devem ser objeto de estudo, já que os projetos dos 03 modelos habitacionais desta pesquisa de medição são diferentes, assim como os valores de absorvância, vedações, índices de ventilação, posição geográfica, coberturas e sombreamentos, etc.

4.2.5 Amplitudes de temperatura máxima e mínima externas e internas - Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco de concreto

As amplitudes térmicas dos apartamentos de paredes de concreto e paredes de bloco estrutural de concreto estão apresentadas nos gráficos 07, 08 e 09.

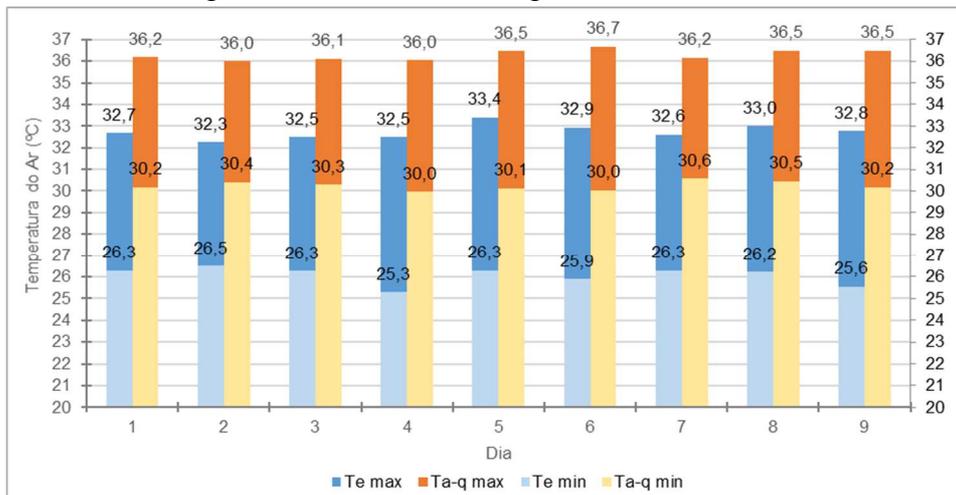
Gráfico 7 – Amplitudes térmicas do quarto parede de bloco de concreto



Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com paredes de bloco de concreto no ambiente quarto, a amplitude térmica (diferença entre a máxima externa e mínima externa) média externa foi de 5,02°C enquanto sua amplitude térmica média interna foi de 2,6°C. No ambiente da sala da unidade de paredes de bloco de concreto (Gráfico 09) a amplitude térmica média interna foi de 1,77°C.

Gráfico 8 – Amplitudes térmicas da sala parede de concreto moldado *in loco*

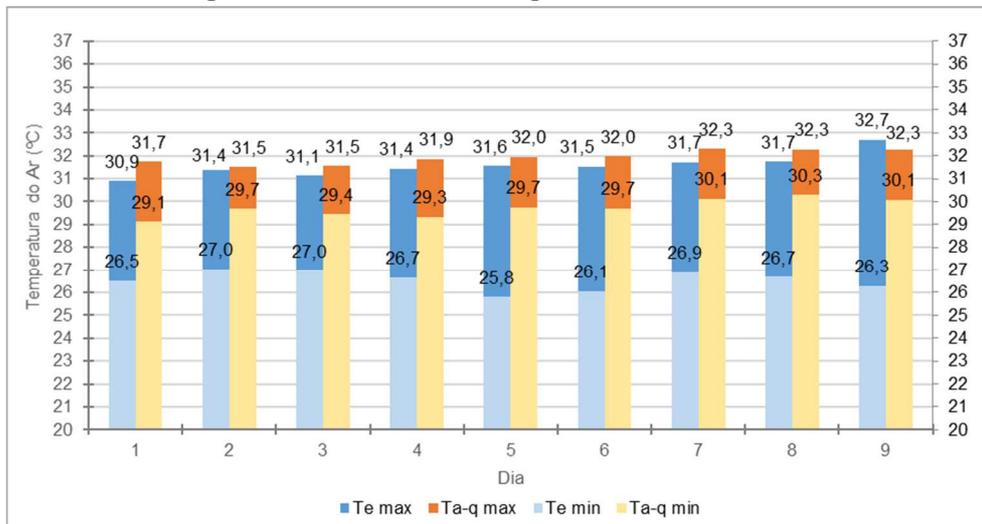


Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com parede de concreto moldado in loco, no ambiente da sala, a amplitude térmica média externa foi de $6,67^{\circ}\text{C}$ e a amplitude térmica média interna foi de $6,04^{\circ}\text{C}$.

Percebeu-se que a diferença de amplitudes entre as temperaturas médias internas e externas foi menor para a unidade habitacional com paredes maciças de concreto. Quanto menor esta diferença de amplitudes maior é a oscilação da temperatura interna em função da temperatura externa. Isto deve-se a uma menor inércia térmica na unidade habitacional com paredes maciças de concreto associada à sua pequena espessura ($e=10\text{cm}$), apesar do concreto ter maior transmitância térmica (U) e maior capacidade térmica (Ct) do que as unidades com paredes de blocos de concreto e paredes de blocos estruturais cerâmicos.

Gráfico 9 – Amplitudes térmicas da sala parede de bloco de concreto

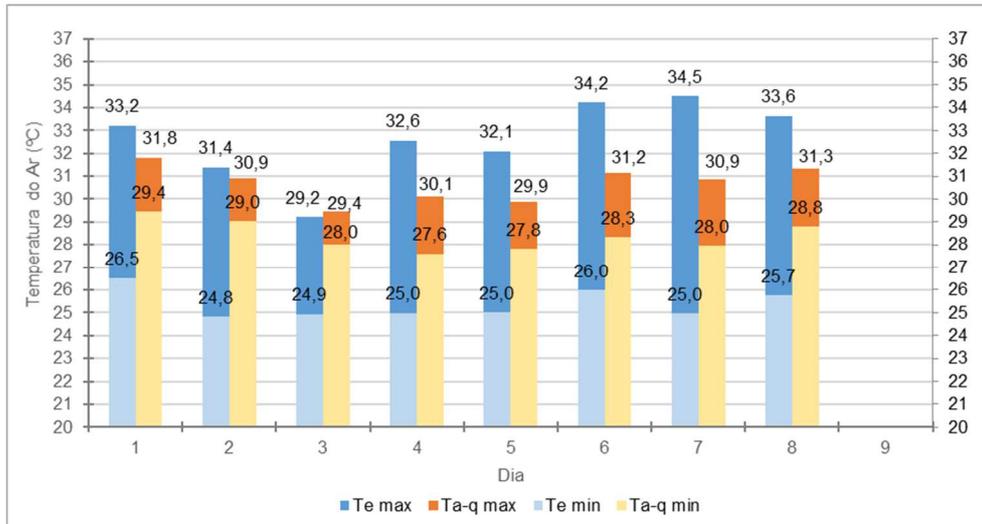


Fonte: Autor (2019).

4.2.6 Amplitudes de temperatura máxima e mínima externas e internas - Apartamento de Paredes de Concreto e apartamento de Bloco Estrutural Cerâmico

As amplitudes térmicas dos apartamentos de paredes de concreto e paredes de bloco estrutural de concreto estão apresentadas nos gráficos 10, 11 e 12.

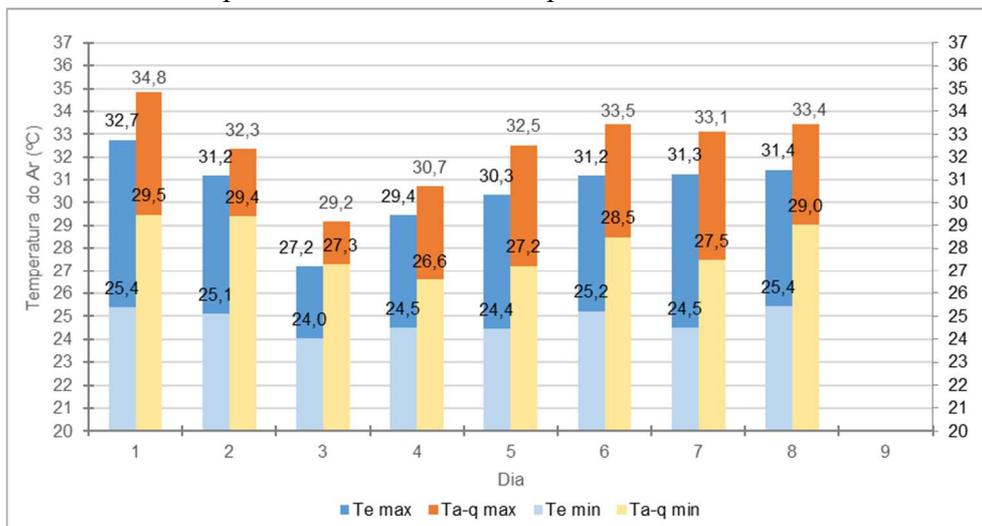
Gráfico 10 – Amplitudes térmicas do quarto parede de bloco de estrutural cerâmico



Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com paredes de bloco estrutural cerâmico, no ambiente quarto, a amplitude térmica média externa foi de 7,23°C e a amplitude térmica média interna no quarto foi de 2,32°C.

Gráfico 11 – Amplitudes térmicas da sala parede de concreto moldado *in loco*

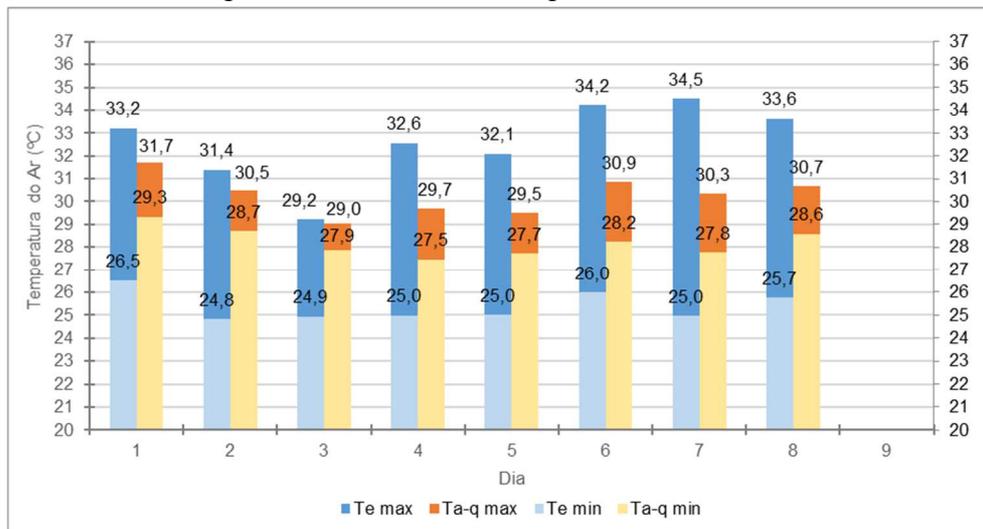


Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com parede de concreto moldado in loco, no ambiente da sala, a amplitude térmica média externa foi de $5,78^{\circ}\text{C}$ e a amplitude térmica média interna foi de $4,32^{\circ}\text{C}$.

Novamente, para o período de análise entre paredes de concreto maciço e paredes de blocos estrutural cerâmico, verificou-se que as diferenças de amplitudes térmicas internas e externas da unidade com paredes de concreto são menores. Indicando com isso a maior oscilação de temperatura interna em função da temperatura externa.

Gráfico 12 – Amplitudes térmicas da sala parede de bloco de concreto estrutural cerâmico



Fonte: Autor (2019).

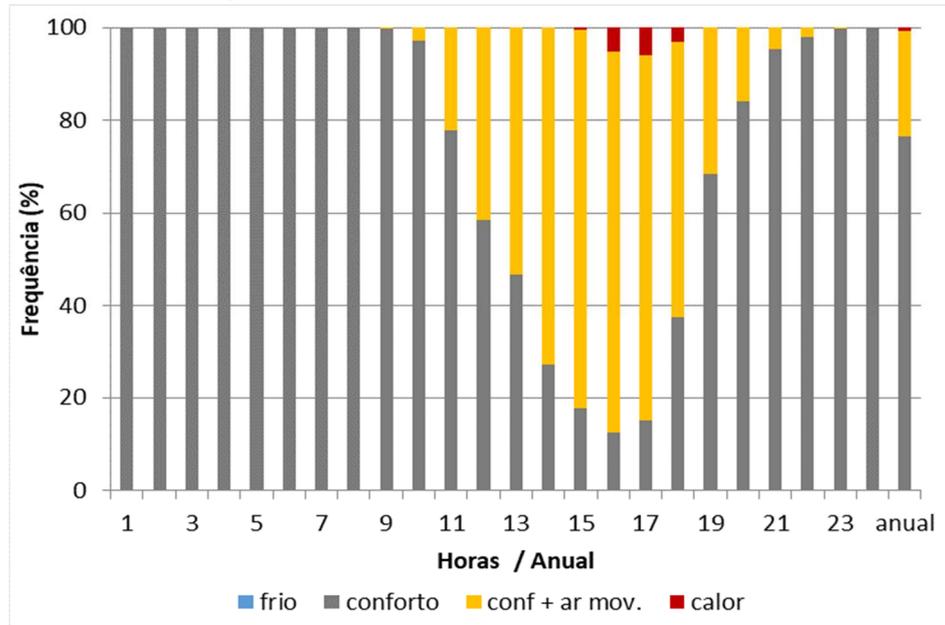
Na sala da unidade de paredes de bloco estrutural cerâmico enquanto a amplitude térmica externa foi de $7,23^{\circ}\text{C}$, internamente a amplitude térmica foi de $2,08^{\circ}\text{C}$.

Este resultado com menores variações internas de temperatura em relação às externas obtidas nas unidades com paredes de blocos estruturais cerâmicos revelam que estes apartamentos têm uma maior inércia térmica. O fenômeno de inércia térmica explica a capacidade de armazenar ou liberar calor. Lembrando que os ambientes medidos nesta pesquisa estavam fechados com maior capacidade de guardar calor.

4.3 Simulação parede de concreto moldado *in loco*

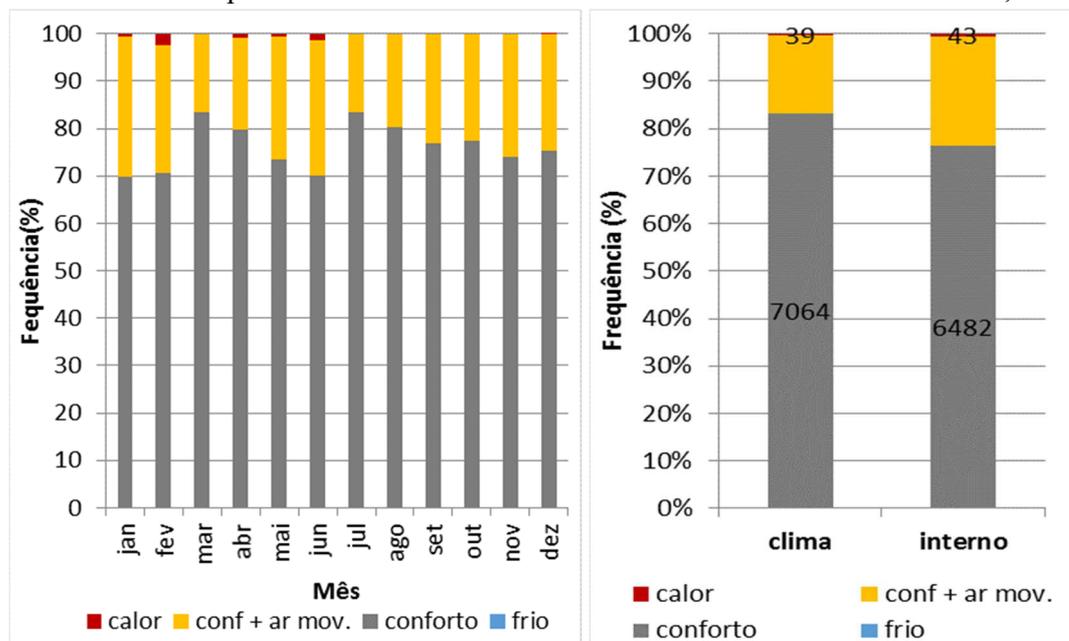
Os resultados e gráficos das simulações numéricas com abordagem adaptativa para paredes de concreto são apresentadas a seguir:

Gráfico 13 - Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,3$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 14 - Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,3$



Fonte: Autor (2019).

Foram calculadas as horas de conforto anual, simulando o protótipo utilizado, com as

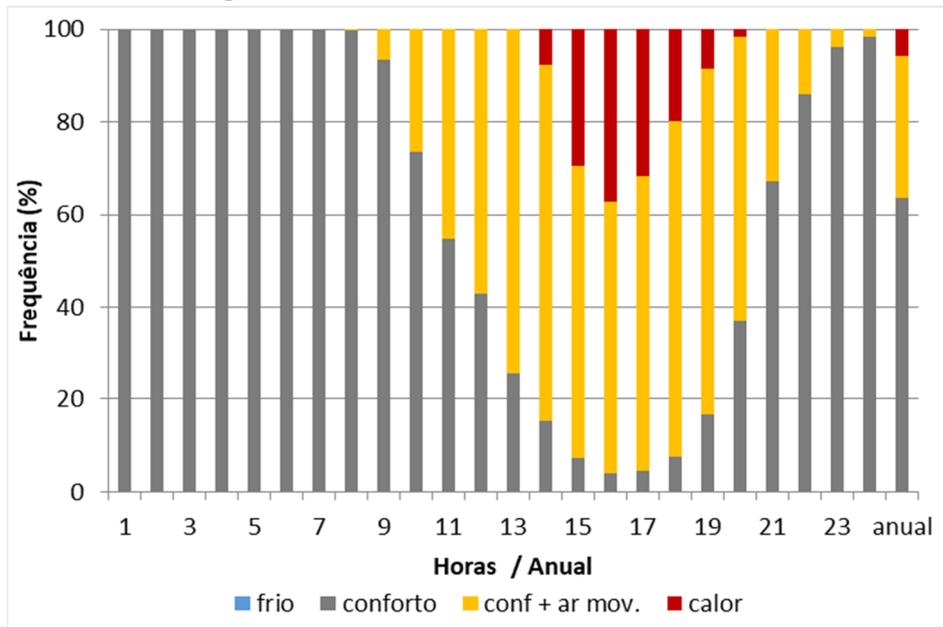
vedações verticais externas em parede de concreto maciço de espessura 0,10m e $\alpha = 0,3$ (cor clara). Foram obtidas 6482 horas de conforto térmico interno, e 43 horas de desconforto (calor) no ambiente de longa permanência (QUARTO 01). Ou seja, 73,99% das horas foram de conforto, de acordo com metodologia adaptativa.

A absorvância baixa ($\alpha = 0,3$) nesta simulação influencia diretamente estes resultados. A vedação vertical externa de paredes maciças de concreto possui, como já se sabe, valores de transmitância térmica (U) superiores aos valores de transmitância das vedações de bloco de concreto estrutural e bloco estrutural cerâmico. A escolha das cores claras nos fornece mais horas de conforto térmico.

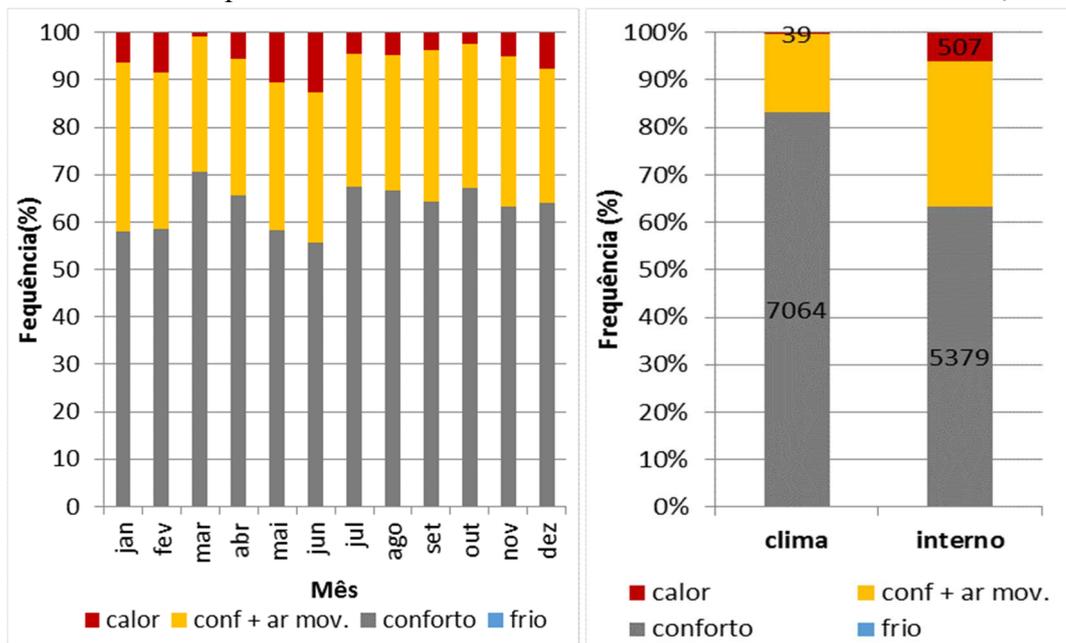
Os acréscimos aceitáveis na temperatura operativa (Tabela 14) com $V_a = 0,6$ m/s correspondem à faixa de conforto mais movimento do ar. Foram obtidas 2235 horas de conforto mais movimento do ar (25,51%).

Vale salientar que o movimento do ar não necessariamente é natural. Pode ser obtido de forma natural ou mecânica, de acordo com método adaptativo. Estes acréscimos aceitáveis da norma ASHRAE 55:2017 leva-se em conta as variações de adaptação que os usuários podem utilizar para conseguir mais horas de conforto. Em contrapartida, se não for obtida esta taxa de velocidade do ar, o ambiente estará em faixa de desconforto térmico.

O gráfico 13 mostra que das 12hs às 18hs, considerando todos os dias do ano, temos menos de 60% de horas de conforto, período onde as temperaturas são mais altas. As horas 15, 16 e 17 são as horas mais desconfortáveis com menos de 20% de horas de conforto anualmente. Os meses com menos horas de conforto (Gráfico 14) são janeiro e fevereiro, correspondendo ao período de verão da região, e temos também o mês de junho com frequência menor de horas de conforto.

Gráfico 15 - Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 16 - Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Agora com $\alpha = 0,5$ (cor média), obtivemos 5379 horas de conforto (65,51%) e 507 horas de desconforto. Nota-se que as horas de desconforto tiveram acréscimo considerável (10 vezes mais de horas de desconforto) com relação à absorvância de cor clara. A horas de conforto tiveram decréscimo de 8,48%.

As horas de conforto com movimento do ar foram 2874 horas (32,80%).

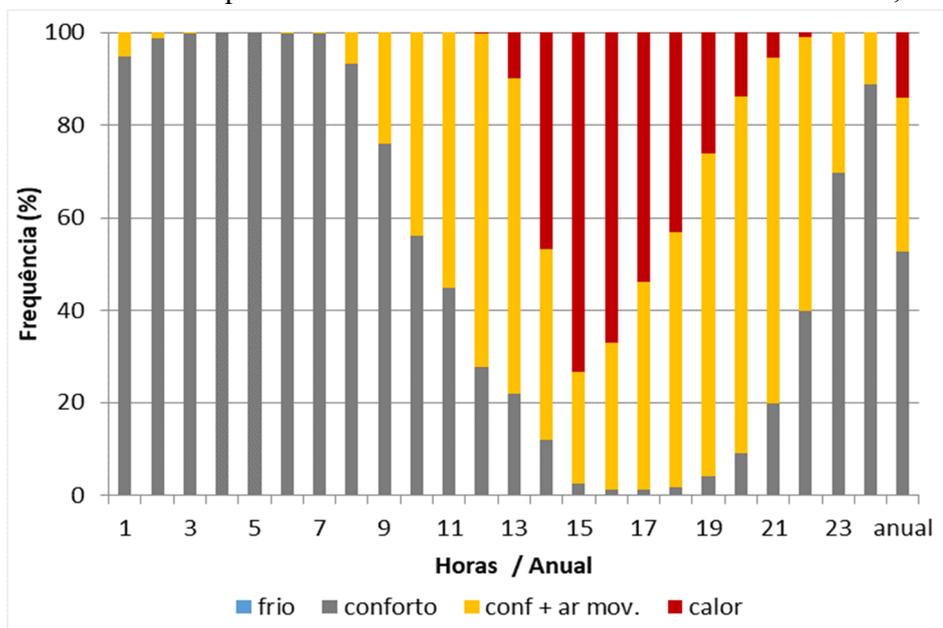
O gráfico 15 mostra que das 11 horas às 20 horas (anuais) a frequência de temperatura

de conforto ficou abaixo dos 60%, e mais horas ficaram abaixo de 20% de conforto com relação à modelagem anterior (horas 14 às 19 horas).

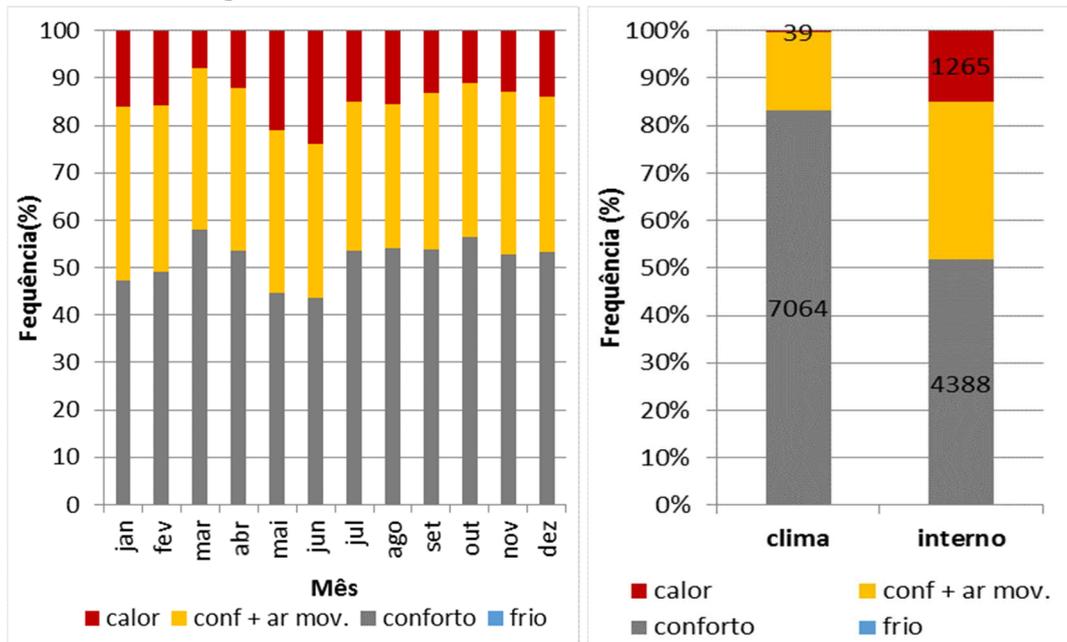
Os meses de janeiro, fevereiro, maio e junho (Gráfico 16) são os meses mais quentes nesta configuração, apresentando menos de 60% de horas de conforto.

O clima de Fortaleza nestes meses é mais quente, e juntamente com a vedação externa vertical mais desfavorável termicamente com relação à transmitância (parede de concreto moldado in loco) e com absorvância maior influencia diretamente os resultados menos satisfatórios.

Gráfico 17 - Frequência de horas de conforto anual: concreto – $\alpha = 0,7$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 18 - Frequência de horas de conforto mensal e total: concreto – $\alpha = 0,7$ 

Fonte: Autor (2019).

Por fim temos os resultados para as vedações verticais externas de parede de concreto moldado in loco com $\alpha = 0,7$ (cor escura).

Nota-se claramente o quão pior esta situação simulada se configura (gráfico 17). Temos 4388 horas de conforto (50,01%) do total de horas anuais e 1265 horas de desconforto (14,44%). Com relação à cor clara ($\alpha = 0,3$), temos decréscimo de 23,98% de horas de conforto e acréscimo de 13,94% de horas de desconforto. Situação extrema para análise neste trabalho onde temos o sistema com piores propriedades térmicas (transmitância) e cor escura desfavorável para região de clima quente úmido.

Todos os meses do ano ficaram abaixo de 60% de horas de conforto (gráfico 18), com os meses de janeiro, fevereiro, maio e junho ainda piores (abaixo de 50% de horas de conforto). Das 10hs da manhã até 22 horas da noite temos períodos com menos de 60% de horas de conforto. O período compreendido das 14hs às 21hs temos menos de 20% de horas de conforto.

Estes longos períodos de desconforto também são influenciados pela inércia térmica alta das paredes de concreto maciças, que fazem com que ocorra um maior atraso térmico na dissipação do calor interno.

Com estes resultados não se recomenda de forma nenhuma para a região absortância nessa faixa de análise, ainda mais se considerarmos o método construtivo de paredes maciças de concreto.

Atualmente, o sistema de paredes maciças de concreto é amplamente usado em diferentes partes do Brasil. Os requisitos de propriedades térmicas para este método construtivo

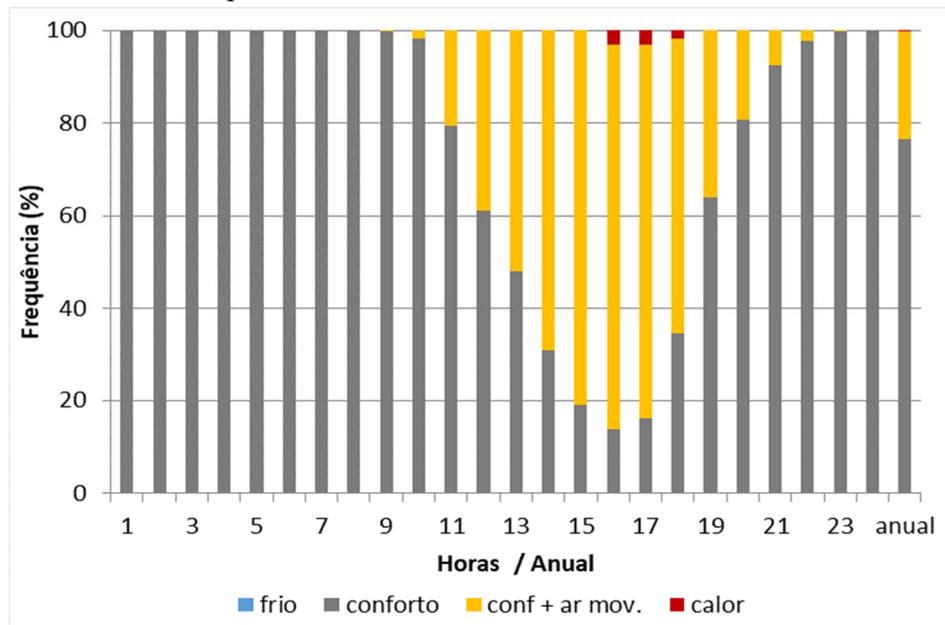
não atendem ao desempenho térmico normativo da ABNT NBR 15575:2013. Portanto, é necessário a incorporação de referências de conforto térmico para este sistema, visto que as simulações que levam em consideração apenas o dia típico são irreais (OLIVEIRA et al., 2015).

Paredes de concreto maciço associadas às cores escuras causam índices de performance térmico inferiores. O correto uso de materiais aliados à correta estratégia de projeto é essencial para obtenção de conforto das moradias (MORENO; MORAIS; SOUZA, 2017; WILDE; FUERTES; ALENCASTRO, 2018).

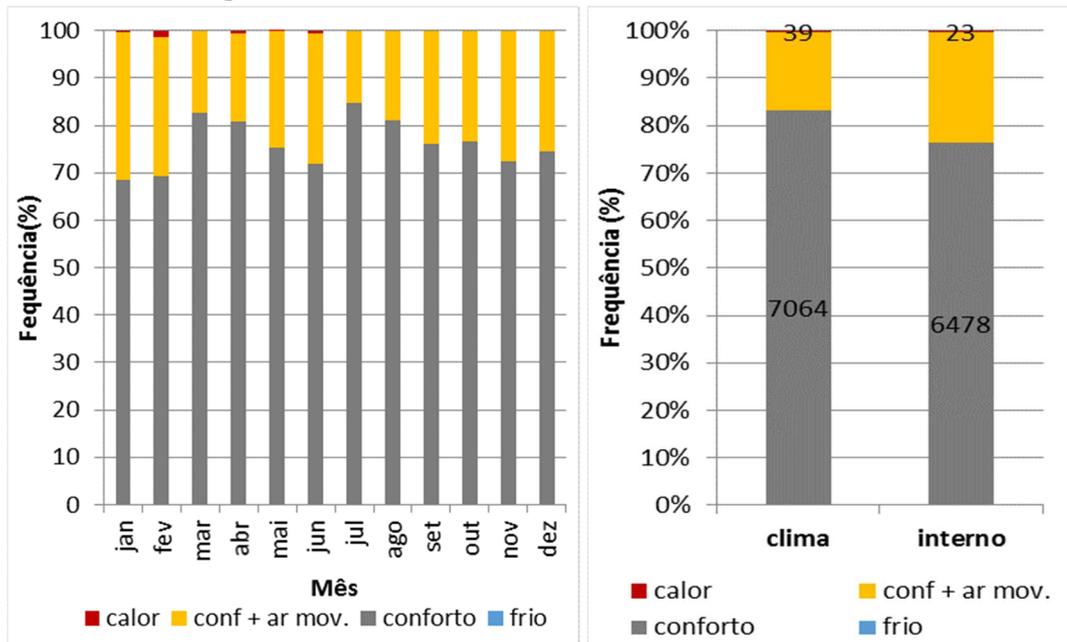
4.4 Simulação de paredes de bloco de concreto estrutural

Os resultados e gráficos das simulações numéricas com abordagem adaptativa para paredes de bloco de concreto estrutural são apresentadas a seguir:

Gráfico 19 - Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,3$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 20 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,3$ 

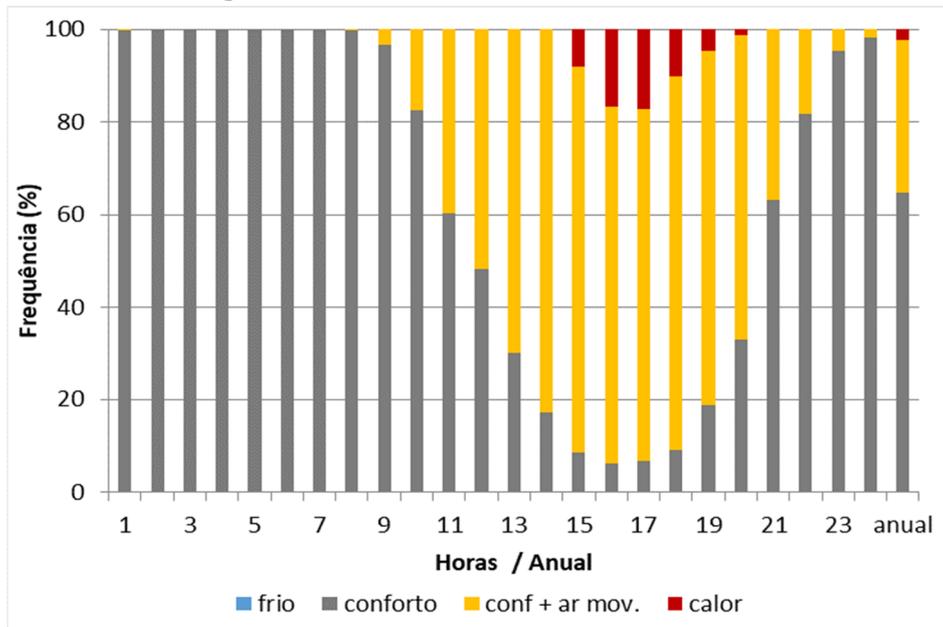
Fonte: Autor (2019).

A simulação numérica anual para paredes constituídas com bloco de concreto estrutural, com $\alpha = 0,3$ (cor clara), obteve 6478 horas de conforto anual (73,9%) e 23 horas de desconforto (0,26%). Se compararmos com os resultados de vedações com parede maciça de concreto com $e=0,10m$, os resultados de horas de conforto são considerados extremamente próximos (04 horas de diferença apenas).

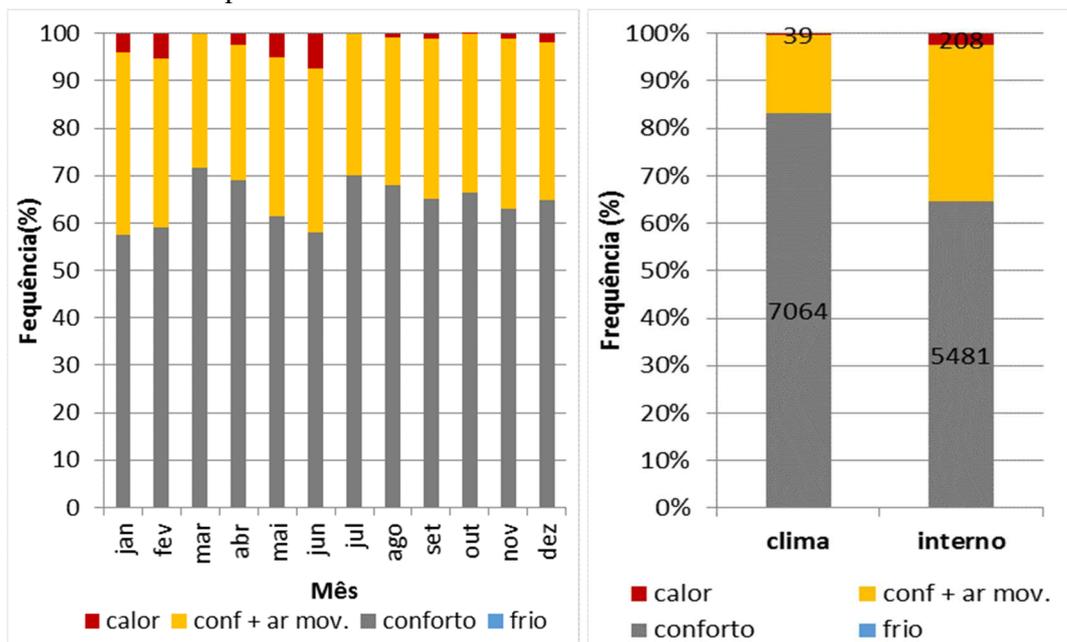
O bloco de concreto estrutural possui transmitância de $U=2,91 \text{ W/m}^2.K$ que não é um valor considerado tão baixo e suas propriedades térmicas do concreto fazem com que sua eficiência termo energética, para valores de absorvância de cor clara ($\alpha = 0,3$), fiquem bem próximos das vedações com paredes maciças para a mesma absorvância 0,3.

Porém, existe uma melhora com relação às vedações com paredes maciças de concreto nas horas com menos de 60% de conforto térmico. Nesta configuração temos que as horas abaixo de 60% de conforto são de 13hs às 18hs (Gráfico 19). Meses de janeiro e fevereiro são os mais desconfortáveis (gráfico 20) com menos de 70% de frequência de horas de conforto.

Logo, apesar de um resultado de horas anuais de conforto ficar bem próximo com relação as vedações de paredes maciças, existe uma melhora no período mais desconfortável do dia. A absorvância clara é essencial para melhor conforto neste tipo construtivo.

Gráfico 21 - Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 22 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Considerando agora absorvância média ($\alpha = 0,5$) temos 5481 horas de conforto anual (62,6%) e 208 horas de desconforto ao calor (2,4%).

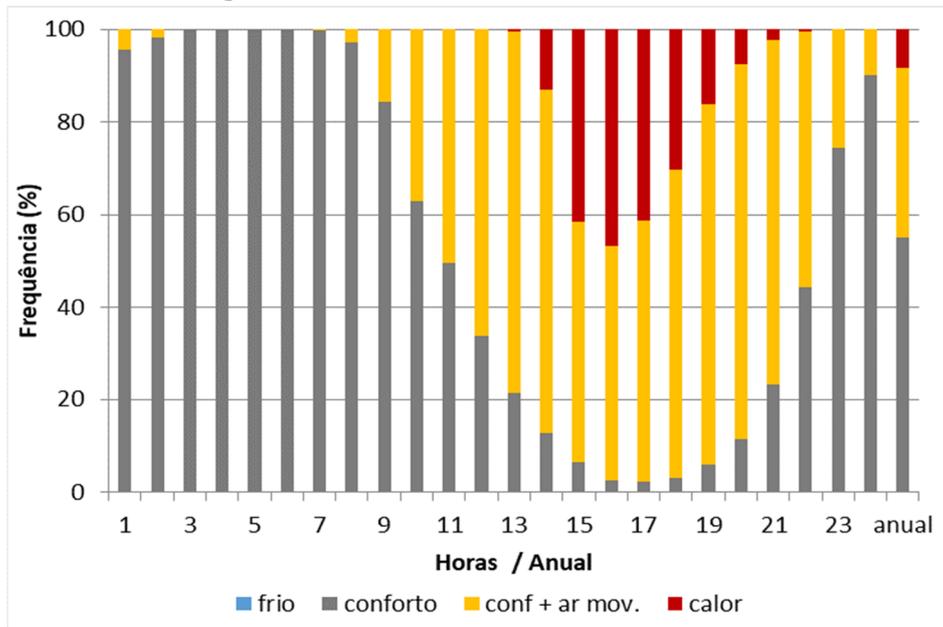
Comparando-se com as paredes maciças de concreto de mesma absorvância notamos agora que as horas de desconforto ao calor foram reduzidas. De 507 horas nas paredes maciças para 208 para paredes estruturais de blocos de concreto.

Vemos que as propriedades térmicas melhores e o fator absorvância fizeram com que o

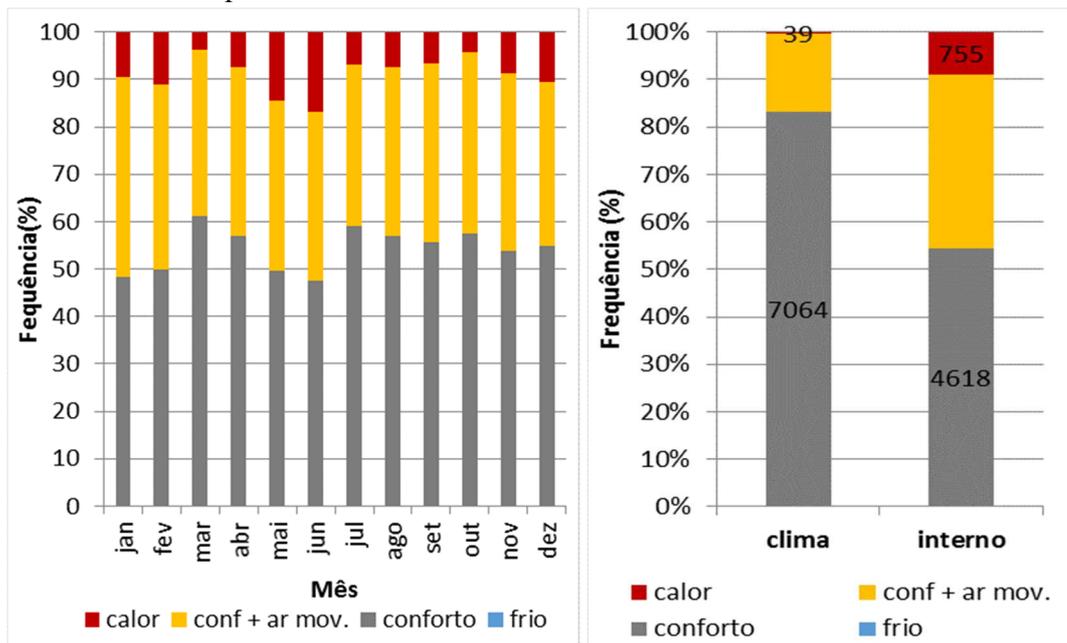
ambiente tivesse menos horas de desconforto comparado ao modelo de paredes maciças.

As horas com menos de 60% de conforto também foram menores. Aqui neste caso são as horas compreendidas no período de 12 às 20 horas (gráfico 21).

Na simulação de blocos de concreto com absorvância $\alpha = 0,5$ as faixas de conforto mais movimento do ar são maiores ao longo dos meses (gráfico 22) quando comparamos com as faixas de conforto e desconforto mensais das paredes maciças de concreto (gráfico 16). No processo adaptativo as pessoas buscam se adaptar às situações de desconforto e com maior ventilação (natural ou mecânica) obtém-se melhores resultados.

Gráfico 23 - Frequência de horas de conforto anual: bloco de concreto – $\alpha = 0,7$ 

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 24 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco de concreto – $\alpha = 0,7$ 

Fonte: Autor (2019).

A simulação com $\alpha = 0,7$ (cor escura) mostra os piores resultados de cada sistema. São 4618 horas de conforto (52,7%) e 755 horas de desconforto (8,6%). Não é recomendável, na busca pelo conforto térmico, configurações de vedações com absorvância de cor escura.

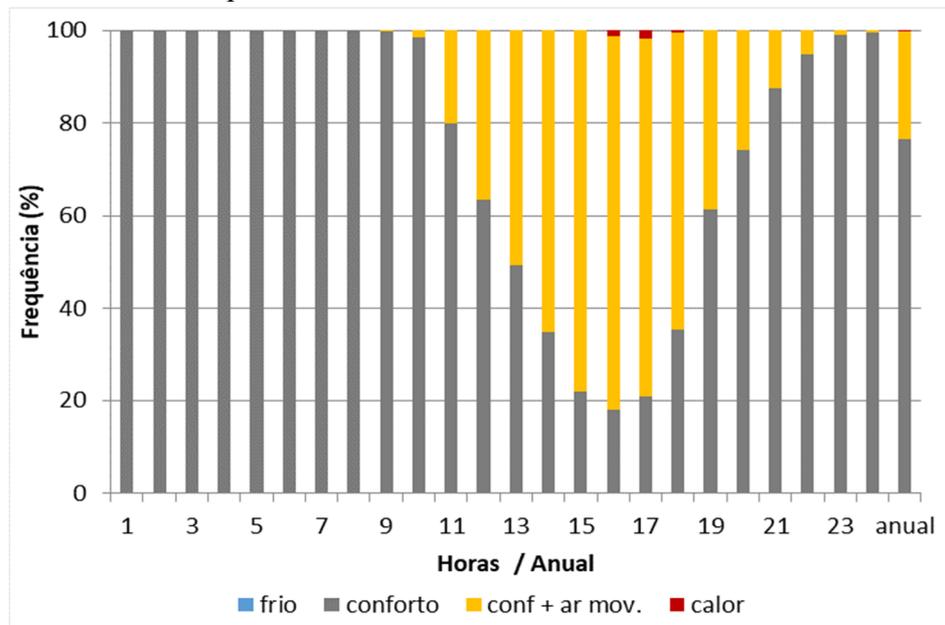
As horas de conforto, com relação às paredes maciças que têm piores propriedades térmicas, variou apenas 2,7%.

Somente o mês de março obteve mais de 60% de frequência de horas de conforto (gráfico 23). De 11hs às 22hs a frequência de horas de conforto ficou abaixo de 60% (gráfico 24). E de 14hs às 20hs a frequência de horas de conforto ficou abaixo de 20%. Inércia térmica, propriedades térmicas do material e absorvância estão ligados diretamente a estes resultados que não são satisfatórios ao conforto térmico.

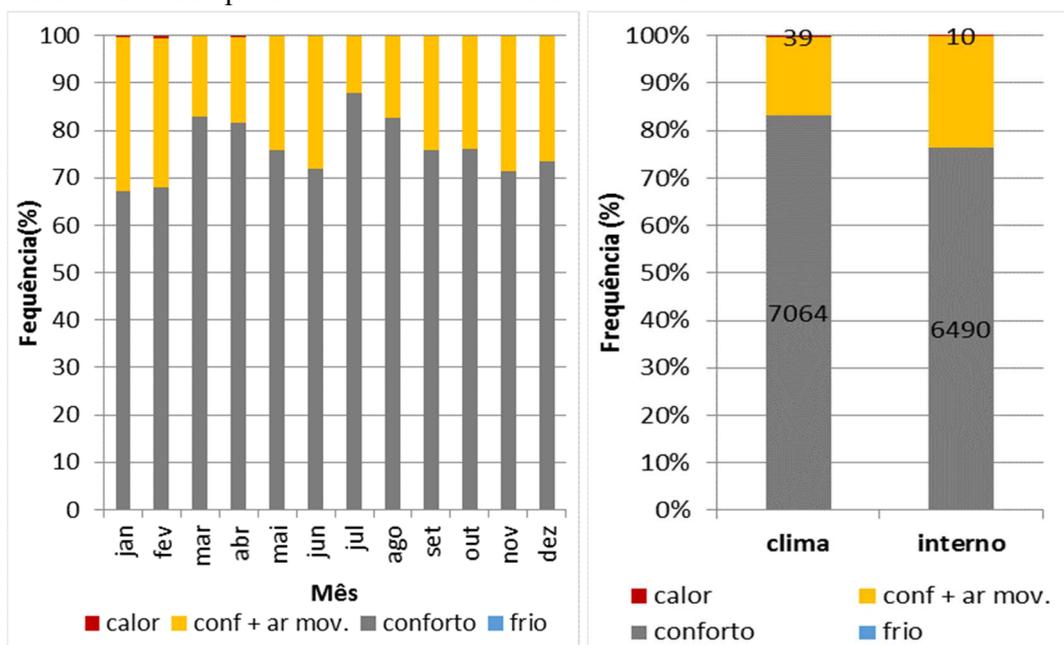
4.5 Simulação bloco estrutural cerâmico

Os resultados e gráficos das simulações numéricas com abordagem adaptativa para paredes de bloco estrutural cerâmico são apresentadas a seguir:

Gráfico 25 - Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,3$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 26 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,3$ 

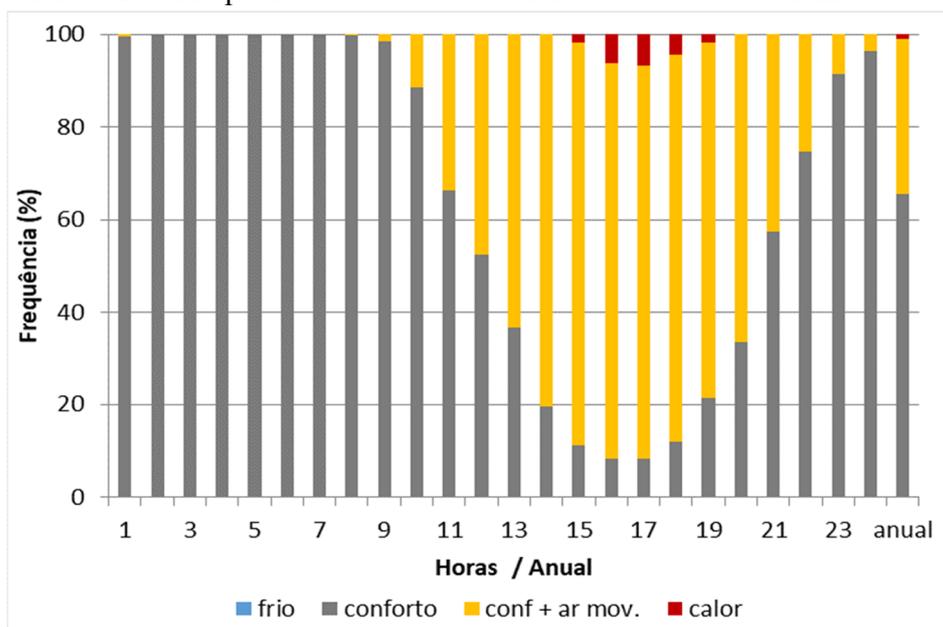
Fonte: Autor (2019).

Blocos cerâmicos estruturais possuem as melhores propriedades térmicas dos sistemas estudados. Com cores claras ($\alpha = 0,3$) atingem os melhores resultados de todas as simulações feitas. São 6490 horas de conforto (74%) e 10 horas de desconforto ao calor (0,11%).

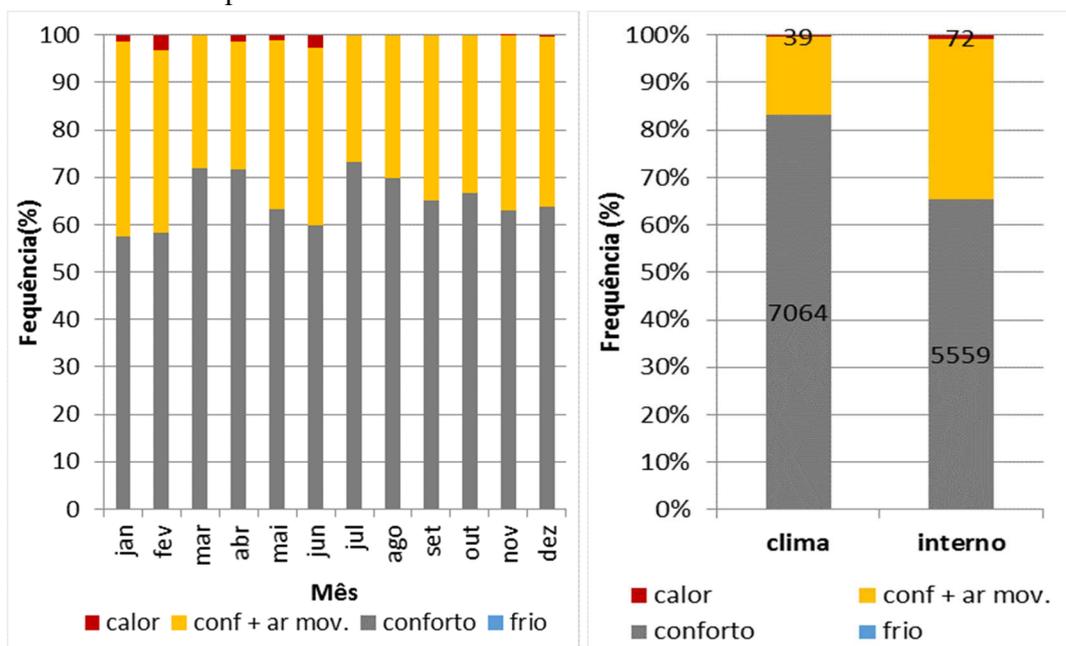
Os meses de janeiro e fevereiro são os que apresentam pior resultado para esta configuração, abaixo de 70% de frequência de horas de conforto (gráfico 26).

Se considerarmos que os usuários se adaptam mais o acréscimo de movimento do ar, temos 99% de frequência de conforto ao longo dos meses do ano (gráfico 25).

Para a realidade das regiões de clima quente e úmido esta deve ser a configuração a ser buscada nos projetos. Material com melhor performance térmica, menor transmitância, absorvância adotada com cores claras e adaptação ao movimento de ar, seja natural ou mecânica. Importante notar também que os blocos cerâmicos possuem mais cavidades (geometria dos blocos) e isto tem influência na sua transmitância térmica mais baixa que os outros sistemas de vedação analisados (MORISHITA et al, 2010).

Gráfico 27 - Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 28 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

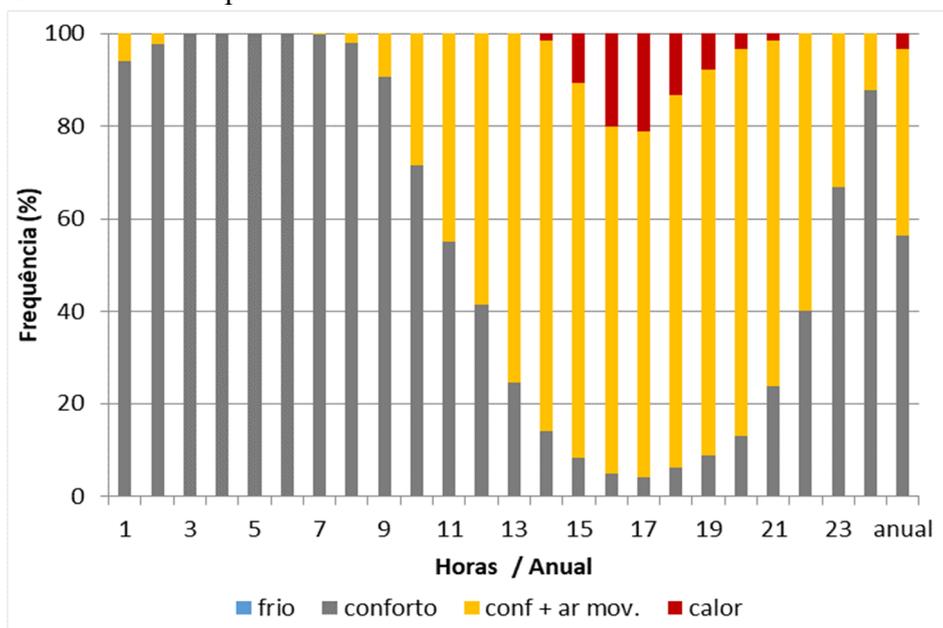
Como esperado, trocando a absorvância para $\alpha = 0,5$ as horas de conforto caem ao longo do ano. Temos 5559 horas de conforto (63,45%) e 72 horas de desconforto ao calor (0,82%).

Com vedações de blocos estruturais cerâmicos e cores médias ainda assim temos bons resultados. Reitera-se que boas propriedades térmicas aliados a projetos com aplicação de cores claras e médias temos bons resultados de conforto térmico. Na modelagem adaptativa podemos

ainda ter conforto mais movimento do ar que nos dão faixas maiores de conforto.

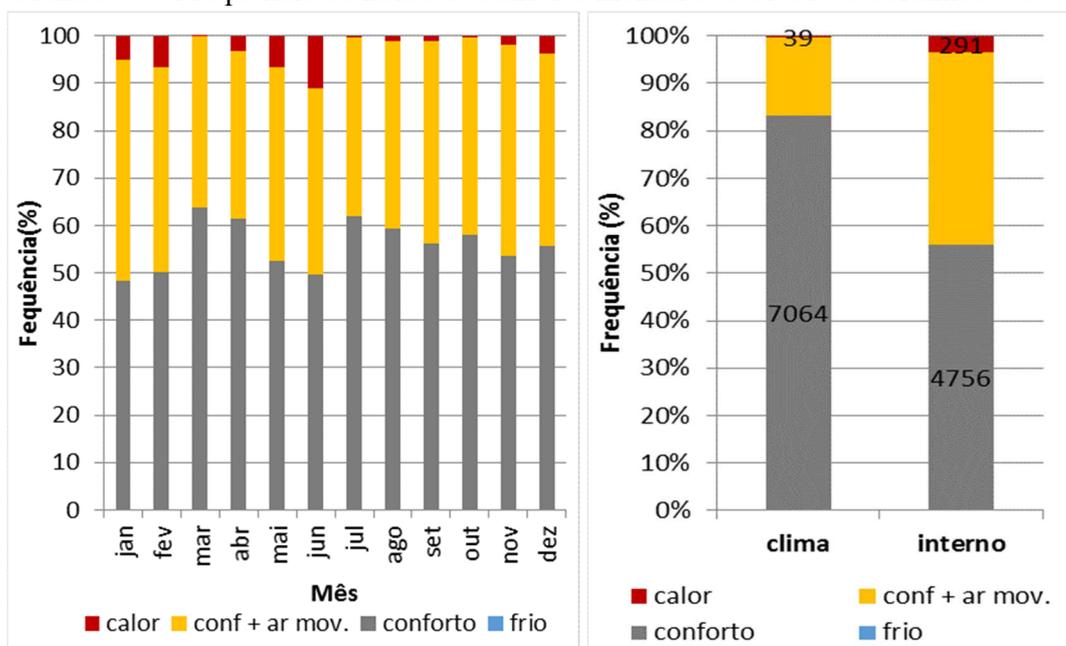
Ainda assim, vemos que as frequências de horas do período de 11 às 21 horas temos menos de 60% de horas de conforto na abordagem adaptativa (gráfico 28).

Gráfico 29 - Frequência de horas de conforto anual: bloco cerâmico – $\alpha = 0,7$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 30 - Frequência de horas de conforto mensal e total: bloco cerâmico – $\alpha = 0,7$



Fonte: Autor (2019).

Finalizando as simulações, temos a configuração de absorvância escura ($\alpha = 0,7$) para

blocos estruturais cerâmicos. Como esperado as horas de conforto diminuem para 4756 (54,3%) e temos 291 horas de desconforto ao calor.

Os dados relevantes e mais interessantes são as frequências de horas de conforto com menos de 20% ficaram compreendidas das 14 às 20 horas (gráfico 29).

Não se recomenda este sistema com absorvância de cores escuras. Porém com maiores ventilações quer sejam mecânicas ou naturais conferem ambientes, ainda, com alta taxa de conforto (acima de 90% em 11 meses do ano, como vemos no gráfico 30).

Após os resultados das simulações numéricas nota-se que, com a absorvância clara ($\alpha = 0,3$), as horas de conforto totais são próximas para os 03 métodos construtivos de vedação vertical estudados. As paredes maciças de concreto obtiveram 6482 horas de conforto, as paredes com bloco estrutural de concreto tiveram 6478 horas de conforto e as paredes com bloco estrutural cerâmico tiveram 6490 horas de conforto. Inclusive, as paredes maciças tiveram mais horas de conforto com absorvância de cor clara do que as paredes com bloco estrutural de concreto. Ou seja, as propriedades térmicas (como os valores de transmitância, resistência, etc.) são pouco notáveis quando se usa cores mais claras. Isto se deve ao fato da reflexão da radiação que já é feita com as cores de baixa absorvância, ajudando no conforto do edifício.

Em contrapartida, com cores escuras ($\alpha = 0,7$), que refletem menos radiação solar, as propriedades térmicas das paredes exercem maior influência. As paredes maciças tiveram 4388 horas de conforto e 1265 horas de desconforto ao calor nesta simulação. O melhor resultado, das paredes de bloco estruturais cerâmicos (que possuem menor transmitância), registrou 4756 horas de conforto e 291 horas de desconforto ao calor. Uma diferença mais acentuada que comprova que as cores escuras são menos apropriadas e com isso as propriedades térmicas das paredes de vedação devem ser melhor analisadas e avaliadas nas escolhas de projeto.

Com essas análises, põe-se em discussão o procedimento de simulação proposto pela ABNT NBR 15575:2013 com relação ao dia típico (verão). Trata-se de um critério difícil de ser atingido, no geral não se observa esta tendência (T interna máxima menor ou igual a T externa máxima). As simplificações que podem ser feitas nas simulações, levando somente este critério em consideração, pode eventualmente aprovar um projeto que em análise de conforto térmico pode ser deficitário. Índices de conforto adaptativo são mais próximos da realidade, já que os indivíduos podem, e devem procurar situações de maior conforto nas habitações (VECCHI et al., 2014, DEAR; CANDIDO, 2010). Velocidade e direção do vento, irradiação solar, tipo de céu entre outros também são fatores relevantes que desconsiderados pela ABNT NBR 15575:2013 exercem grande influência nos resultados de desempenho e também de conforto térmico (SILVA et al., 2014; CORRADO; MECHRI, 2009; MARQUES; CHVATAL,

2013). Assim como o estudo de rotinas, cargas internas e ventilação natural (SORGATO; MELO; LAMBERTS, 2013).

Outro fato importante que pode ser adotado em simulações e índices adaptativos, é a adoção da temperatura operativa que em situações mais complexas é mais adequada na avaliação de conforto térmico. Há maior impacto de carga térmica devido à radiação em condições de climas tropicais úmidos (PEREIRA; ASSIS, 2010).

4.6 Dia representativo de alta incidência solar para cada sistema construtivo

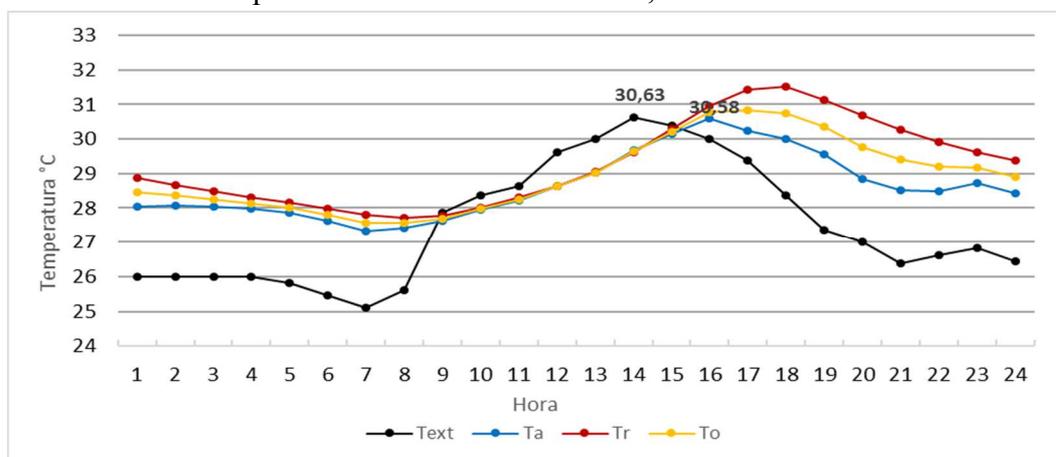
O dia representativo de alta incidência solar escolhido foi o equinócio de primavera do hemisfério sul (21 de setembro). Período que em função da orientação solar os raios solares incidem de forma perpendicular às fachadas oeste de acordo com os dados do arquivo climático. O dia típico de verão não foi adotado devido às suas incertezas de projeto.

O objetivo da avaliação deste dia é analisar a flutuação das temperaturas ao longo do dia e observar a máxima temperatura externa e a máxima temperatura do ar interna para o ambiente simulado (Quarto 01).

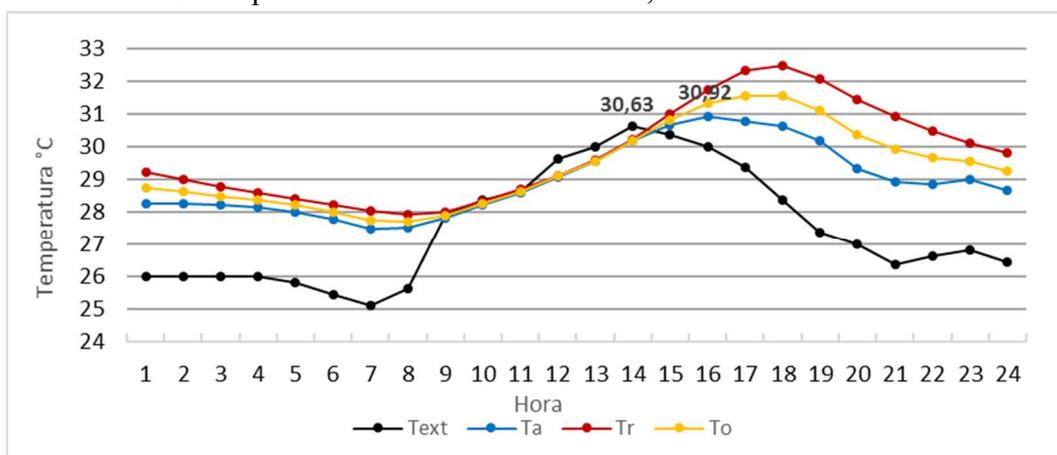
4.6.1 Dia representativo de alta incidência solar: parede de concreto maciço

Os gráficos 31, 32 e 33 mostram a variação de temperatura externa, temperatura do ar interna, temperatura radiante e temperatura operativa para o dia representativo de alta incidência solar obtido na modelagem para paredes de concreto.

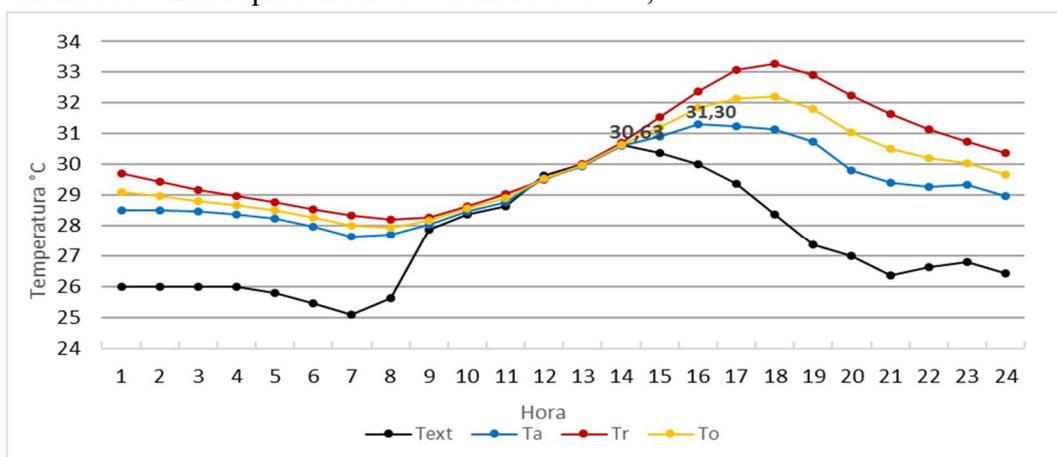
Gráfico 31 - Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,3$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 32 - Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,5$ 

Fonte: Autor (2019).

Gráfico 33 - Dia representativo - Concreto: $\alpha = 0,7$ 

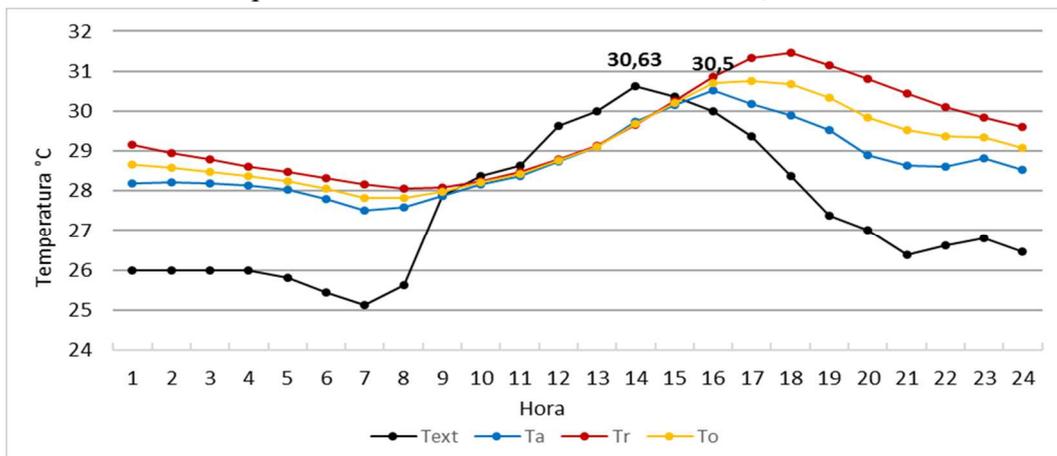
Fonte: Autor (2019).

Para as simulações com as paredes maciças de concreto in loco, apenas com absorvância $\alpha = 0,3$ a temperatura interna máxima do ar foi menor que a temperatura máxima externa. Porém tal diferença foi muito pequena ($0,05^{\circ}\text{C}$). A influência da absorvância é direta nos resultados de desempenho térmico. Mesmo assim as propriedades térmicas, como as maiores transmitâncias (U), desse tipo de sistema lhe confere mais dificuldade de se obter melhor desempenho térmico nos dias mais críticos.

4.6.2 Dia representativo de alta incidência solar: parede de bloco de concreto

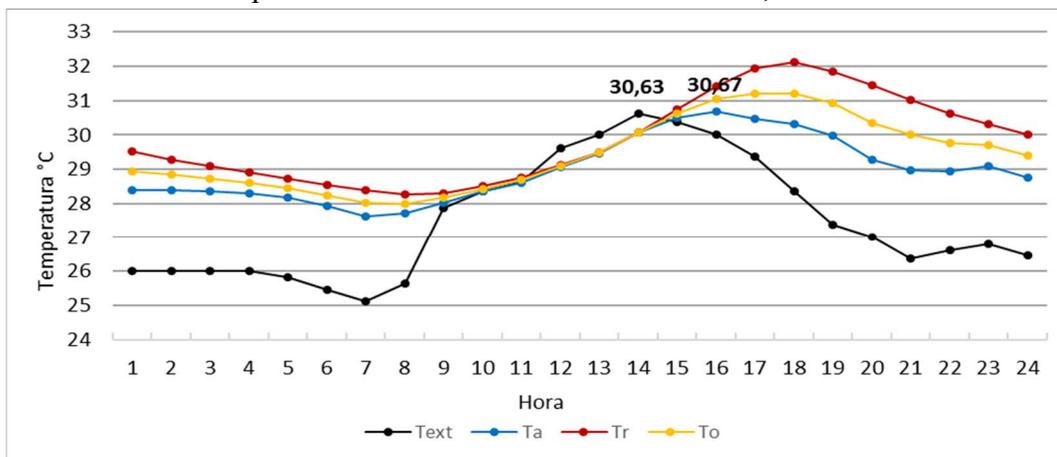
Os gráficos 34, 35 e 36 mostram a variação de temperatura externa, temperatura do ar interna, temperatura radiante e temperatura operativa para o dia representativo de alta incidência solar obtido na modelagem para paredes de bloco de concreto estrutural.

Gráfico 34 - Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,3$

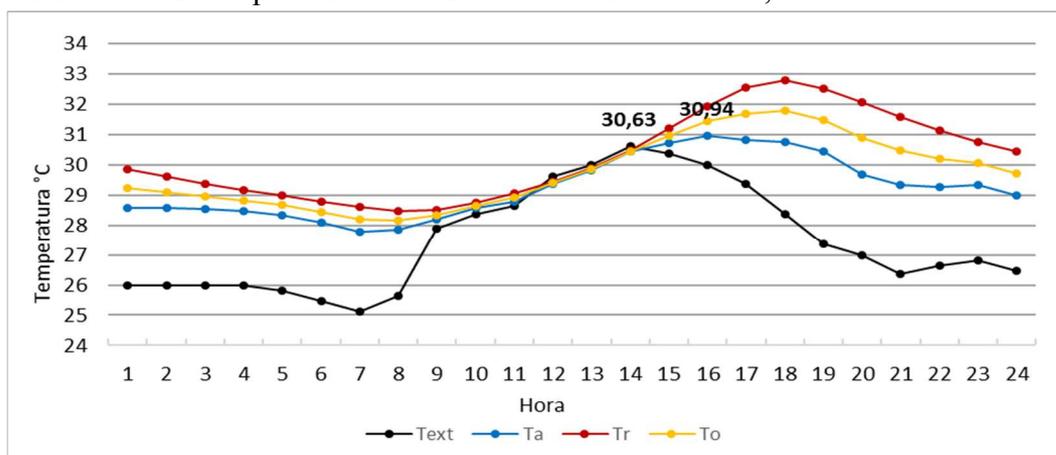


Fonte: Autor (2019).

Gráfico 35 - Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,5$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 36 - Dia representativo - Bloco de concreto: $\alpha = 0,7$ 

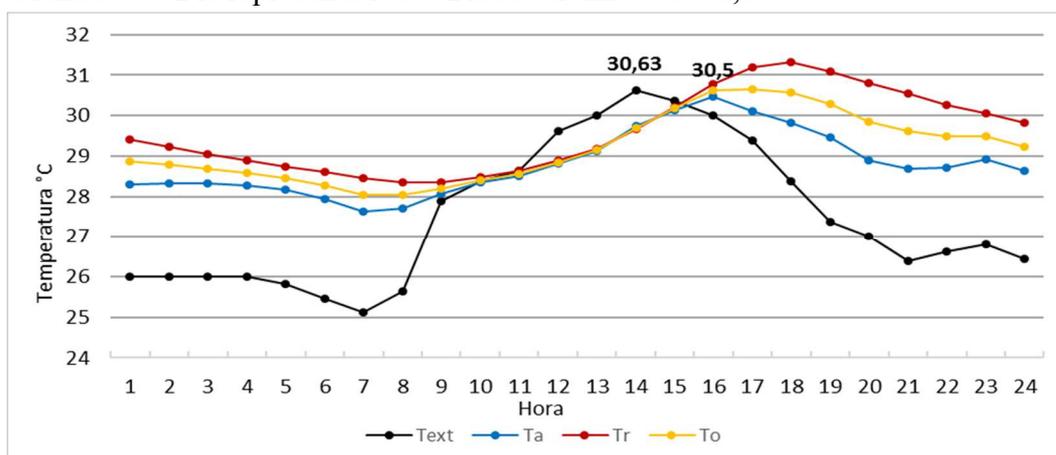
Fonte: Autor (2019).

Para a unidade habitacional com paredes de bloco de concreto vemos que a máxima temperatura interna do ar é menor que a máxima externa para absorvância $\alpha = 0,3$ com uma diferença de $0,13^{\circ}\text{C}$ e com $\alpha = 0,5$ as máximas temperaturas são bem próximas e possuem também pequena diferença ($0,04^{\circ}\text{C}$ de diferença). Com absorvância escura $\alpha = 0,7$ a temperatura interna é maior que a externa $0,31^{\circ}\text{C}$.

Em termos de desempenho e com as cores mais claras a unidade com blocos de concreto possui melhores resultados que as paredes de concreto maciço. Propriedades térmicas dos materiais e suas absorvâncias funcionam como fator direto para estes resultados.

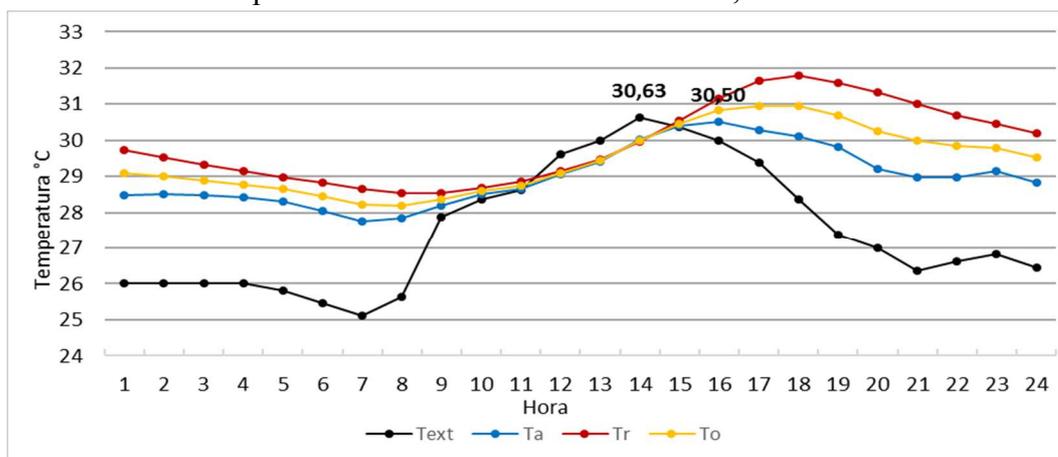
4.6.3 Dia representativo de alta incidência solar: parede de bloco cerâmico

Os gráficos 37, 38 e 39 mostram a variação de temperatura externa, temperatura do ar interna, temperatura radiante e temperatura operativa para o dia representativo de alta incidência solar obtido na modelagem para paredes de bloco estrutural cerâmico.

Gráfico 37 - Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,3$ 

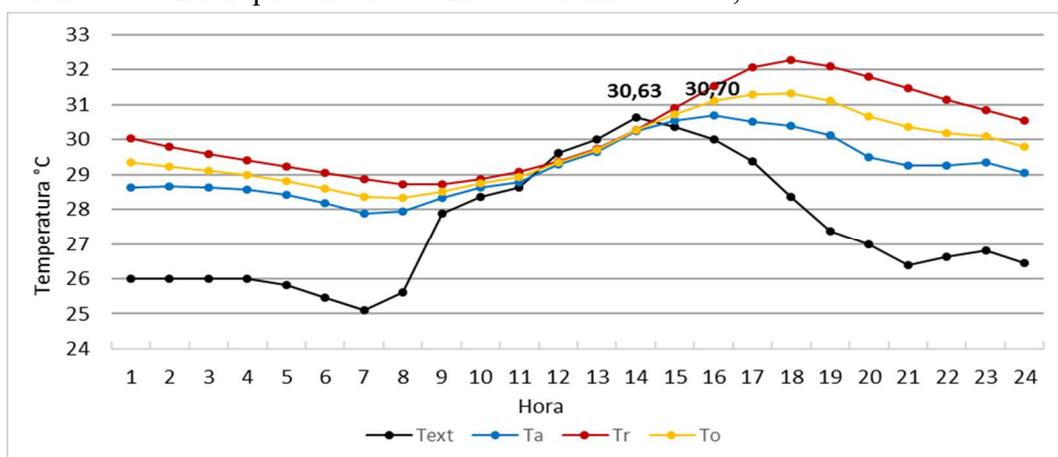
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 38 - Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,5$



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 39 - Dia representativo - Bloco cerâmico: $\alpha = 0,7$



Fonte: Autor (2019).

Como era de se esperar, devido sua menor transmitância térmica, as unidades de blocos estruturais cerâmicos têm os melhores resultados de desempenho. Simulando com $\alpha = 0,7$ (cores mais escuras) a temperatura interna máxima foi superior a máxima externa em apenas $0,07\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5 CONCLUSÕES

O procedimento adotado pela ABNT NBR 15575:2013 para análise de desempenho térmico de vedações verticais externas ainda é considerado bastante simplificado por muitos pesquisadores. A avaliação de desempenho térmico da norma brasileira considera apenas descrições simplificadas dos valores de transmitância e capacidade térmica para paredes, e as análises computacionais do modelo simplificado da norma levam em consideração informações geográficas de algumas cidades brasileiras e os dados climáticos correspondentes aos dias típicos de projeto de verão e inverno. Análises de medições reais são apenas informativas.

Foi observado neste trabalho, baseado no estudo de medição real, que os ambientes internos das unidades com paredes de concreto moldado in loco e paredes de blocos de concreto estrutural possuem, na maior parte do tempo, maiores temperaturas máximas internas do que as temperaturas máximas externas. Neste quesito as unidades habitacionais com paredes de blocos estruturais cerâmicos obtiveram os melhores resultados de desempenho, onde se alcançou dias com temperaturas internas menores que as máximas externas, conforme os resultados apresentados. As propriedades térmicas desse material cerâmico são fatores diretos para se alcançar melhores níveis de desempenho térmico.

Nas análises de amplitudes térmicas das unidades estudadas constatou-se que o apartamento com paredes de concreto possui maior variação da temperatura interna em função da externa, ocasionado por uma menor inércia térmica do sistema de vedação associada à sua pequena espessura, apesar dos valores de transmitância (U) e capacidade térmica (Ct) serem maiores que os outros sistemas de vedação.

Para as simulações, o dia típico de projeto adotado em norma (definição de apenas um dia crítico de simulação) mostra-se frágil em função das incertezas no método, provocadas principalmente por imprecisões e ausência de dados na norma ABNT NBR 15575:2013 para definição do dia de projeto para análise. A norma recomenda que a edificação seja avaliada no dia típico de verão sem cargas internas (ocupação, iluminação e equipamentos). Porém, esta condição está fora da realidade das condições de uso das edificações residenciais.

O procedimento de simulação vigente na NBR 15575-1:2013 não considera fatores e critérios importantes que influenciam no desempenho térmico das edificações residenciais, como cargas térmicas internas e ventilação natural. Este estudo indica a necessidade de aperfeiçoar o atual procedimento de simulação da norma NBR 15575-1:2013 para avaliar as edificações considerando a realidade de uso, como os hábitos e preferências culturais da população das regiões brasileiras.

A modelagem computacional e análise de um índice adaptativo ajustado, parece ser um bom critério para a definição de soluções projetuais que lidam com estratégias climáticas. A simulação anual, considerando ambientes ocupados e ventilados, com a contagem de horas de conforto e desconforto atribui uma análise mais aprofundada de conforto térmico.

A absorvância foi fator direto para melhores resultados de conforto neste trabalho. Projetistas devem analisar em conjunto os tipos de vedações e suas propriedades térmicas juntamente com suas cores de projeto. Cores mais claras produziram os melhores resultados nos 03 (três) sistemas de vedação estudados.

Neste trabalho, na análise adaptativa de conforto térmico, a temperatura operativa foi escolhida para avaliar às condições de conforto, nos quais há grande impacto da carga térmica devido à radiação solar.

Diante do exposto, é muito importante comparar outras metodologias conceituadas internacionalmente que levam em consideração parâmetros e critérios reais de simulações e condições climáticas anuais, nos períodos de verão (no contexto climático quente e úmido), que, em conjunto, levam a um melhor desempenho térmico e satisfação dos usuários, além de minimizar o consumo energético das edificações.

A abordagem numérica adaptativa é uma poderosa ferramenta de avaliação e análise de conforto térmico pois avalia condições reais de uso e proporciona análises mais aprofundadas e ajustadas para seleção dos melhores projetos de engenharia do ponto de vista do conforto térmico.

Como sugestão para trabalhos futuros indica-se:

- Análise informativa de medições para todas as horas anuais (8760) de diferentes sistemas construtivos.
- Análise adaptativa para diferentes velocidades e direções do vento, irradiação solar e tipo de céu.
- Influência de diferentes arquiteturas na análise adaptativa de conforto térmico.

REFERÊNCIAS

AKUTSU, M.; BRITO, A. C.; CHIEPPE, C. P. **O efeito da capacidade térmica e da resistência térmica de paredes no desempenho térmico de habitação na cidade de São Paulo**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, p.1-8, 2012.

ALLUCCI, M. P. **Software Climaticus 4.2.xls**. Disponível em: <<https://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>>. Acesso em: abril, 2019.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE 55/2004: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2004

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE 55/2010: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2012

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE 55/2017: **Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2017

ASSIS, E. S. Método integrado para análise climática em arquitetura aplicado à cidade de Belo Horizonte, MG In: VI ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2001, Campinas. **Anais[...]**. Campinas: ANTAC, 2001. p. 1-8.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-5**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-1**: Desempenho térmico de edificações parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASTE, N.; ANGELOTTI, A.; BUZZETTI, M. The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildgs. **Energy And Buildings**, Milano, v. 41, p.1181-1187, 2009.

BECCALI *et al.* Vernacular and bioclimatic architecture and indoor thermal comfort implications in hot-humid climates: An overview. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Palermo, v. 82, p.1726-1736, 2018.

BRAGER, G. S.; DEAR, R. J. Thermal adaptation in the built environment: a literature review. **Energy And Buildings**, Sydney, Austrália, v. 27, p.83-96, 1998.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2014: Ano base 2013**. Disponível: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2018.

CALVINO, F. *et al.* The control of indoor thermal comfort conditions: introducing a fuzzy adaptive controller. **Energy And Buildings**, Palermo, Italy, v. 36, p.97-102, 2004.

CANDIDO, C.; DEAR, R.; LAMBERTS, R. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment**, Santa Catarina, v. 46, p 379-385, 2011.

CÂNDIDO, C. M. **Indoor air movement acceptability and thermal comfort in hot-humid climates**. 2010. 219 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Department Of Environment And Geography, Macquarie University, Sydney, 2010.

CBIC. **Desempenho de Edificações Habitacionais: Guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013**. Disponível em: <<https://cbic.org.br/>>. Acesso em: 1 jan. 2013.

CEARÁ. **Relatórios Funceme - Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos**. Disponível em: <<http://www.funceme.br/>> . Acesso em: 10 jul. 2019.

CHVATAL, K.M.S. Avaliação do procedimento simplificado da NBR 15575 para determinação do nível de desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.119-134, 2014.

CORRADO, V.; MECHRI, H. E. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. **Journal of Building Physics**, Torino, v. 33, n. 2, p. 125- 156, 2009.

DEAR, R.; BRAGER, G. S. The adaptative model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. **International Journal of Biometeorology**, Australia, v. 45, p.100-108, 2001.

DEAR, R.; CANDIDO, C. An Adaptive Thermal Comfort Policy for a Geographically Dispersed Property Portfolio; Deciding When and Where to AirCondition in a Warm Climate Zone. In: 7TH WINDSOR CONFERENCE: THE CHANGING CONTEXT OF COMFORT IN AN UNPREDICTABLE WORLD, 2010, Windsor. **Proceedings [...]**. Windsor: Network for Comfort and Energy Use in Buildings, 2010. p.1-15.

DOE. **EnergyPlus**. Disponível em: <<https://energyplus.net/>> Acesso em: 10 maio 2019.

FENG, Ya. Thermal design standards for energy efficiency of residential buildings in hot summer/cold winter zones. **Energy And Buildings**, China, v. 36, p.1309-1312, 2004.

FERREIRA, C. C.; SOUZA, H. A. Avaliação da aplicabilidade de índices de conforto adaptativo para o caso brasileiro. In: XII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO

AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2013, Brasília. **Anais[...]**. Brasília: Universidade Federal de Ouro Preto, 2013. p. 1 - 11.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo** — 5. ed. — São Paulo: Studio Nobel, 2001.

FRUCK, R. G.; JUSVICK, F. A. C.; BRIDI, M. E. Estudo comparativo das propriedades térmicas de blocos cerâmicos de vedação. In: VI SEMINÁRIO DE INOVAÇÃO E TECNOLOGIA, 2016, Santa Rosa. **Anais[...]**. Santa Rosa: SALÃO DO CONHECIMENTO, 2016. p. 1 - 6.

GIVONI, B. Confort, climate analysis and building design guidelines. **Energy And Buildings**, Sydney, v. 18, p.11-23, 1992.

HOLMAN, J. P. **Heat transfer**. 10. ed. New York: McGraw-Hill, 2010

HUMPHREYS, M. Field Studies of thermal confort compared and applied. **Building Research Establishment Current Paper**, Watford, p.70-76, 1975.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (ORG.). **Arquivos Climáticos INMET 2016**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016>> . Acesso em: 27 mar. 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal confort. Genève, 1994.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7726**: Ergonomics of thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. 2 ed. Geneve, 1998.

KHODAKARAMI, J.; KNIGHT, I. Required and Current Thermal Conditions for Occupants in Iranian Hospitals. **Hvac&r Research**, [s.l], v. 14, n. 2, p.175-193, 2008.

KOTHE, K. K. *et al.* Comportamento térmico de fechamentos em alvenaria estrutural para a Zona Bioclimática 2 brasileira: Thermal behavior of masonry building fence to brazilian climate zone 2. **Revista Matéria**, Rio Grande do Sul, v. 20, n. 4, p.1030-1047, 2015.

KRUGER, E.; LAROCA, C. Thermal performance evaluation of a low-cost housing prototype made with plywood panels in Southern. **Applied Energy**, [s.l], v. 87, p.661-672, 2009.

KUCHEN, E. *et al.* Prediction of thermal confort index in office buildings in Germany. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p.39-53, 2011.

LAMBERTS, R. *et al.* **Conforto e stress térmico**. Disponível em: http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/ECV4200_apostila%202011.pdf . Acesso em 27 mar. 2019.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. Florianópolis: Luciano Dutra, 2016. 382 slides, color.

LARASATI, D.; MOCHTAR, S. Application of bioclimatic parameter as sustainability approach on multi-story building design in tropical area. **Procedia Environmental Sciences** 17, Bandung, Indonesia, v. 17, p.822-830, 2013

LEITE, R. C. V. **Limites de Aplicação de Ventilação Natural para o Conforto Térmico face à Densificação Urbana em clima Tropical Úmido: Cidade, Vento, Energia.** 2015. 273 f. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015

LOPES, T. P. **Desempenho térmico de habitações de interesse social com diferentes sistemas construtivos em santa catarina.** 2010. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MANZANO-AGUGLIARO, F. *et al.* Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Almeria, v. 49, p.736-755, 2015.

MARQUES, T. H. T.; CHVATAL, K. M. S. A Review of the Brazilian NBR 15575 Standard: Applying the Simulation and Simplified Methods for Evaluating a Social House Thermal Performance. In: SYMPOSIUM ON SIMULATION FOR ARCHITECTURE AND URBAN DESIGN, 2013, Curitiba. **Anais[...]**. Curitiba: Instituto de arquitetura e urbanismo, 2013. p. 1-9.

MOHAMAD, G. *et al.* Thermal behavior of masonry building fence to brazilian climate zone 2. **Revista Matéria**, Santa Maria, p.1030-1047, 2015.

MORENO, A. C. R.; MORAIS, I. S.; SOUZA, R. V. G. Thermal Performance of Social Housing– A Study Based on Brazilian Regulations. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABILITY IN ENERGY AND BUILDINGS, 2016, Turin. **Anais [...]**. Turin: Energy Procedia, 2017, p.111-120.

MORISHITA, C. *et al.* **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (v. 4).** Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

OLESEN, B.W. **Thermal Comfort**, Bruel & Kjaer, Technical Review, No.2, p.3-41, 1982.

OLIVEIRA, R. D. *et al.* Concrete walls thermal performance analysis by Brazilian Standards. In: 6TH INTERNATIONAL BUILDING PHYSICS CONFERENCE, 2015, Belo Horizonte. **Anais[...]**. Belo Horizonte: Energy Procedia, 2015, n. 78, p.213-218.

OLIVEIRA, R. D. *et al.* Thermal Comfort for users according to the Brazilian Housing Buildings Performance Standards. In: 6TH INTERNATIONAL BUILDING PHYSICS CONFERENCE, 2015, Belo Horizonte. **Anais[...]**. Belo Horizonte: Energy Procedia, 2015, n. 78, p.2923-2928.

OLIVEIRA, R. D; SOUZA, R. V. G.; SILVA, R. M. da. Issues to be improved on the Thermal Performance Standards for Sustainable Buildings consolidation: an overview of Brazil. In: 8TH INTERNATIONAL CONFERENCEON SUSTAINABILITY IN ENERGY AND BUILDINGS, 2016, Turin. **Anais[...]**. Turin: Energy Procedia, 2017, n. 111, p.71-80.

ONSET (Estados Unidos). **Onset Products**. 2018. Onset products referenced herein are trademarks or registered trademarks of Onset Computer Corporation. Disponível em: <www.onsetcomp.com>. Acesso em: 14 de maio de 2018.

ORDENES, M. *et al.* **Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1**. Florianópolis: Labeee, 2003. 19 p.

PACHECO, M. T. G. **Ventilação natural e climatização artificial : crítica ao modelo super. isolado para residência de energia zero em Belém e Curitiba**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2013.

PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Relacionamento da temperatura interna e externa em edificações residenciais naturalmente ventiladas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE O CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE O CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3., 2001, São Pedro. **Anais[...]**. São Pedro: ANTAC, 2001.

PAPST, A. L.; LAMBERTS, R. Comparação do desempenho térmico de três ambientes residenciais naturalmente ventilados em Florianópolis, Sul do Brasil. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002, Foz do Iguacu. **Anais [...]**. Foz do Iguacu: ANTAC, 2001.

PARKINSON, T; PARKINSON, A; DEAR, R. Introducing the Samba indoor environmental quality monitoring system. **Living And Learning: Research For A Better Built Environment**, Sydney, p.1139-1148, 2015.

PEREIRA, I. M.; ASSIS, E. S. Avaliação de modelos de índices adaptativos para uso no projeto arquitetônico bioclimático. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p.31-51, 2010.

PROJETEE. **Estratégias Bioclimáticas**. Disponível em: <<http://projeteee.mma.gov.br/estrategia/ventilacao-natural/>> . Acesso em: 27 mar. 2019.

QUERINO, C.A.S., MOURA, M.A.L., R.F.F. LYRA, MARIANO, G.L. Avaliação e comparação de radiação solar global e albedo com ângulo zenital na região Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 21(3a), p. 42 – 49, 2006.

RIZZATTI, E. *et al.* Typology of structural ceramics blocks: influence of the geometry of blocks on the mechanical behavior of masonry. **Matéria**, Florianópolis, p.1-16, 2011.

ROAF, S.; CRICHTON, D.; NICOL, F. Adapting Buildings and cities for climate change: a 21st Century survival guide. **Architectural Press**, Oxford, p.2-40, 2009.

SANTO, A. D.; ALVAREZ, C. E.; NICO-RODRIGUES, E. A. Conforto e desempenho térmico em contradição na NBR 15575. **Cadernos Proarq**, Rio de Janeiro, v. 20, p.115-136, 2013.

SILVA, A. S. *et al.* Incerteza do método de simulação da NBR 15575-1 para a avaliação do desempenho térmico de habitações. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p.103-117, 2014.

SORGATO, M. J. *et al.* **A influência da área de ventilação no desempenho térmico de edificações residenciais.** Disponível em: <www.labeee.ufsc.br/publicacoes/notas-tecnicas> . Acesso em: 12 nov. 2018.

SORGATO, M. J.; MELO, A. P.; LAMBERTS, R. Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575. In: XII ENCONTRO NACIONAL E VIII LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO - ENCAC/ELACAC, 12., 2013, Brasília. **Anais[...]**. Brasília: Conforto & Projeto: Edifícios / Paranoá 12, 2013. p. 13 - 21.

SORGATO, M.J *et al.* 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, 2014

SORGATO, M. J. **A influência do comportamento do usuário no desempenho térmico e energético de edificações residenciais.** 2015. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SOUZA, H. A.; RODRIGUES, L. S. Natural ventilation as a strategy for thermal comfort in buildings. **Escola de Minas**, Ouro Preto MG, v. 65, n. 2, p.1-15, 2012.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design.** – 2nd ed. 1. Architectural design 2. Buildings – Environmental engineering 3. Sustainable architecture, Title 721'.046, 2014.

TAMANINI, C. A. M. **Avaliação de desempenho térmico de três sistemas construtivos de edificações escolares na cidade de Maringá - pr.** 2002. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy Policy**, Nevada, Usa. London, Uk., v. 87, p.524-541, 2015.

TUBELO, R. *et al.* Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building And Environment**, Nottingham Uk, v. 133, p.213-227, 2018.

VECCHI, R. *et al.* Application of the adaptive model proposed by ASHRAE 55 in the Brazilian climate context: raising some issues. In: 8TH WINDSOR CONFERENCE: COUNTING THE COST OF COMFORT IN A CHANGING WORLD, 2014, Cumberland Lodge, London, Uk. **Proceedings [...]**. London: Windsor Conference, 2014. p.1-14.

VERBEKE, S.; AUDENAERT, A. Thermal inertia in buildings: a review of impacts across climate and building use. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Antwerp, Belgium, n. 82, p.2300-2318, 2018.

WALLAUER, M. D. **Utilização do programa energy plus para a simulação do conforto térmico em edificações populares em quatro capitais brasileiras.** 2003. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Promec, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

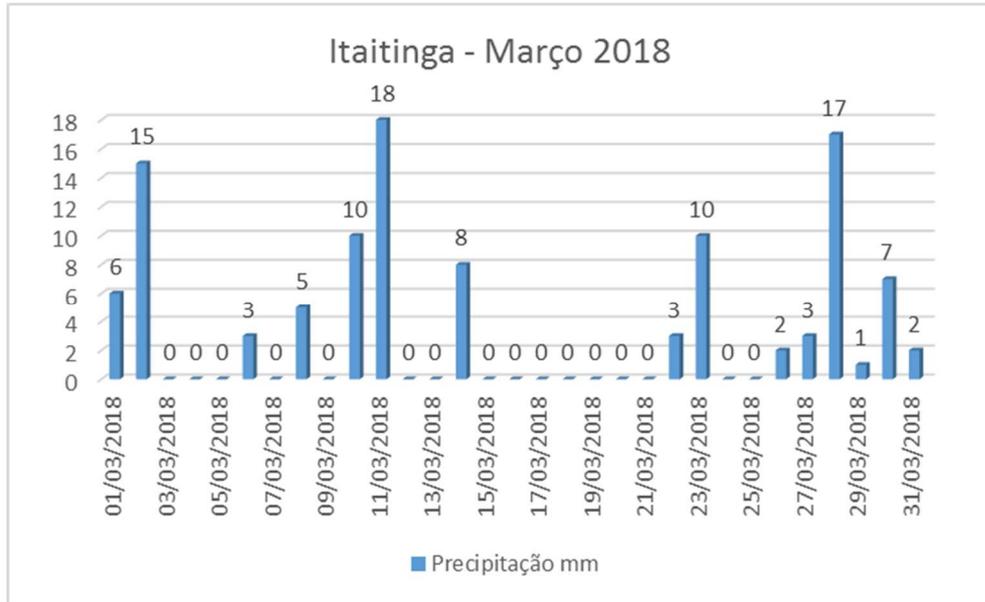
WILDE, P.; FUERTES, A.; ALENCASTRO, J. The relationship between quality defects and the thermal performance of buildings. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, UK, v. 81, p.883-894, 2018.

YANG, L.; YAN, H.; LAM, J. C. Thermal comfort and building energy consumption implications - a review. **Applied Energy**, Hong Kong - China, v. 115, p.164-173, 2014.

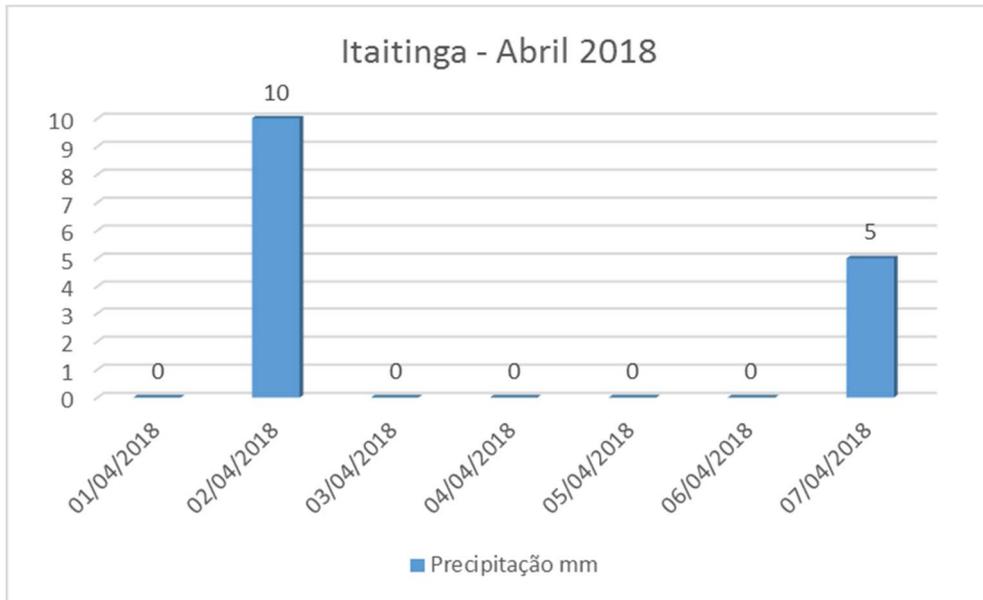
YU, J. *et al.* Evaluation on energy and thermal performance for residential envelopes in hot summer and cold winter zone of China. **Applied Energy**, [s.l], v. 86, n. 10, p.1970-1985, 2009.

ZHANG, H. et al. The CPMV index for evaluation indoor thermal comfort in buildings with solar radiation. **Building And Environment**, China, v. 134, p.1-9, 2018.

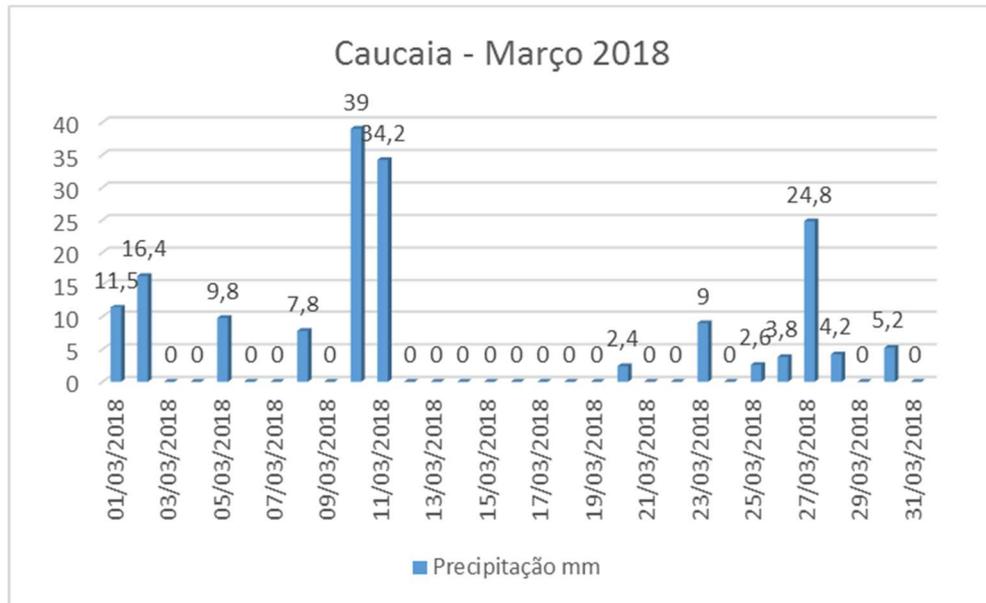
ANEXO A – GRÁFICOS DE CHUVAS NO PERÍODO DAS MEDIÇÕES DE VERÃO



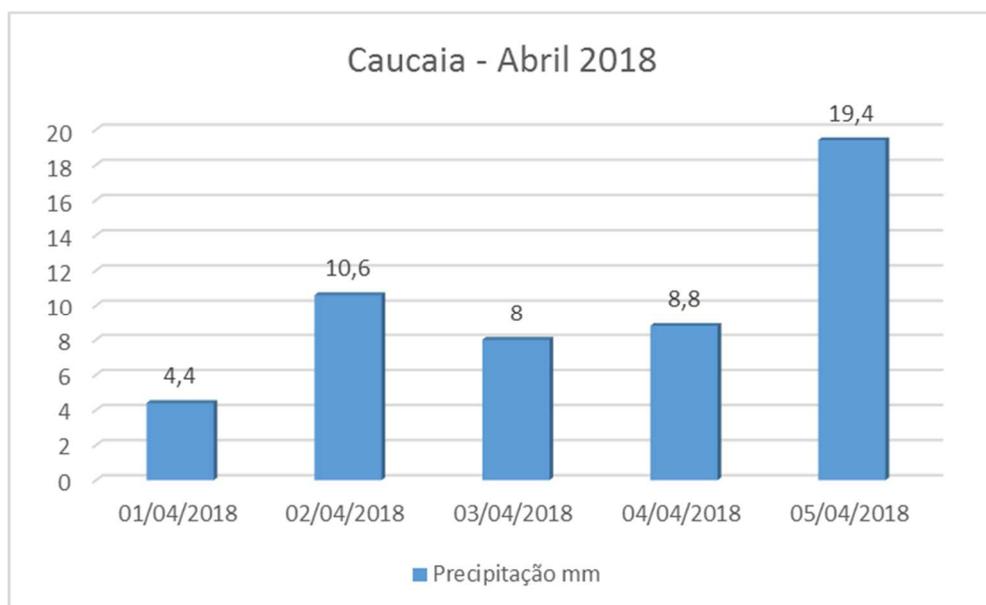
Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2018).



Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2018).

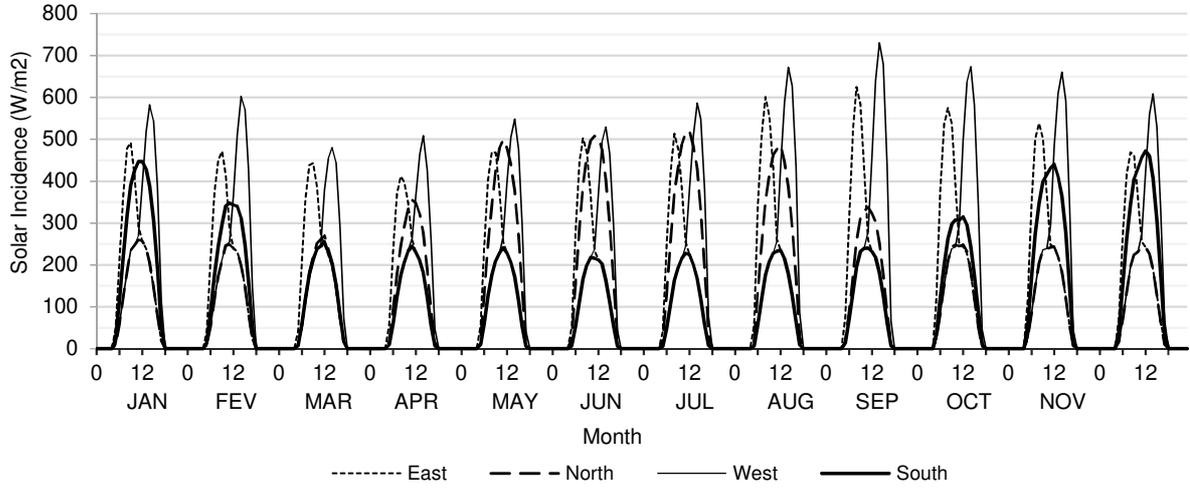


Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2018).



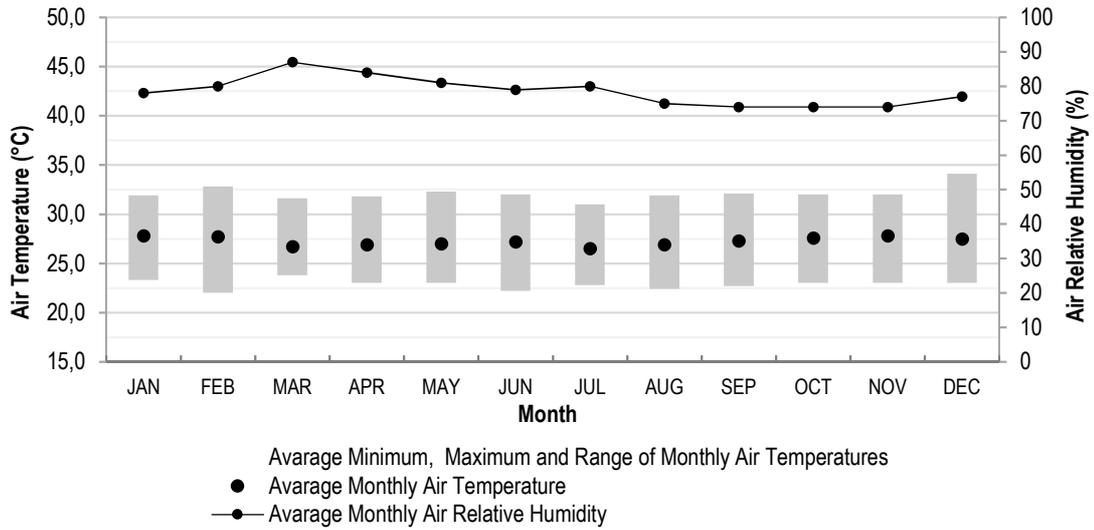
Fonte: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (2018).

ANEXO B – RADIAÇÃO EM FACHADAS E MÉDIAS CLIMÁTICAS DE FORTALEZA –CE



Fonte: COMFEN5 CSV Export 20:59:24 GMT-0300, 2019.

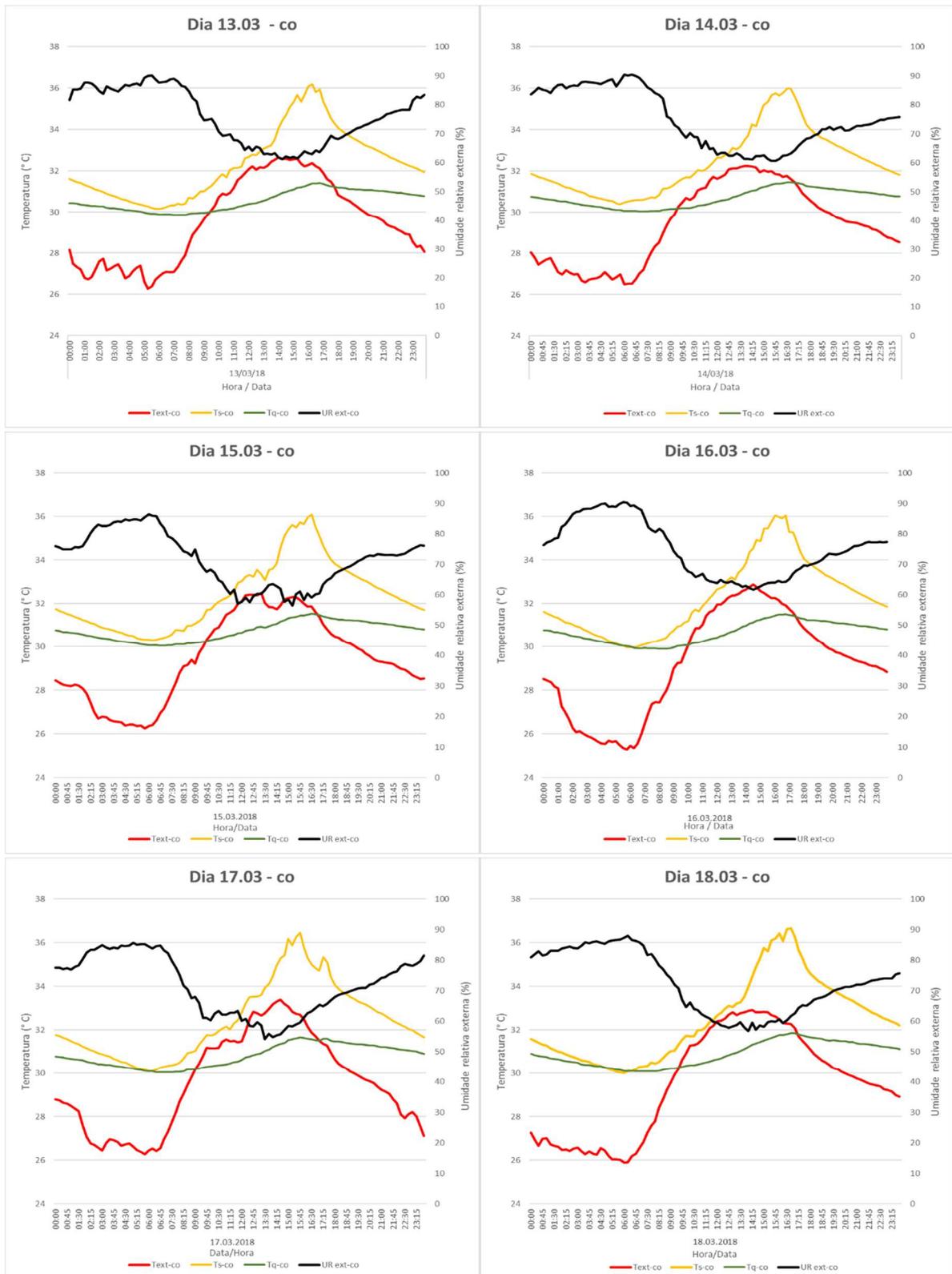
AVERAGE OUTDOOR DRY-BULB TEMPERATURES

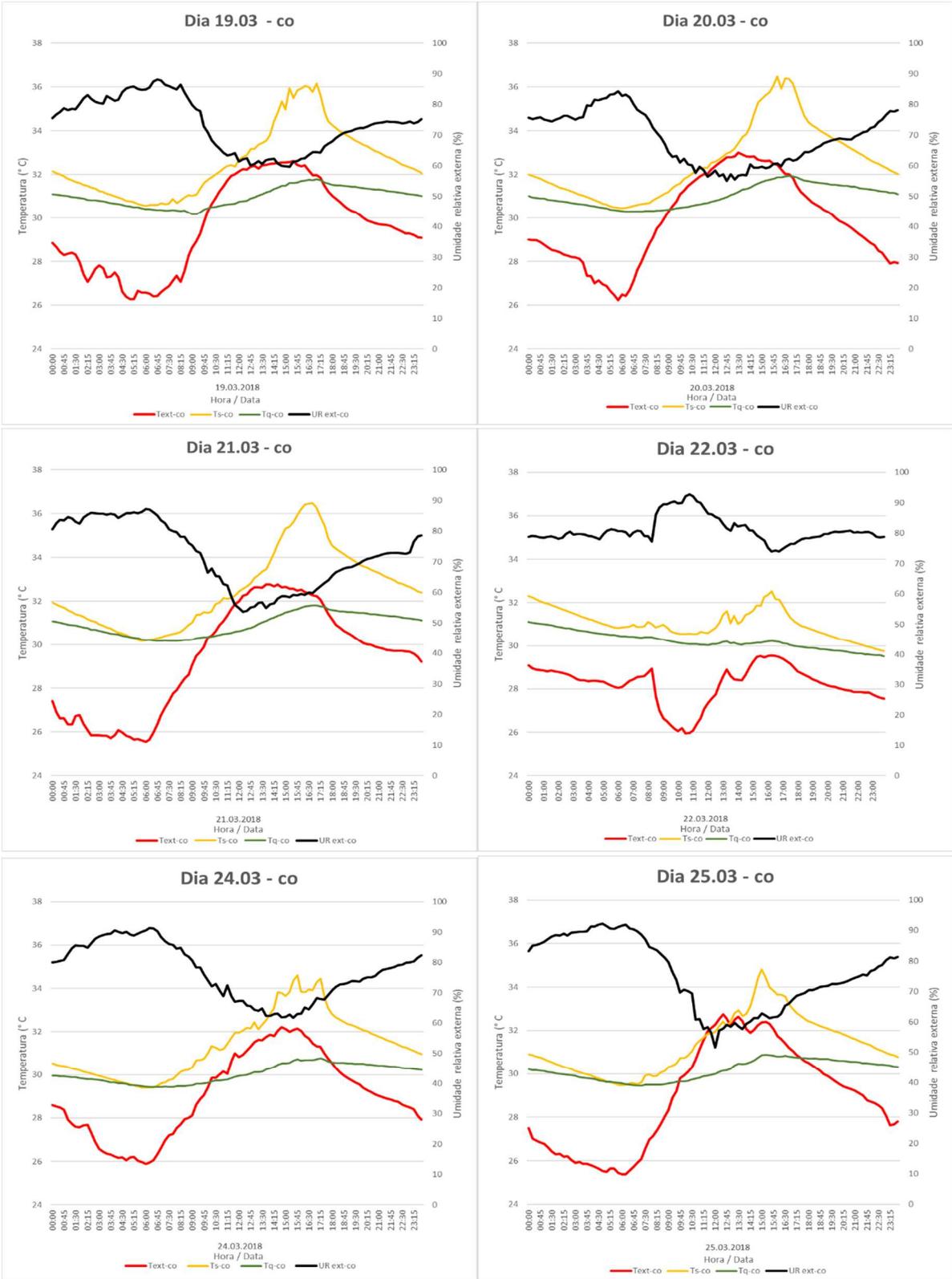


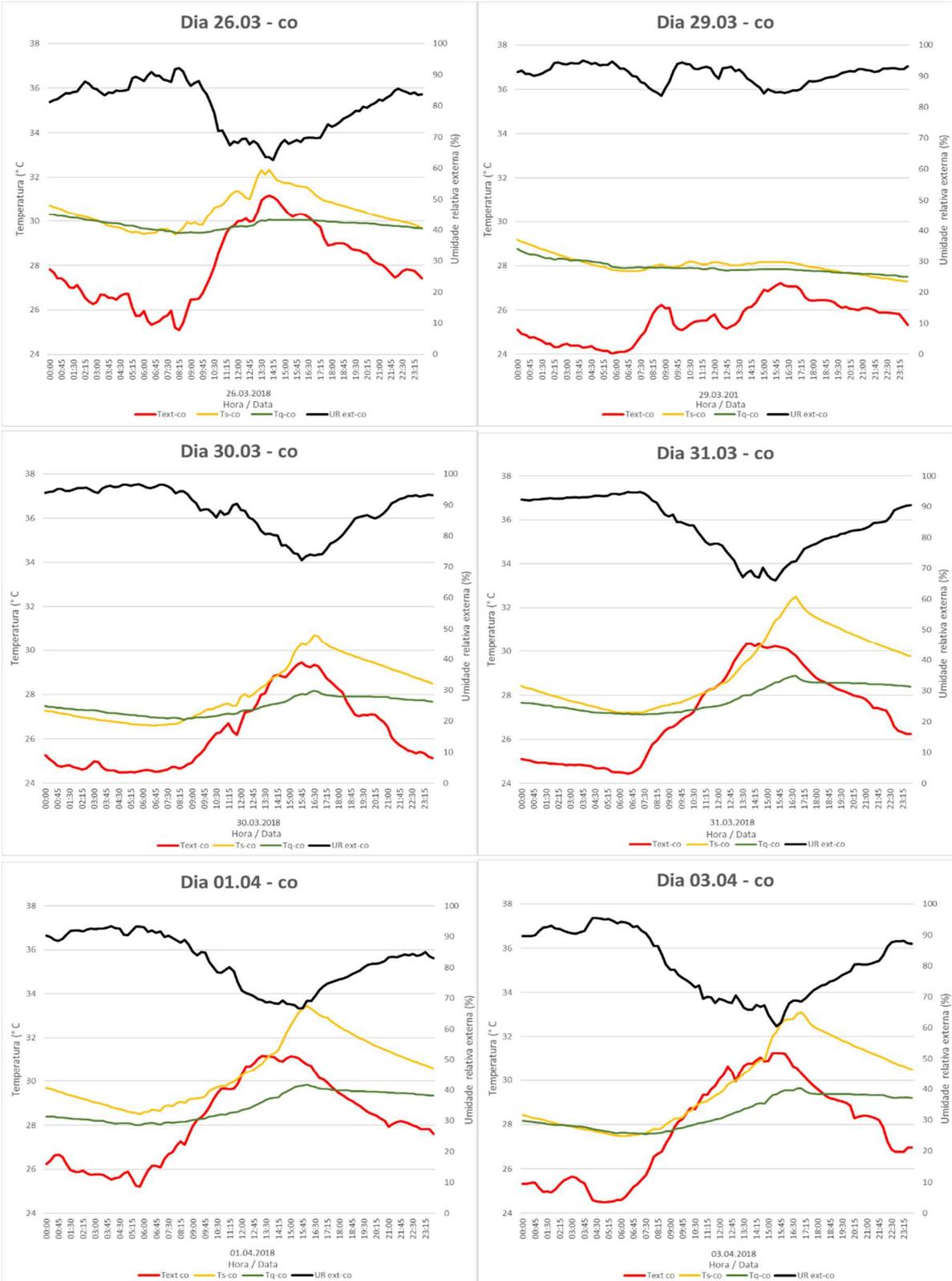
Fonte: COMFEN5 CSV Export 20:59:24 GMT-0300, 2019.

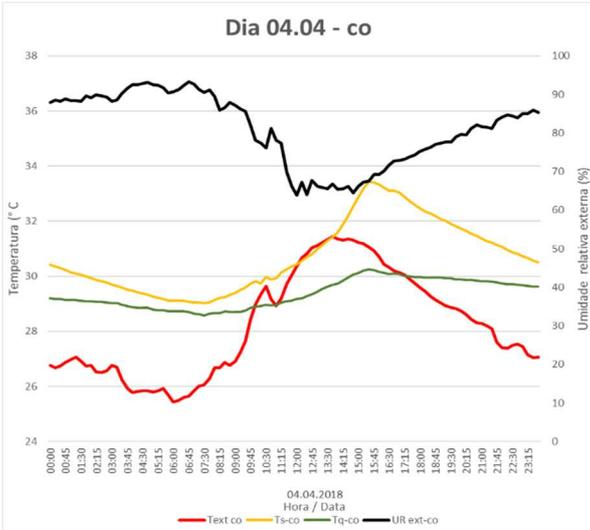
APÊNDICE A – GRÁFICOS DE DIAS DE MEDIÇÕES DE TEMPERATURA E UMIDADE DOS SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Gráficos diários de medição paredes de concreto moldado 'in loco'

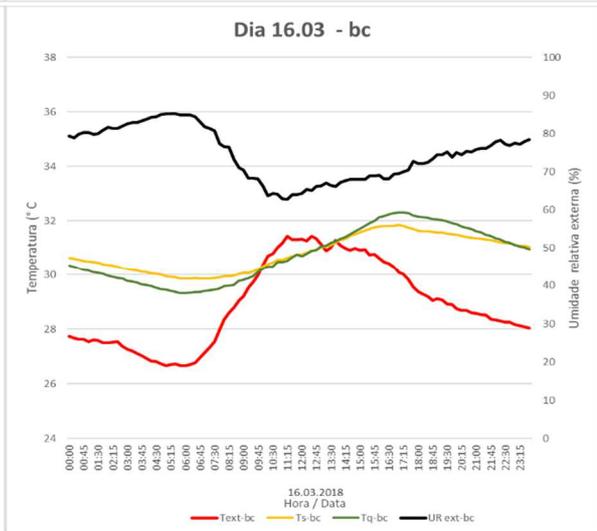
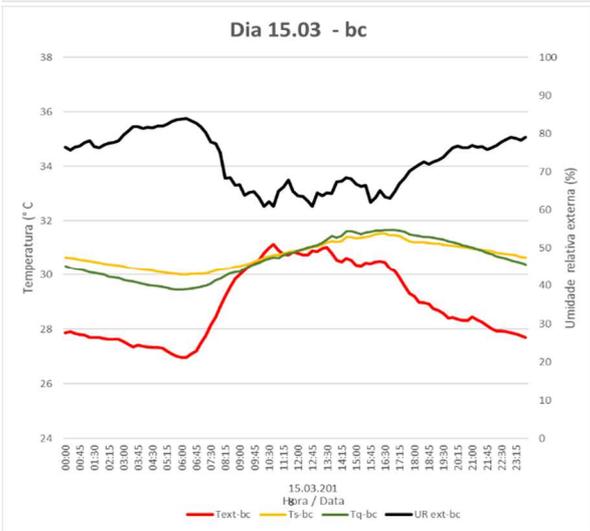
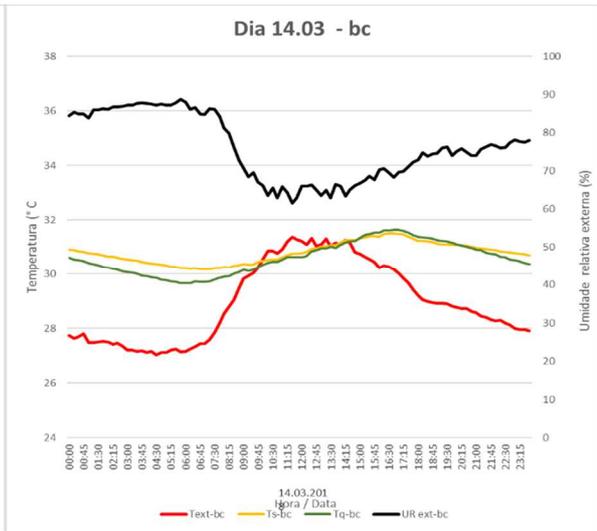
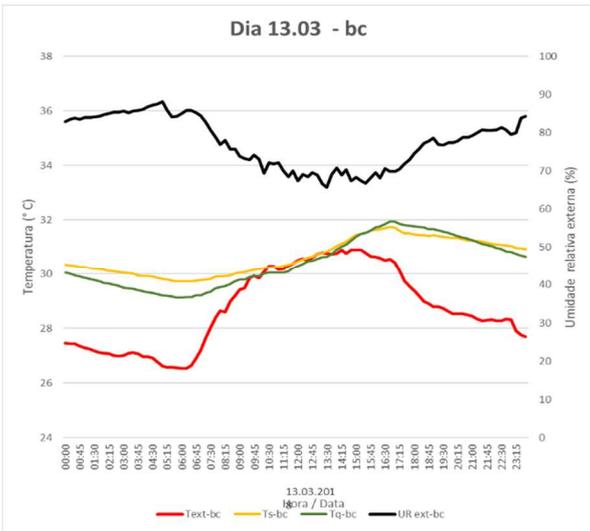


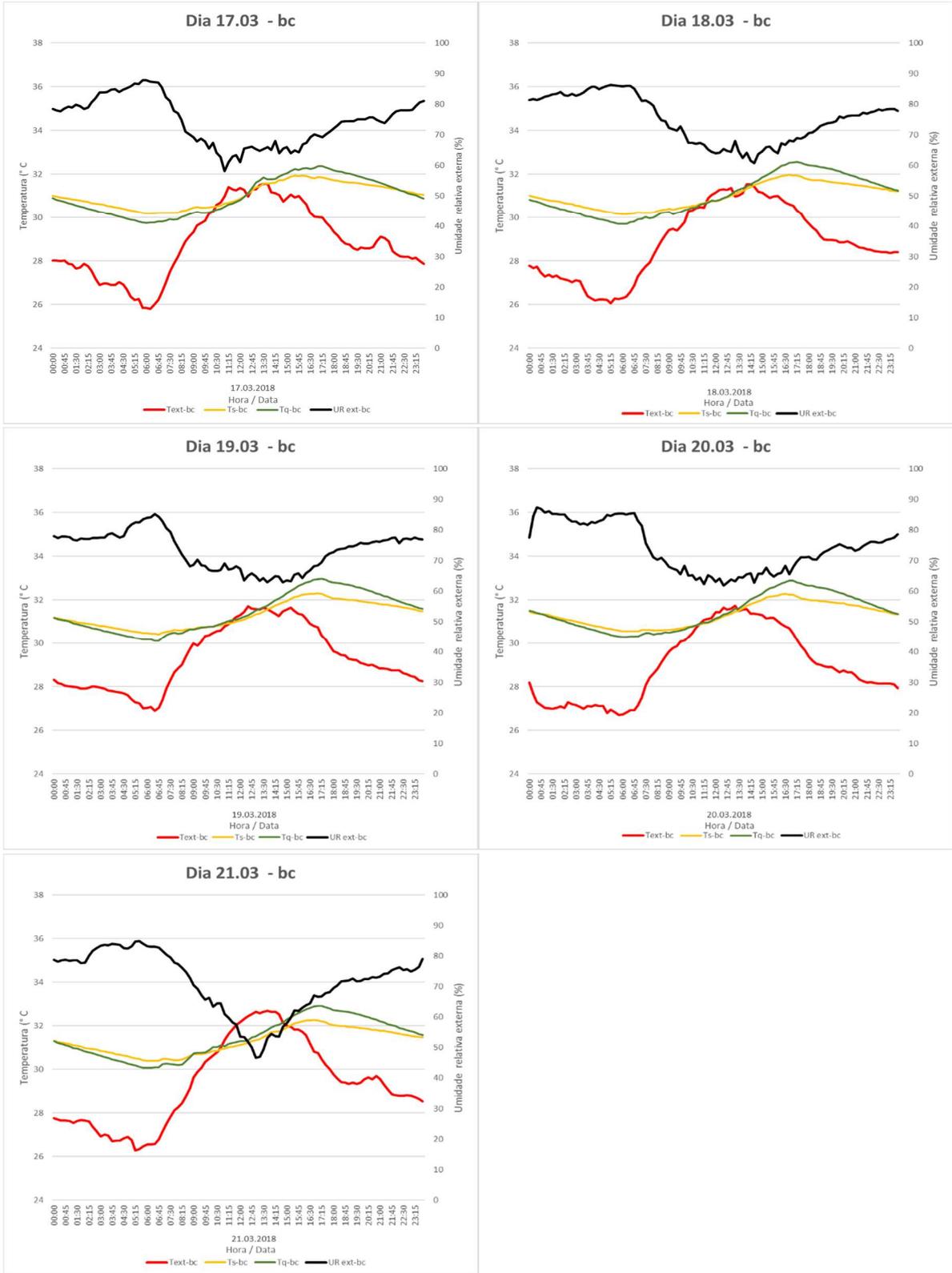






Gráficos diários de medição paredes bloco de concreto





Gráficos diários de medição paredes bloco estrutural cerâmico

