UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DA
ENGENHARIA AMBIENTAL

GRACE TIBÉRIO CARDOSO DE SEIXAS

CLIMATOLOGIA APLICADA À ARQUITETURA: INVESTIGAÇÃO
EXPERIMENTAL SOBRE A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS
INTERNAS EM DUAS CÉLULAS DE TESTE

SÃO CARLOS

Março/ 2015

GRACE TIBÉRIO CARDOSO DE SEIXAS

Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação experimental sobre a
distribuição de temperaturas internas em duas células de teste

Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Ciências da Engenharia
Ambiental da Universidade de São Paulo,
para a obtenção do título de Doutor em
Ciências da Engenharia Ambiental.

Área de Concentração: Ciências da
Engenharia Ambiental

Orientador: Prof. Assoc. Francisco Vecchia

São Carlos
2015

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

S457 Seixas, Grace Tibério Cardoso de
c Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação
experimental sobre a distribuição de temperaturas
internas em duas células de teste / Grace Tibério
Cardoso de Seixas; orientador Francisco Arthur da Silva
Vecchia. São Carlos, 2015.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Ciências da Engenharia Ambiental e Área de Concentração
em Ciências da Engenharia Ambiental -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Climatologia Dinâmica. 2. Episódio
Representativo. 3. Células de Teste. 4. Desempenho
Térmico. 5. Temperaturas Internas. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Arquiteta e Urbanista **GRACE TIBÉRIO CARDOSO DE SEIXAS**

Título da tese: "Climatologia aplicada à arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste".

Data da defesa: 20/03/2015

Comissão Julgadora:

Resultado:

Prof. Associado **Francisco Arthur da Silva Vecchia (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Aprovado

Prof. Dr. **Gabriel Castañeda Nolasco**
(Universidad Autónoma de Chiapas/México)

APROBADO

Profa. Dra. **Rosângela de Oliveira Colabone**
(Academia da Força Aérea/AFA)

Aprovada

Prof. Dr. **Adriano Rogério Bruno Tech**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

Aprovado

Prof. Dr. **Érico Masiero**
(Centro Universitário de Araraquara/UNIARA)

APROVADA

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

*DEDICO ESTE TRABALHO AO MEU MARIDO LEANDRO, AOS MEUS PAIS,
JOEL E RITA, E À MINHA IRMÃ GHEISA, PELO AMOR, CARINHO E APOIO
DURANTE TODOS OS MOMENTOS.*

Agradecimentos

Ao meu orientador e amigo, Prof. Assoc. Francisco Vecchia, pela confiança e dedicação, que com amizade e profissionalismo me ensinou a enfrentar os desafios decorrentes deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

Aos técnicos da Estação Climatológica do CRHEA, Roberto (Betão) e André, pelo importante auxílio no desenvolvimento do trabalho e pela amizade.

Às empresas Cequil (Central Ind. Des. Polímeros Ltda.) e Maccaferri do Brasil Ltda. pela colaboração com esta pesquisa, por meio de doações de materiais importantes para a construção da cobertura verde.

Aos amigos do Núcleo de Climatologia Aplicada ao Meio Ambiente (Cli.M.A.), pela amizade e companheirismo.

Aos funcionários da secretaria e amigos, José Luiz e Nelson, pelas orientações em questões burocráticas.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro e de infraestrutura.

E aos muitos amigos que nunca permitiram que eu desistisse do meu caminho, sempre intercedendo por mim junto a Deus, muito obrigada.

“As teses de matemática não são certas quando relacionadas com a realidade, e, enquanto certas, não se relacionam com a realidade.”

— ALBERT EINSTEIN, físico teórico

RESUMO

SEIXAS, G. T. C. *Climatologia aplicada à Arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste*. 2015. 126p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

Este trabalho de caráter investigativo analisou a distribuição espacial de temperaturas superficiais internas (TSI) e temperatura interna do ar ou de bulbo seco (TBS), em duas células de teste distintas, para dois dias típicos experimentais, um sob a influência da massa tropical, e outro sob o domínio da massa polar atlântica. O objetivo desta pesquisa é fornecer diretrizes para coleta de dados experimentais de temperatura, visto que não existe uma norma adequada que oriente este procedimento metodológico em edificações. Esta investigação foi realizada a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, como forma de conhecer a influência das flutuações do tempo meteorológico (episódios climáticos), sobre os valores das temperaturas internas das duas edificações experimentais. As séries de dados de temperaturas de bulbo seco e superficiais internas foram coletadas em uma células de teste com cobertura verde e outra com telhado cerâmico convencional, por meio de termopares instalados em locais pré-determinados. Os dados de radiação solar global e das principais variáveis climáticas foram registrados pela estação meteorológica automática do Centro de Ciências da Engenharia Aplicadas ao Meio Ambiente (CCEAMA), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Os resultados foram analisados a partir da elaboração de gráficos e tabelas, com auxílio das cartas sinóticas e imagens de satélite, para identificação do episódio representativo e escolha dos dois dias típicos experimentais. Concluiu-se que, em cada célula de teste, a distribuição das temperaturas superficiais internas é praticamente uniforme, mas em relação à temperatura de bulbo seco existe um pequeno gradiente vertical de temperatura na célula convencional. Neste sentido, as temperaturas superficiais podem ser coletadas de qualquer ponto, desde que a superfície seja uniforme. Para as coletas de temperaturas de bulbo seco é recomendado que sejam realizadas em local equidistante de todas as superfícies, mas a altura para posicionamento dos sensores poderá variar de acordo com cada estudo. Portanto, este trabalho contribuirá de maneira significativa para futuros estudos na área da conforto humano e adequação ambiental de edificações.

Palavras- chave: Climatologia Dinâmica, Episódio Representativo, Células de Teste, Desempenho Térmico, Temperaturas Internas.

ABSTRACT

SEIXAS, G. T. C. *Climatology applied to Architecture: an experimental investigation about internal temperatures distribution at two test cells*. 2015. 126p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

This investigative work analyzed the spatial distribution of internal surface temperature (IST) and internal air temperature or dry bulb (TBS), in two different test cells, for two typical experimental days, one under the influence of tropical mass and another one dominated by the polar Atlantic mass. The main goal of this research is to provide guidelines to collect temperature data experimentally, since there is not an appropriate standard to guide this methodological procedure in buildings. This research was based on the spatial and temporal approaches of dynamic climatology to know the influence of weather fluctuations (climatic episodes) on internal temperatures of values. The data series of dry bulb temperature and internal surface temperatures were measured in a test cell with green roof and the other with conventional ceramic roof by thermocouples installed at predetermined locations. The data of solar radiation and the main climatic variables were recorded by the automatic weather station at the Center of Science Engineering Applied to the Environment (CCEAMA), School of Engineering of São Carlos (EESC-USP). The results were analyzed by means of charts and tables, and verified by satellite imagery and synoptic maps for the identification of the representative episode and choice of two typical experimental days. The results led to the conclusion that the distribution of the internal surface temperature is almost uniform in the two test cells, but in relation to the dry bulb temperature there is a small vertical temperature gradient in the conventional cell. In this way, the surface temperature can be collected at any point, provided that the surface is uniform. For the measurement of dry bulb temperature is recommended to be performed in place equidistant from all surfaces, but the height for positioning of sensors may vary according to each study. Therefore, this work will contribute significantly to future studies in the area of human comfort and environmental suitability of buildings.

Keywords: Dynamic Climatology. Representative Episode. Test Cells. Thermal Performance. Internal Temperatures.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Mapa do zoneamento bioclimático brasileiro. Fonte: ABNT NBR 15220-3, 2005.....	32
Figura 2 – Desenho didático representativo do avanço da frente fria sobre determinado local. Fonte: STEINKE, 2012 (p.126).	36
Figura 3 – Carta Bioclimática com indicação da Zona de Conforto. Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003 (p.34).	39
Figura 4 – Dissipação de calor e umidade. Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003 (p.32).	40
Figura 5 – Sequência para inter-relação de variáveis. Fonte: OLGYAY, V. 1998 (p. 11).....	41
Figura 6 – Representação esquemática dos fluxos envolvidos no balanço de energia. Fonte: Adaptado de OKE, T. 1987 (p. 253).....	42
Figura 7 – Posições aparentes do sol para os solstícios (verão e inverno) e os equinócios, no plano do meridiano (Hemisfério Sul). Fonte: Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003 (p.227).	43
Figura 8 - Imagem de satélite: Estação climatológica e canteiro experimental com as células de teste - CCEAMA-EESC-USP. Fonte: Google Maps (acesso em 03/12/2013).	63
Figura 9 - Levantamento do Canteiro experimental - localização das células de teste (situação sem escala) - CCEAMA-EESC-USP. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	64
Figura 10 - Célula de teste com cobertura verde. Fonte: Arquivo pessoal da autora.	64
Figura 11 - Célula de teste com telha cerâmica. Fonte: Arquivo pessoal da autora.	65
Figura 12 - Aberturas no ático da célula convencional. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	66
Figura 13 - Desenho esquemático de uma cobertura verde (adaptado para o português). Fonte: Cardoso, G. T.; Vecchia, F. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. Journal of Construction Engineering, v.1, n.1, p.1-7, jan. 2013.....	66
Figura 14 - Retirada das telhas e do madeiramento existentes. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	68
Figura 15 - Célula de teste no início da reforma. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	68

Figura 16 - Colocação de tijolos-Fachada Leste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	69
Figura 17 - Montagem da nova estrutura. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	69
Figura 18 - Nova estrutura concretada. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	70
Figura 19 - Colocação da terra por máquina. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	70
Figura 20 - Conformação do substrato para receber a vegetação. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	71
Figura 21 - Irrigação da vegetação. Fonte: Arquivo pessoal da autora.	71
Figura 22 - Representação esquemática do funcionamento do termopar. Fonte: ANTUNES, 1966.....	72
Figura 23 - Planta baixa esquemática das células de teste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	73
Figura 24 - Corte esquemático da célula com cobertura verde - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	74
Figura 25 - Corte esquemático da célula com telhas cerâmicas e laje - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	75
Figura 26 - Interior da célula de teste com telhas cerâmicas - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e alguns sensores de temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	76
Figura 27 - Corte esquemático da célula com cobertura verde - Sensores de temperatura superficial interna (TSI) para parede Leste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	77
Figura 28 - Esquema da Planta Interna de Cobertura das células- Sensores de temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	78
Figura 29 - Instalação de sensor de temperatura superficial interna (TSI) com pasta térmica (indicado pelo círculo vermelho). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	79
Figura 30 – Análise rítmica do período de 27/02 à 24/03/2013 com algumas variáveis e indicação das etapas da atuação da massa Polar Atlântica sobre a região. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	82

Figura 31 – Gráficos para temperatura de bulbo seco para célula com cobertura verde - Dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	85
Figura 32 - Diferenças entre temperaturas máximas registradas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com cobertura verde - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	86
Figura 33 - Diferenças entre temperaturas mínimas registradas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com cobertura verde - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	87
Figura 34 – Gráficos para temperatura de bulbo seco para célula com telhado cerâmico - Dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	88
Figura 35 - Diferenças entre temperaturas máximas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com telhado cerâmico - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.	89
Figura 36 - Diferenças entre temperaturas máximas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com telhado cerâmico - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.	90
Figura 37 – Gráficos para temperaturas superficiais internas (TSI) do teto para cobertura verde (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	92
Figura 38 – Planta interna do teto com as temperaturas máximas e mínimas dos sensores de TSI para a cobertura verde (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora. .	93
Figura 39 – Gráficos para temperaturas superficiais internas (TSI) do teto para célula de teste convencional (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	94
Figura 40 – Planta interna do teto com as temperaturas máximas e mínimas dos sensores de TSI para a telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	95
Figura 41 – Gráficos para comparações entre as temperaturas superficiais (teto, piso e paredes) e de bulbo seco a 1,70 m de altura da cobertura verde, para os dias 04/03/2013(Dia típico experimental de calor) e 19/03/2013 (Dia típico experimental de domínio de massa polar Atlântica). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	97
Figura 42 - Perspectiva da célula com cobertura verde e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	98

Figura 43 - Perspectiva da célula com cobertura verde e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de domínio da mPa (19/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	99
Figura 44 – Gráficos para comparações entre as temperaturas superficiais (teto, piso e paredes) e de bulbo seco a 1,70 m de altura da célula convencional, para os dias 04/03/2013(Dia típico experimental de calor) e 19/03/2013 (Dia típico experimental de domínio de massa polar Atlântica). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	100
Figura 45 - Perspectiva da célula com telhado cerâmico e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	102
Figura 46 - Perspectiva da célula com telhado cerâmico e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de domínio da mPa (19/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	103
Figura 47 - Gráfico das temperaturas de bulbo seco registrados pelos sensores TBS 03 (com <i>cooler</i>) e TBS 31 (sem <i>cooler</i>) - entre os dia 08 e 12/11/2012. Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	113
Figura 48 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede sul e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	116
Figura 49 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede oeste e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	117
Figura 50 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede norte e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	119
Figura 51 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede leste e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	120
Figura 52 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Sul) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.	121
Figura 53 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Oeste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.....	123

Figura 54 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Norte) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora..... 124

Figura 55 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Leste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora..... 125

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Alturas recomendadas pelo ISO 7726 (1998) para medições em ambientes internos. Fonte: Adaptado de Barbosa; Weiller; Lamberts (2007)	50
Tabela 2 – Valores de temperaturas de bulbo seco para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários).....	85
Tabela 3 – Valores de temperaturas de bulbo seco para célula com telhado cerâmico e ambiente externo (respectivos horários)	88
Tabela 4– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para cobertura verde e ambiente externo – sensores mais internos (respectivos horários)	92
Tabela 5– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para cobertura verde e ambiente externo – sensores próximos às paredes (respectivos horários)	92
Tabela 6– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para célula de teste convencional e ambiente externo – sensores mais internos (respectivos horários)	94
Tabela 7– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para célula de teste convencional e ambiente externo – sensores próximos às paredes (respectivos horários)	95
Tabela 8– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários) –Dia típico experimental de calor (04-03-2013)	97
Tabela 9– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de domínio da massa polar atlântica (19-03-2013)	98
Tabela 10– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para célula convencional e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de calor (04-03-2013).....	101
Tabela 11– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para célula convencional e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de domínio da massa polar atlântica (19-03-2013).....	101
Tabela 12 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Sul das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)	116

Tabela 13 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Oeste das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)	118
Tabela 14 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Norte das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)	119
Tabela 15 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Leste das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)	120
Tabela 16 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Sul) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários.....	122
Tabela 17 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Oeste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários.....	123
Tabela 18 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Norte) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários.....	124
Tabela 19 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Leste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários.....	126

Lista de Siglas e Abreviaturas

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANSI - *American National Standards Institute*

ASHRAE - *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*

AWG - *American Wire Gauge*

COHAB - Companhia Habitacional

COMFIE - *Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Expert*

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

f.e.m - Força Eletromotriz

GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ISO - *International Organization for Standardization*

mEc - Massa Equatorial Continental

mPa - Massa Polar Atlântica

mTa - Massa Tropical Atlântica

TBS - Temperatura de Bulbo Seco

TMY – *Typical Meteorological Year*

TRY – *Typical Reference Year*

TSI - Temperatura Superficial Interna

WMO - World Meteorological Organization

Lista de Símbolos

Q^* - Radiação Solar Líquida incidente sobre a edificação;

Q_F - Calor total liberado pelo corpo humano;

Q_H - Troca de calor sensível com o ambiente externo;

Q_E - Troca de calor latente com o ambiente externo;

Q_G - Calor de condução entre a edificação e o solo;

ΔQ_S - Valor líquido total das trocas de energia armazenada pelos elementos construtivos da edificação e o volume de ar interno.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	31
1.1. A climatologia dinâmica aplicada ao ambiente construído	38
2. JUSTIFICATIVA	49
3. HIPÓTESE E OBJETIVOS	59
4. METODOLOGIA	61
5.1. Desenvolvimento da pesquisa	62
5.1.1. Localização e caracterização das células de teste e estação automática.....	62
5.1.2. Etapas da reforma da célula de teste com cobertura verde.....	67
5.1.3 Descrição dos termopares e da estação automática	71
5.1.4. Instalação dos sensores de temperatura	73
5.1.5. Análise climática da série de dados	79
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	81
6.1. Análise do período coletado	81
6.2. Análises dos dados para cobertura verde e telhado cerâmico convencional	84
6.2.1. Temperaturas de Bulbo Seco (TBS).....	84
6.2.2. Temperaturas Superficiais Internas (TSI) - Sistemas de cobertura	91
6.3. Comparações entre os dias típicos experimentais - Verificação da influência da radiação solar global	96
7. CONCLUSÃO	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	107
APÊNDICE A	113
APÊNDICE B	115

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho de investigação é parte de um processo contínuo de estudos multidisciplinares, pois o conteúdo proposto e desenvolvido, bem como os resultados apresentados, abordam questões importantes para três campos do conhecimento científico, a Arquitetura, a Engenharia, e a Geografia, mas que não se encerram com esta pesquisa.

O ponto de partida desta investigação foi a necessidade de se estabelecer parâmetros mais precisos, que pudessem guiar de maneira mais adequada estudos experimentais envolvendo procedimentos metodológicos de aquisição de dados de temperatura em ambientes internos. É necessário levar em consideração a realidade climática existente, já que inúmeros estudos conduzidos experimentalmente não tratam esta questão com a devida importância. Um dos motivos está na indefinição das normas brasileiras quanto a estes procedimentos e também à facilidade da elaboração de simulações computacionais, por meio de softwares específicos, como principal ferramenta em estudos de adequação ao conforto humano.

A atual norma de desempenho para edificações habitacionais, ABNT NBR 15575-1 (2013), prevê dois procedimentos para determinação do desempenho térmico de sistemas de vedações e coberturas: o procedimento 1, simplificado e normativo, que avalia o desempenho termoenergético da edificação por meio de simulação computacional (recomenda-se o uso do software *EnergyPlus*), e o procedimento 2, que deve ser feito em edificações ou protótipos em escala real, por meio de medições de temperatura de bulbo seco no centro de dormitórios e salas, a 1,20m do piso. Este procedimento é apenas informativo e para efeito de avaliação é considerado um dia típico de projeto, de verão ou inverno, de acordo com a temperatura do ar externo. Para os dois procedimentos a norma estabelece o uso das informações de algumas cidades brasileiras, como a localização geográfica e os dados climáticos, de acordo com a Zona Bioclimática do país (ABNT NBR 15220-3, 2005). Caso o projeto seja para alguma cidade que não tenha dados climáticos disponíveis, a ABNT NBR 15575-1 (2013) recomenda a utilização dos dados de uma cidade próxima com características climáticas semelhantes, e que esteja na mesma zona bioclimática (Fig. 1).

A falta de maior detalhamento dos requisitos e a simplificação exagerada da utilização dos dados climáticos nas análises de desempenho térmico, evidencia a limitação das normas brasileiras na adequação dos ambientes construídos às condições

reais do clima. A prova disto é que as normas não tomam como base para as análises a radiação solar, mas sim a temperatura externa do ar, ou seja, desconhecimento da gênese de todo o processo que desencadeia as flutuações do tempo meteorológico.

Figura 1 - Mapa do zoneamento bioclimático brasileiro. Fonte: ABNT NBR 15220-3, 2005

Esta característica presente nas normas ABNT mostra claramente que a abordagem climática utilizada na maioria dos estudos sobre desempenho e conforto térmicos é a Climatologia Clássica ou Estatística, que simplifica ao máximo a utilização dos valores das variáveis climáticas, e trabalha com uma "condição média" da atmosfera, ou seja, delimita bem o caráter do clima local a partir da combinação de alguns elementos meteorológicos, de acordo com as necessidades de cada estudo, para atender a objetivos específicos e particulares. Esta perspectiva está alinhada à definição de Julius Hann (PÉDELABORDE, 1970), um dos primeiros pesquisadores a definir o clima, que o considera como o conjunto dos fenômenos atmosféricos em seus valores "médios" em determinado local. Esta é a ideia central preconizada pela climatologia clássica, também chamada de separatista, cuja análise representa uma abstração desconectada da realidade, visto que os elementos do clima interagem entre si, no tempo e no espaço. A abordagem clássica do clima é, portanto, artificial, genérica, uma vez que adota um cenário abstrato das condições climáticas, isto é, destituído de realidade, já que não leva em consideração

o ritmo habitual dos tipos de tempo meteorológico (SORRE, 1951). No entanto, as trocas térmicas que ocorrem entre os ambientes internos e externos da edificação, não são estáticas e permanentes; acontecem de maneira intermitente, ou seja, em regime termodinâmico. E é de forma a estabelecer um método mais adequado de avaliação de desempenho e conforto térmicos, de acordo com esta realidade térmica, que outra abordagem climática, a Climatologia Dinâmica, procura identificar uma interpretação mais apropriada do clima, de maneira a alinhá-la às necessidades da Arquitetura. A base teórica presente na abordagem dinâmica do clima se aplica principalmente à construção, quando os objetivos de estudo são as análises de comportamento e desempenho térmicos, e à avaliação do ambiente construído para estudo sobre o conforto térmico.

Um dos primeiros estudos sobre o clima, proposto por Wilhelm Köppen em 1906, caracterizou-o como fator da dimensão geográfica (MONTEIRO, 1991). Nesta classificação, com origem na fitossociologia e na ecologia, considerou-se a vegetação predominante como uma manifestação das características do solo e do clima da região, permitindo reunir várias regiões do mundo através de semelhanças entre os tipos de vegetação. Assim, as fronteiras entre regiões climáticas foram selecionadas para corresponder, tanto quanto possível, às áreas de predominância de cada tipo de vegetação, razão pela qual a distribuição global dos tipos climáticos e a distribuição dos biomas apresentam elevada correlação. Na determinação dos tipos climáticos de Köppen foram considerados a sazonalidade e os valores médios anuais e mensais da temperatura do ar e da precipitação, sendo conhecida como classificação climática de Köppen-Geiger. A partir dessa classificação, outras surgiram procurando compreender a relação entre as condições climáticas e o ambiente.

A definição atual de clima, no entanto, é um conjunto de tendências dominantes das combinações dos estados da atmosfera, que permanecem por um longo período. A Organização Mundial de Meteorologia (*World Meteorological Organization - WMO*) recomenda 30 anos para a análise climática (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2011). São os valores reunidos nas Normais Climatológicas que permitem, dentro da análise climatológica clássica, o acompanhamento e classificação climática de determinada região.

As Normais não mostram a flutuação do tempo meteorológico, nem os eventos considerados extremos, por isso não garantem a relação direta com a realidade. Outra razão pela qual as Normais Climatológicas não representam a realidade climática é devido às grandes transformações que acontecem nas cidades continuamente, pelos

processos de crescimento e adensamento urbanos, verticalização, impermeabilização do solo, entre outros. As cidades da década de 1980 não são as mesmas do ano de 2014, ou seja, as médias das Normais são referentes à outra época, bem diferente da atualidade. Ainda hoje são utilizados os dados recolhidos durante o período de 1961 a 1990 para definir as Normais Climatológicas (1992). No final de 2020, esses valores serão substituídos pelo período de 1991 a 2020 (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2011). Para uma série de dados da variável temperatura, por exemplo, a elaboração das Normais pode ser definida em termos de média ao longo do tempo e da quantidade de variância em torno da média. Por outro lado, nem todos os elementos climáticos conseguem ser definidos desta forma; a ocorrência de chuvas, por exemplo, é episódica, o que dificulta os cálculos estatísticos, já que o ano hidrológico não acompanha o calendário convencional. Um exemplo é o período chuvoso da região de São Carlos que vai de outubro a março e compreende ao verão quente e úmido. Portanto, técnicas mais complexas são geralmente necessárias para interpretar as variações na precipitação (CUNHA; VECCHIA, 2007).

Mas para se chegar à noção de clima é necessário entender o significado de tempo. O tempo para os meteorologistas é o conjunto das variáveis climáticas que, em determinado local e momento, constituem um estado atmosférico. Estas variáveis climáticas, como a temperatura do ar, direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, umidade relativa, entre outras, combinam-se de maneira passageira, por alguns instantes ou dias, mas de forma concreta, passível de observação direta à escala microclimática.

A investigação referente à conceituação e caracterização do clima obteve grande salto com Sorre (1951). Pela primeira vez admite-se que os estados atmosféricos variam de acordo com o tempo cronológico e configuram certo ritmo climático. Isso porque Sorre conceitua clima como ambiente atmosférico composto pela sucessão habitual de estados atmosféricos em determinado local. No entanto, ele não define claramente o que é ritmo climático. Por conta desse estudo ele é considerado o idealizador da climatologia dinâmica.

A partir das concepções de Sorre, Monteiro (1971) propõe o conceito de ritmo climático baseado nos fundamentos da climatologia dinâmica e define clima como a sucessão de eventos atmosféricos expressos pelas flutuações dos elementos climáticos que atuam de maneira interdependente sobre determinada região. Para Monteiro (1973), somente é possível compreender o ritmo climático por meio da análise conjunta dos dados dos elementos do clima obtidos por unidades de tempo cronológico, pelo menos

diárias, que correspondam à representação da circulação atmosférica em escala regional, caracterizando a sucessão dos estados atmosféricos.

Autores como Poveda et al. (2006) analisaram a dinâmica climática das Américas do Sul e Central com base em dados de pluviosidade aliados às características da circulação atmosférica. Eles reconhecem a complexidade da interação entre os elementos climáticos em diferentes escalas de tempo e espaço.

Muitos estudos começam a surgir apoiados no conceito de climatologia dinâmica. Silveira (2006), por exemplo, trabalhou com a análise rítmica de Maringá, no Estado do Paraná, Brasil. Por meio dessa análise foi possível a investigação das flutuações diárias dos elementos climáticos, que são propriedades das massas de ar, geradoras dos diferentes tipos de tempo. O autor deixa claro o embasamento da pesquisa na abordagem dinâmica, por ter considerado a gênese do clima e a interação entre os elementos climáticos, a partir de dados meteorológicos tomados em superfície. Já Zavatinni (2003) ressalta que a interpretação e conjugação de todas as informações para percepção do ritmo climático, por meio da sucessão de tipos de tempo, é uma postura científica de caráter geográfico, mesmo que essas informações sejam predominantemente meteorológicas. Sem essa postura a análise rítmica do clima ficaria quase impraticável. Neste sentido, fica evidente a importância do conhecimento das condições climáticas, pois podem inferir em padrões de ocupação territorial, na concepção de projetos arquitetônicos, e até mesmo auxiliar em processos de tomada de decisão em diversos aspectos ambientais (CUNHA; VECCHIA, 2007).

A noção de ritmo climático, que abrange a totalidade dos tipos de tempo, considerando além dos elementos do clima, a frequência, a duração e o modo como as sucessões ocorrem durante um longo período, também são importantes na restituição da realidade climática (PÉDELABORDE, 1970). Para a Climatologia Dinâmica, nestes termos, a sucessão dos tipos de tempo é consequência da movimentação das massas de ar, mais especificamente da massa polar, que permite a identificação do tempo conhecendo-se a sua origem, trajetória e suas propriedades dinâmicas. O conceito de massas de ar não é preciso, pois a atmosfera não é dividida de maneira simples. Todavia, adota-se a representação didática de uma massa polar ou tropical como uma porção unitária de ar, que permaneceu de forma estacionária sobre um determinado local (continental ou marítimo) e período, e adquiriu propriedades termodinâmicas únicas de temperatura, umidade e pressão atmosférica (STEINKE, 2012). Aplicando este conceito ao Brasil, a

frente polar ou fria pode ser entendida como o avanço da massa polar que “empurra” a massa tropical (Fig. 2).

Figura 2 – Desenho didático representativo do avanço da frente fria sobre determinado local. Fonte: STEINKE, 2012 (p.126).

A movimentação da massa polar sobre determinado local é dividida em duas fases: pré-frontal e pós-frontal. A fase pré-frontal é subdividida em Prenúncio, com a aproximação da massa polar e Avanço, quando a massa chega a determinado local (frente fria). A fase pós-frontal também é subdividida em duas etapas: Domínio, que é a predominância da massa polar em determinado local e, Transição ou Tropicalização, momento em que essa massa começa a perder a característica polar e se aquecer

(VECCHIA, 1997). Dessa forma, a análise climática para compreensão dos encadeamentos sucessivos de tipos de tempo, que ocorrem sobre determinado local, é realizada a partir da aplicação de episódios representativos, relacionando os fenômenos da circulação atmosférica com os registros obtidos em superfície e, dessa forma, entendendo o ritmo das flutuações do tempo e os ciclos dessas variações ao longo do ano.

Para entendimento deste complexo processo é necessário o conhecimento dos elementos constitutivos das massas de ar: temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, pluviosidade e regime de ventos (direção e velocidade). Estes elementos precisam ser analisados e observados de forma conjunta, o que ajudará na verificação da feição do clima. Todavia, outras condições devem ser levadas em consideração, como os fatores de modificação do clima - topografia, relevo, altitude, latitude, longitude ou continentalidade, vegetação, entre outros e, a escala de abordagem de tempo (anos, meses, dias) e espaço (macroclimática, mesoclimática e microclimática). Na Climatologia Clássica a questão da escala é um grande problema, pois busca sempre "abranger uma escala global, a partir das variações quantitativas dos elementos climáticos na escala local" (MONTEIRO, 1971).

De acordo com Vecchia (1997), na abordagem dinâmica o que diferencia os episódios são a intensidade e duração de cada massa de ar sobre o local. No caso do Estado de São Paulo, a atuação das massas polares atlânticas (mPa) ou das massas tropicais atlânticas (mTa), podem ser mais ou menos vigorosas, aliadas, obviamente, ao processo de ganhos térmicos por meio da radiação solar incidente. Para isso a coleta dos dados de radiação solar global e dos elementos do clima é de fundamental importância para análise dos processos atmosféricos, que acontecem de forma sucessiva, encadeada e inter-relacionada, configurando o ritmo climático, não se esquecendo de considerar os fatores geográficos de modificação. Após a análise do episódio representativo do fato climático, pode-se eleger um dia representativo das ocorrências climáticas, para visibilidade do objeto de estudo. Portanto, a utilização correta da climatologia dinâmica depende da visualização dos encadeamentos de tipos de tempo atmosférico, a partir de respostas locais colhidas por meio das variações diárias e horárias dos elementos do clima (medições em superfície, por meio de estações e postos meteorológicos) e das imagens fornecidas por satélites meteorológicos. Entretanto, o simples acesso a esse banco de dados não é suficiente. Faz-se necessária a correta interpretação dos valores para o real entendimento dos processos atmosféricos (VECCHIA, 1997). A possibilidade de adotar a abordagem dinâmica do clima oferece, em um curto intervalo de tempo, subsídios para o

entendimento das condições climáticas e possíveis repercussões sobre o ambiente construído, com relação à conservação de energia e ao comportamento e desempenho térmicos de edifícios.

É neste sentido que este trabalho de investigação se desenvolve, com o objetivo de contribuir com as ciências que estudam o ambiente construído, na busca de condições mais adequadas ao conforto humano, conhecendo-se a realidade climática existente. Apesar disso, este trabalho não tem a pretensão de realizar uma análise climática complexa, mas sim apresentar aos profissionais da Arquitetura e Engenharia a possibilidade de compreensão das condições climáticas, da origem até a sua influência sobre os ambientes construídos. Esta noção básica sobre o clima, que muitas vezes falta aos profissionais destas áreas, poderia auxiliar na concepção de projetos arquitetônicos mais adequados ao local e, também, na validação das ferramentas computacionais de simulação termoenergéticas, já que os bancos de dados climatológicos utilizados nestes softwares já perderam sua conexão com qualquer situação real.

1.1. A climatologia dinâmica aplicada ao ambiente construído

A arquitetura tem papel fundamental na criação de ambientes construídos e sua relação com o entorno é fator determinante no processo do projeto arquitetônico. A etapa de projeto deve seguir normas de habitabilidade, determinadas pelas necessidades dos indivíduos, principalmente no que diz respeito ao conforto humano com base nos princípios do condicionamento natural (ABNT NBR 15575-1, 2013). No entanto, deve-se compreender que a implantação generalizada de tipologias arquitetônicas precisa ser realizada com precaução, como declara Morillón (1999), quanto à necessidade da adequação climática da edificação na arquitetura, em oposição à utilização de um "modelo ideal" para todas as construções em diferentes regiões. Neste sentido torna-se preponderante a valorização da etapa projetual, que permitirá a adoção de soluções para uma arquitetura que integre cada vez mais tecnologia e meio ambiente, dentro de um determinado contexto ambiental, cultural e socioeconômico (GONÇALVES; DUARTE, 2006).

O processo lógico da construção moderna é trabalhar com as forças da natureza e não contra elas, no intuito de se aproveitar suas potencialidades para concepção de ambientes mais adequados ao conforto humano (OLGYAY, 1998), levando também em consideração os fatores condicionantes do clima, como topografia, localização geográfica,

cobertura vegetal, entre outros, que podem influenciar na orientação da implantação do projeto, na volumetria da edificação e na seleção dos materiais utilizados na construção, visando à concepção do melhor ambiente aos usuários.

Condições climáticas consideradas satisfatórias, segundo os parâmetros bioclimáticos de conforto ambiental, são muito raras, no entanto é possível conceber espaços mais coerentes às necessidades físicas e psicológicas pressupostas pelas zonas de conforto (FREITAS, 2005), com baixo custo de manutenção, e reduzindo o condicionamento térmico artificial. As condições nas quais o homem consegue atingir um nível agradável à sua percepção fazem parte da chamada “zona de conforto” (Fig. 3). A zona de conforto é determinada a partir das necessidades do homem em manter o equilíbrio higrotérmico; no caso de edificações depende das condições físicas humanas, do horário de ocupação, do tempo de permanência e das atividades desenvolvidas, entre outros fatores (FREITAS, 2005).

Figura 3 – Carta Bioclimática com indicação da Zona de Conforto. Fonte: CORBELLÁ; YANNAS, 2003 (p.34).

O meio ambiente é formado por muitos elementos, que se relacionam entre si e incidem diretamente sobre o corpo humano, o qual procura adaptar-se sem grandes perdas de energia. Este mecanismo de adaptação, a termorregulação, pode ser alcançado de maneira voluntária (edificações, vestimentas, atividades, etc.) ou fisiologicamente (involuntário), por meio de mecanismos biológicos de adequação ao ambiente térmico como, por exemplo, o suor (OKE, 1987).

No caso do conforto térmico humano, ele depende, entre outras coisas, de quatro variáveis climáticas: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, e ventilação. A

dissipação do calor metabólico corporal, característica fundamental para obtenção do conforto térmico, pode acontecer basicamente de três formas: radiação (responsável por 45%), convecção (30% da dissipação de calor), e evapotranspiração (25%). É possível ocorrer dissipação por condução se o corpo entrar em contato com superfícies mais frias (Fig. 4).

Figura 4 – Dissipação de calor e umidade. Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003 (p.32).

O mecanismo de convecção é em função da velocidade do ar, já a radiação corporal depende da temperatura do entorno. A evapotranspiração depende parcialmente da pressão de vapor d'água. O processo de dissipação de calor para o ambiente pode gerar “desconforto” quando for insuficiente ou exagerado. Portanto, pode-se definir que o condicionamento térmico natural depende principalmente da radiação solar e da temperatura externa do ar (DOCHERTY; SZOKOLAY, 1999). Para estes autores a sensação de conforto pode ser avaliada através da pele, pois a temperatura dessa superfície está em entorno de 33-34 °C, ou seja, se a temperatura do ambiente estiver muito acima ou muito abaixo desse valor, a provável sensação será de desconforto térmico.

Segundo Olgyay (1998) o processo para criação de espaços adequados à vida humana pode ser dividido em quatro etapas: 1) análise das condições climáticas locais; 2) avaliação da influência climática baseada na percepção sensorial humana; 3) busca pelas soluções tecnológicas adequadas à construção de edificações coerentes ao clima local; 4) aplicação arquitetônica a partir das três fases anteriores (Fig. 5).

Figura 5 – Sequência para inter-relação de variáveis. Fonte: OLGYAY, V. 1998 (p. 11).

As edificações são construídas principalmente para promover segurança e proporcionar um ambiente mais adequado às atividades humanas, e podem ser consideradas a melhor forma de termorregulação, ou seja, a função destas construções é proteger os indivíduos das intempéries a que estão sujeitos, mantendo em seu interior uma proteção contra os rigores do clima. Neste sentido, o principal requisito às edificações é promover o menor estresse térmico aos usuários (OKE, 1987). Uma vez que a edificação não atenda a esse princípio de conforto, os indivíduos ficam expostos ao surgimento de patologias físicas ou psíquicas. O interior dos edifícios apresenta condições ambientais particulares, diferentes das do ambiente externo e, teoricamente, mais adequadas à ocupação humana (SILVA; VECCHIA, 2003). Para Oke (1987), é possível atingir condições adequadas ao equilíbrio de energias entre o corpo humano e o ambiente ao redor com o mínimo esforço de termorregulação, mesmo reconhecendo que as temperaturas exteriores poderão estar bem acima ou abaixo do desejado. Em seu livro *Boundary Layer Climates*, Oke (1987) explica que, para compreender os fatores que modificam o balanço energético térmico no interior das edificações, é necessário considerar três tipos de relações interativas, envolvendo os ambientes externo e interno, e o usuário (Fig. 6). As variáveis importantes nestas relações interativas compõem a equação de balanço de energia em uma edificação, definida por pela equação 1:

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_G + \Delta Q_S \quad (1)$$

Onde Q^* é a radiação solar líquida incidente sobre a edificação; Q_F o calor total liberado pelo corpo humano; Q_H e Q_E as trocas de calores sensível e latente com o

ambiente externo (respectivamente); Q_G o calor de condução entre a edificação e o solo; e ΔQ_S o valor líquido total das trocas de energia armazenada pelos elementos construtivos da edificação e o volume de ar interno.

Figura 6 – Representação esquemática dos fluxos envolvidos no balanço de energia. Fonte: Adaptado de OKE, T. 1987 (p. 253).

No entanto, na sequência o autor deixa claro que esta relação entre as variáveis não é tão simples quanto está expresso na equação do balanço de energia, já que a incidência dos raios solares sobre a edificação é irregular, devido às diferentes formas e volumes possíveis. Esta afirmação sugere um entendimento limitado e muito específico da relação entre ambientes interno e externo à edificação por parte do autor, que também considera que a radiação solar recebida pelas superfícies é normalmente o fator determinante das condições térmicas no interior da edificação. Na verdade, a radiação é o fator determinante das condições térmicas em qualquer tipo de ambiente. Apesar disso, Oke (1987) explica que é difícil determinar o saldo radiômetro bruto de uma edificação, devido à distribuição irregular de energias de ondas curtas e longas sobre as superfícies no espaço e no tempo, evidenciando a característica termodinâmica do processo de trocas térmicas. A magnitude deste processo depende da radiação solar no local, da geometria da edificação e dos materiais que a constituem. Um exemplo simples desta situação está na

própria incidência de radiação solar global sobre as superfícies das diferentes orientações (norte, sul, leste e oeste), de acordo com a trajetória aparente do sol. No Hemisfério Sul, além dos sistemas de cobertura, que recebem a maior incidência dos raios solares, as fachadas Norte e Oeste tem grande representatividade no ganho de energia nas edificações, principalmente no inverno, quando a trajetória aparente do sol está mais baixa em relação ao eixo perpendicular à Terra. Já a fachada sul recebe a radiação difusa em qualquer época do ano (Fig. 7).

Figura 7 – Posições aparentes do sol para os solstícios (verão e inverno) e os equinócios, no plano do meridiano (Hemisfério Sul). Fonte: Fonte: CORBELLA; YANNAS, 2003 (p.227).

A interface meio físico natural e ambiente construído tem sido objeto de estudo de diferentes autores, que reafirmam claramente a importância da arquitetura na interação entre estes dois aspectos, com o objetivo de criar espaços confortáveis e funcionais aos usuários. Dessa forma também é importante conhecer a parte construtiva deste espaços, quando se trata de analisar os estímulos climáticos sobre o ambiente construído.

Entende-se como ambiente construído todo o tipo de edificação e os espaços abertos tais como praças, parques, entre outros, os quais fazem parte de uma escala microclimática (VECCHIA, 1997). Neste sentido, três conceitos importantes são utilizados: comportamento, desempenho e conforto térmicos. Porém, mesmo sendo conceitos diferentes, são comumente confundidos, pois conferem parâmetros térmicos para definição de estratégias de projeto, construção e avaliação de ambientes.

Os conceitos de comportamento e desempenho térmicos são pautados nas características físicas dos materiais que constituem as edificações como, por exemplo, a condutividade térmica e a espessura (inércia térmica), que são as propriedades térmicas mais importantes, entre outras. Os valores de algumas destas propriedades podem ser utilizados em softwares para simulação computacional de eficiência energética que,

apesar de limitados, conseguem fornecer uma base para elaboração de estratégias de projeto, visando o conforto térmico.

O comportamento térmico, portanto, analisa a resposta do material ou de um sistema construtivo à solicitação térmica. É uma análise feita de forma a classificar o objeto de investigação em relação à sua condutividade e capacidade térmicas (SANTOS et al., 2004). Já o desempenho, além de levar em consideração as características térmicas definidas pelo comportamento, é instrumento para comparação de sistemas construtivos em relação à eficiência energética de edificações. Estes dois conceitos, comportamento e desempenho térmicos, somados aos aspectos sensoriais da percepção térmica pelo corpo humano, de caráter psicológico e subjetivo, uma vez que as sensações termofisiológicas procuram indicar um estado mental diretamente ligado às condições térmicas do ambiente, permitirão a avaliação do conforto térmico considerando-se, também, as condições de usos e circulações nos ambientes, as atividades e as vestimentas dos ocupantes.

A Avaliação Pós-Ocupação (APO) é um exemplo de que os conceitos de comportamento, desempenho e conforto térmicos estão interligados e fazem parte do conhecimento sobre ambientes construídos, pois relaciona a análise subjetiva dos usuários aos resultados das avaliações de comportamento e desempenho térmicos dos materiais e sistemas construtivos. Portanto, o conforto térmico é resultado da interação entre os ritmos climáticos e os ciclos humanos, definido a partir de parâmetros como a temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, nível metabólico do organismo e isolamento térmico da vestimenta, tendo como fator gerador de todos os processos de trocas térmicas a radiação solar.

Em estudo desenvolvido no Estado de Pernambuco, Loureiro (1990) desenvolveu uma metodologia para avaliação de algumas variáveis de projeto sobre o desempenho térmico de habitações de interesse social. A partir da análise dos dados obtidos, concluiu-se que as condições adequadas de conforto térmico diurno no ambiente utilizado para as simulações dependem prioritariamente do controle da radiação solar incidente, ao invés do controle da ventilação, pois observou-se que o aumento da taxa de ventilação nem sempre representa diminuição da temperatura interior máxima.

No entanto, a utilização dos conceitos de ritmos climáticos, conforme apresenta Monteiro (1973), não é comumente empregada nas análises de desempenho e conforto térmicos, que normalmente são baseadas em normas, simulações, cartas bioclimáticas,

sem a devida compreensão da origem dos dados climáticos e a aplicação adequada em cada estudo.

Os autores Barbosa e Lamberts (2001) propuseram uma metodologia de avaliação de desempenho térmico de cinco sistemas construtivos utilizados em residências unifamiliares da COHAB na cidade de Londrina - PR, a partir de simulações computacionais. Os dados utilizados para compor as simulações foram os de temperaturas internas em dias típicos de verão e inverno, de acordo com as condições climáticas do período de medição, e as respostas dos usuários em relação às sensações térmicas no interior das residências.

Para identificação do “Ano Climático de Referência” ou “Ano Tipo” (TRY – *Typical Reference Year*), necessário nas simulações, foram utilizados registros do período de 1979 e 1990 com metodologia da ASHRAE (BARBOSA; LAMBERTS, 2001). O “Ano Climático de Referência”, que também pode ser chamado de “Ano Meteorológico de Referência” (TMY – *Typical Meteorological Year*), são bibliotecas de dados meteorológicos bastante utilizadas em simulações de desempenho térmico e conservação de energia (VECCHIA, 1997). Para Barbosa e Lamberts (2001) a representação do clima conhecida como ano climático de referência é a melhor opção, ao contrário da representação por dias típicos, pois os autores acreditam que a análise climática a partir dos dias típicos leva a considerações de situações extremas, ou seja, com baixa probabilidade de ocorrência. Isso porque os autores entendem que o conceito de dia típico “não contempla a ocorrência de sequências climáticas comuns no sul do país, onde o clima é governado pela entrada de frentes frias, o que pode gerar grandes variações de temperatura de um dia para o outro. O uso, portanto, de dados climáticos mais detalhados, como o ano climático de referência, possibilitaria analisar com mais propriedade os sistemas construtivos frente a esta dinâmica climática” (BARBOSA; LAMBERTS, 2001, p.16).

No entanto, não existe detalhamento suficiente das condições climáticas da cidade do Londrina, quando se utiliza os dados do ano climático de referência, pois trata-se de um conceito que pertence à abordagem clássica do clima, visto que os dados se referem às médias anuais, ou seja, não representam a realidade climática de maneira “detalhada”. O conceito de dia experimental representativo caberia neste estudo, já que a proposta do trabalho era avaliar o desempenho térmico dos sistemas construtivos em condições climáticas frequentes no período de verão e no de inverno, ou seja, poderia ter sido escolhido um dia representativo das condições de verão e outro de inverno. Dessa forma,

esta citação evidencia o desconhecimento da sucessão de Tipos de Tempos Atmosféricos, que configuram o ritmo climático de uma região, presente na climatologia dinâmica.

De acordo com Egan (1975), o conforto térmico está condicionado principalmente às diferentes atividades dos usuários e aos valores gerados em forma de calor por estes fatores, e propõe zonas de conforto utilizando critérios de temperatura interna e umidade relativa. Como instrumento de análise do conforto humano, o autor utiliza cartas climáticas para concepção da volumetria das edificações de acordo com a região. Novamente este outro trabalho confirma que a abordagem dinâmica do clima não é prioritariamente utilizada.

Nos projetos de arquitetura dois aspectos devem ser estudados e avaliados com cuidado, de acordo com cada região e ritmo climático das estações: o sol e o vento. Para regiões mais frias, por exemplo, o projeto deve buscar ao máximo o aproveitamento da radiação solar, ao contrário de regiões mais quentes, onde é necessário minimizar a exposição direta aos raios solares, de acordo com a trajetória aparente do sol. Nesta última situação, diferentes culturas tem utilizado dispositivos de sombreamento para auxiliar na diminuição do consumo energético, mas sua eficiência está diretamente ligada ao projeto da edificação (OLGYAY; OLGAY, 1957). Já Aroztegui (1990), por exemplo, ressalta a importância da fase projetual na tomada de decisões na adequação climática, visando o melhor desempenho térmico da edificação. Em outro trabalho ele defende a ideia da limitação das variáveis climáticas a serem consideradas na fase de projeto para definição das exigências mínimas de conforto térmico (AROSZTEGUI, 1993). No entanto, trabalhar com as variáveis climáticas isoladamente dificulta ainda mais a compreensão do ritmo dos tipos de tempo meteorológico, ou seja, a realidade do clima de determinada região. Portanto, a aplicação da climatologia dinâmica é mais adequada, pois reconhece os climas zonais e regionais, correlacionando-os à circulação geral da atmosfera, com base nos dados meteorológicos tomados na superfície e obtidos de forma automática e em tempo real, além de possibilitar a validação de programas de simulação termo-energética.

Neste sentido, esta investigação vem mostrar a importância da abordagem dinâmica do clima aplicada à Arquitetura em estudos sobre o ambiente construído, que garante maior representatividade da realidade microclimática, a partir da compreensão dos ritmos climáticos que, por sua vez, derivam da circulação geral da atmosfera.

A seguir serão apresentadas as razões que justificaram a realização desta investigação experimental, que procurou verificar a distribuição espacial das temperaturas internas em duas células de teste, a partir de análises de comportamento e desempenho

térmicos em dois dias representativos, um para condições de calor, com máxima radiação solar global e céu limpo, e outro para condições de domínio da massa polar atlântica, com valor mínimo de radiação solar e alta nebulosidade, extraídos de um episódio climático durante o período de coleta de dados.

2. JUSTIFICATIVA

Em busca de compreensão e interpretação mais precisas do clima sobre os ambientes humanos fica evidente a necessidade do uso dos conceitos da Climatologia Dinâmica, visto que a abordagem clássica do clima, usualmente empregada nos estudos sobre conforto ambiental, simplifica a influência de cada variável climática na avaliação de desempenho térmico (VECCHIA, 1997). Neste sentido, a utilização do conceito de episódios representativos do fato climático, preconizados pela Climatologia Dinâmica, auxilia a compreensão dos encadeamentos sucessivos de tipos de tempo meteorológico em determinado local, já que relaciona os processos decorrentes da circulação atmosférica aos registros obtidos em superfície. Dessa forma, as pesquisas nesta área do conhecimento não mais dependerão de valores médios, presentes em um amplo universo de dados climáticos, no qual não se sabe exatamente a origem, e que não representam a realidade do fato climático (VECCHIA, 1997).

No entanto, os procedimentos metodológicos para coleta dos dados meteorológicos, bem como os dados das variáveis aplicadas ao ambiente construído (temperatura, umidade, ventilação, etc.), não possuem diretrizes e nem padronização adequadas, que possibilitem o entendimento da atuação dos fenômenos atmosféricos nas edificações e o intercâmbio de informações entre pesquisadores. O que existe, de fato, são normas internacionais, ISO 7726 (1998) e ASHRAE 55(2004), e a norma brasileira ABNT NBR 15575 (2013), mencionada anteriormente, que especificam o posicionamento de equipamentos de medição da temperatura interna do ar. No entanto, estas normas divergem em alguns pontos, o que dificulta a escolha da norma mais adequada por parte dos pesquisadores. A norma ISO 7726 é referência para as normas ASHRAE 55 (2004) e ABNT 15575 (2013), e estabelece os procedimentos para medições e os instrumentos as serem utilizados, e diferencia os ambientes em homogêneos e heterogêneos. Para ambientes considerados homogêneos, a medição pode ser realizada com uma única leitura e a altura do equipamento pode ser em relação ao usuário em pé ou sentado (Tabela 1). Por outro lado, a ISO 7726 (1998) não especifica as localizações dos equipamentos em planta (BARBOSA; WEILLER; LAMBERTS, 2007). A principal crítica a esta norma é exatamente esta diferenciação entre ambientes homogêneos e heterogêneos, já que não existe uma explicação coerente para estes termos e de como reconhecer cada situação.

Tabela 1 - Alturas recomendadas pelo ISO 7726 (1998) para medições em ambientes internos.

Localização dos sensores	Alturas recomendadas (m)	
	Usuário sentado	Usuário em pé
Nível da cabeça	1,10	1,70
Nível do abdômen	0,60	1,10
Nível do tornozelo	0,10	0,10

Fonte: Adaptado de Barbosa; Weiller; Lamberts (2007).

No caso da norma ASHRAE 55 (2004), ela é aplicada aos estudos sobre desempenho e conforto térmicos, quando existe a ocupação humana, e apresenta os parâmetros para avaliação dos limites internos de temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar, entre outros. Nesta norma é recomendado que a localização dos equipamentos em planta seja no centro do ambiente a ser medido, no caso de apenas um ponto de medição, e distante 1,00 m de cada parede interna se forem colocado outros pontos de coleta de dados. Com relação à altura dos equipamentos, a norma ASHRAE 55 (2004) utiliza as mesmas recomendações da norma ISO 7726 (1998).

Já a norma brasileira ABNT NBR 15575 (2013), como descrito na Introdução, especifica apenas que os equipamentos sejam colocados no centro dos ambientes a serem medidos, à 1,20m do piso.

Diante de tantas possibilidades de estudos sobre desempenho e conforto térmicos e de pouca informação à respeito das exigências feitas pelas normas existentes, também são inúmeros os resultados encontrados em diferentes trabalhos, seja por conveniência do pesquisador na coleta de dados, ou para evitar o contato dos usuários da edificação com os equipamentos.

Considerando-se ainda a metodologia proposta por Barbosa e Lamberts (2001), apresentada na Introdução, que especificou e avaliou o desempenho térmico de residências unifamiliares em Londrina-PR, os autores realizaram a coleta de dados experimentais de temperatura interna do ar, temperatura radiante média, umidade relativa e ventilação interna, utilizando três equipamentos de operação manual: um termômetro de globo de mercúrio com tubo de proteção metálica (não especificado), um psicrômetro giratório (com dois termômetros de mercúrio) e um termômetro Kata. Para evitar maiores transtornos ao cotidiano das residências estudadas, Barbosa (1997) realizou a coleta de dados com um único registrador situado em um dos ambientes de cada casa, seguindo a norma ISO 7726 de 1985 (substituída posteriormente pela ISO 7726:1998). Os dias escolhidos para coleta de dados foram os considerados típicos de verão e de inverno, a

partir de quatro coletas de dados planejadas para cada casa: duas no período mais quente (17/02 a 22/03/1994) e duas no período mais frio do ano (22/06 a 29/07/1994). A definição de dias típicos para a autora, aparentemente, foi retirada da ideia de sazonalidade das estações do ano na cidade de Londrina-PR. Durante os dois períodos de coleta de dados, a autora descreveu ter tido problemas de locomoção até às residências devido à chuva, ou por considerar o dia não tão típico para suas análises: “a casa em painéis de argamassa armada teve a segunda medição de verão marcada para o dia 23/03/94, entretanto, suspendeu-se logo no início da manhã em razão da temperatura externa se apresentar bem mais baixa que as temperaturas características de alto verão da região. No período de inverno, a casa em concreto monolítico, teve a segunda medição planejada para o dia 29/03/94, mas também foi suspensa logo no início da manhã, porque as temperaturas das primeiras horas já se apresentavam bem mais altas que as temperaturas características de um dia de inverno” (BARBOSA, 1997, p. 109).

Estes dados coletados *in loco* nas residências do estudo, somados aos valores de temperatura externa do ar fornecidos por uma estação meteorológica automática, serviram para ajustar o software de simulação COMFIE (*Calcul d'Ouvrages Multizones Fixé à une Interface Expert* - Cálculo de Multizonas Fixadas a uma Interface Inteligente). Neste software, o arquivo climático pode ser menor que 52 semanas, mas deve começar sempre no dia 1º de janeiro, sendo que o período de simulação não precisa, necessariamente, corresponder ao período do arquivo climático, desde que a primeira e a última semanas sejam identificadas antes da simulação (BARBOSA, 1997).

Tanto os procedimentos de coleta de dados *in loco*, quanto a utilização deste software, de acordo com a descrição da autora, já são motivos para levantar questões sobre a confiabilidade dos resultados e aplicação da suposta metodologia de avaliação de desempenho térmico. Segundo a própria autora, por falta de calibração destes equipamentos, em relação à estação meteorológica utilizada, gerou-se “uma incerteza absoluta entre os dados da estação e os dados da medição, e uma incerteza relativa entre as medições” (BARBOSA, 1997, p. 112). Esta afirmação, a princípio, retirou qualquer validade dos resultados analisados por ela. Além disso, se o arquivo climático não precisa ser o mesmo do período de simulação, também não existe lógica na coleta de dados *in loco* para “ajustar” o programa de simulação. Portanto, está claro que a pesquisa de Barbosa (1997) não foi baseada nos conceitos preconizados pela climatologia dinâmica, já que desconsiderou a sucessão habitual dos fenômenos atmosféricos e, também, não

apresentou procedimentos de coleta de dados experimentais adequados, mas pelo contrário, sem rigor científico e referências teóricas claras.

Em estudo sobre o desempenho térmico em salas de aula do Campus da UNESP, na cidade de Bauru-SP, Faria e Kaneko (2003) utilizaram três equipamentos do tipo HOB0[®] data logger da *Onset Computer Corporation*, para registrar e armazenar dados de temperatura e umidade do ar. Os dados do ambiente externo foram coletados por estes equipamentos, que ficaram dentro de abrigos meteorológicos, e os dados relativos ao ambiente interno das salas de aula foram coletados pelos equipamentos dispostos sobre carteiras no centro de cada sala.

Para avaliação do impacto de estratégias bioclimáticas em edificações no Estado de Mato Grosso do Sul, a partir de dados de temperatura interna do ar, Andreasi (2001) instalou cada sensor eletrônico dentro de uma gaiola de tela galvanizada, que foram posicionadas a 1,50 m do plano vertical das janelas existentes e à 2,10 m de altura em relação ao piso. Durante a realização das medições, estes sensores foram mudados diariamente de posição.

Já Dencker e Lamberts (2005) monitoraram a temperatura interna do ar e a umidade relativa de duas residências em Manaus-AM. Os autores também utilizaram os equipamentos eletrônicos tipo HOB0[®] data logger da *Onset Computer Corporation*, que foram colocados de forma fixa em alguns móveis das residências, variando apenas as alturas: entre 0,60 e 0,75 m nos dormitórios, e 0,90 a 1,0 m nas salas. Esta disposição dos equipamentos nos ambientes foi escolhida de modo a não interferirem nas atividades dos ocupantes.

Em outro trabalho, os autores Barbosa, Weiller e Lamberts (2007) analisaram a influência da posição do equipamento de medição de temperatura interna do ar, a fim de auxiliar outros pesquisadores na definição da melhor disposição para este tipo de equipamento, sem interferir nas atividades cotidianas dos usuários. Foram realizadas medições *in loco* em duas edificações não ocupadas, com sistemas construtivos diferentes: um protótipo em madeira e um barracão de alvenaria. Os autores escolheram um ambiente de cada edificação: no protótipo de madeira foi selecionado um cômodo no andar superior com uma fachada voltada ao norte e outra a oeste, e no barracão foi selecionado um depósito no térreo com fachadas voltadas a leste e oeste. Apesar das medições terem acontecido em edificações não ocupadas, os autores definiram as alturas visando situações nas quais os usuários pudessem conviver com os equipamentos durante medições. Portanto, os equipamentos HOB0[®] data logger, da *Onset Computer*

Corporation, foram instalados em três alturas diferentes: a 0,27 m do piso, para evitar danos aos equipamentos, a 1,10 m por ser a altura recomendada pela ISO 7726:1998, e a 2,10 m por estar mais distante do alcance de usuários. Para cada altura existia um equipamento com uma proteção contra a radiação (não especificado) e um sem a proteção.

Os autores concluíram que, "quanto mais pesada a edificação, maior será a influência da disposição dos equipamentos de medição de temperatura do ar no ambiente e também maior será a influência da proteção do equipamento com barreiras de radiação " (BARBOSA; WEILLER; LAMBERTS, 2007, p.107). Eles também finalizaram afirmando que, "quando não for possível posicionar o equipamento de medição de acordo com as normas, é admissível posicionar o sensor a, pelo menos, 1,0 m de distância das paredes expostas à radiação solar e com proteção contra radiação" (BARBOSA; WEILLER; LAMBERTS, 2007, p.107).

Apesar do esforço em colaborar com a prática de estudos experimentais de coleta de dados em ambiente construído, no caso do trabalho de Barbosa, Weiller e Lamberts (2007) dados de temperatura interna do ar, as conclusões destes autores não são consistentes e não definiram nenhum parâmetro para medições *in loco* e, além disso, a comparação entre os ambientes das duas edificações não tem lógica, pois são situações completamente diferentes, já que um está no térreo e tem as fachadas leste e oeste expostas ao sol, e o outro está no primeiro andar e tem expostas a fachada norte e oeste.

Ao contrário dos estudos apresentados até aqui, Saito (2009) preferiu realizar suas análises de desempenho térmico de acordo com dois procedimentos apresentados pela norma ABNT NBR 15575/ 2008 (revogada e substituída pela ABNT NBR 15575/2013) e as diretrizes da ABNT NBR 15220/2005. O procedimento Simplificado considera os cálculos de capacidade e transmitância térmicas das vedações e, o segundo procedimento, conhecido por Simulação, considera a temperatura interna do ar da edificação analisada. Neste trabalho não foram encontrados procedimentos metodológicos experimentais, pois, segundo Saito (2009), "a vantagem de se utilizar a simulação ao invés de experimentos é que a simulação é muito mais barata e consome um tempo muito menor, além de que cada edificação é diferente de outra, principalmente no que se refere ao clima e à implantação da edificação" (SAITO, 2009, p. 48).

Os autores OLIVEIRA et al. (2005) também adotaram os cálculos de transmitância e capacidade térmicas, atraso térmico e do fator de calor solar de elementos de edificações, para estudo teórico comparativo de desempenho térmico de sistemas

construtivos convencionais e alternativos. Para a realização das simulações no software VisualDOE 3.1 foram elaborados protótipos de casa popular com várias configurações construtivas de paredes para cinco cidades correspondentes às cinco zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220/ 2005. As cidades foram escolhidas de acordo com a disponibilidade de arquivos climáticos horários. No entanto, as simulações não foram feitas a partir do mesmo banco de dados. Dessa forma, as análises de desempenho térmico realizadas por meio de simulações computacionais, não representaram a realidade climática de nenhuma das cidades selecionadas por Oliveira et al. (2005). Possivelmente talvez seja esta a razão dos autores concluírem que adotar a estratégia bioclimática não seja suficiente para garantir condições de conforto térmico (OLIVEIRA et al., 2005).

Além dos estudos para entendimento das condições térmicas em ambientes construídos, conduzidos por meio de simulações, cálculos matemáticos, e até por procedimentos experimentais não padronizados, outros são realizados de maneira a inventar ou forçar situações completamente irreais, como é o caso das pesquisas de Ayata et al. (2011) e Adelard et al. (2000).

No primeiro caso, Ayata et al. (2011) criaram em laboratório um espaço que chamaram de "câmara ambiental", no qual instalaram um sistema de medição de transferência de calor - a Placa Fria, para controlar a temperatura e a umidade do ar. Esta Placa Fria, em escala real e com diferentes sensores, eliminaria a maioria dos problemas que ocorrem em condições de estado não estacionário de transferência de calor, e que são inerentes às experimentações em campo. Neste trabalho, Ayata et al. (2011) calcularam os fluxos de calor a partir de equações de balanço energético para diferentes condições ambientais criadas em laboratório.

Já na pesquisa desenvolvida por Adelard et al. (2000), estes autores desenvolveram um software de simulação para análises de desempenho térmico de edificações, com aplicação em todos os tipos de climas, o RUNEOLE. Segundo os autores, este software associa três módulos: descrição, modelagem e geração de dados meteorológicos. A descrição estatística de um banco de dados meteorológico existente gera dias representativos possíveis e leva à criação de bibliotecas modelo. O módulo de geração permite a criação de sequências de tempos atmosféricos fictícios. O RUNEOLE, portanto, é capaz de gerar dados climáticos por meio de análise estatística de banco de dados existente, para modelar as variáveis climáticas. Este software permite a correlação das variáveis climáticas em determinados casos. Adelard et al. (2000) ainda reconhecem que dados meteorológicos coerentes são sempre necessários no dimensionamento dos

ambientes e para prever as necessidades energéticas das edificações, mas afirmam que os dados artificiais, gerados por softwares que utilizam uma série pré-estabelecida como modelo, são importantes em situações nas quais não existe um banco de dados de hora em hora disponível para um determinado local (ADELARD et al., 2000).

Ora, quando não se conhece o ritmo climático de determinada região, então o mais correto seria identificar a sucessão habitual dos tipos de tempo meteorológico, por meio dos dados das variáveis climáticas tomados em superfície, como propôs Monteiro (1973).

Não existe lógica alguma em se criar condições artificiais, intencionais e completamente irreais, seja em laboratório, como no estudo de Ayata et al. (2011), ou com dados meteorológicos fictícios, como na pesquisa de Adelard et al. (2000). Qualquer análise de desempenho ou conforto térmicos desenvolvida nestas condições, não terá validade alguma, pois pertencerá ao mundo imaginário, abstrato, não científico.

No mesmo trabalho, Adelard et al. (2000) contradizem a própria proposição de dados artificiais, pois afirmam que para cada tipo de clima e cada tipo de edificação, os fatores climáticos não tem influência similar e, assim, na fase de projeto é importante conhecer as condições atuais e extremas para cada fator climático (ADELARD et al., 2000). Se é importante se conhecer as condições ATUAIS, então por que criar dados ARTIFICIAIS? Dessa forma, cresce cada vez mais a necessidade de compreensão dos processos climáticos em diferentes escalas, com o objetivo de confrontar e colocar em desuso metodologias como as de Adelard et al. (2000) e de Ayata et al. (2011).

Neste sentido, algumas pesquisas sobre desempenho e conforto térmicos já buscam, de maneira experimental, uma aproximação da Climatologia Dinâmica com a Arquitetura. No entanto, estas pesquisas experimentais também necessitam de critérios que as direcionem de maneira clara, objetiva e que garantam, também, a reprodutibilidade dos procedimentos metodológicos em outros estudos sobre o mesmo tema.

Em *Análise do comportamento térmico da telha de material reciclado e telha de aço em episódio climático*, Peralta, Sichieri e Ferreira (2005) analisaram o comportamento térmico de sistemas de cobertura a partir da abordagem dinâmica do clima, por meio da identificação de episódios climáticos. Foram utilizados uma estação meteorológica automática para coleta de dados climáticos externos e um datalogger CR10X para armazenamento dos dados, ambos os equipamentos da empresa Campbell Scientific Inc. Os protótipos analisados receberam termopares tipo T para medição de temperatura superficial interna das telhas, temperatura interna do ar de bulbo seco e bulbo úmido, que foram registradas por um multiplexador e armazenadas no datalogger. Os

dados coletados foram transferidos por meio do software PC208W, também da Campbell. Apesar da descrição detalhada dos equipamentos e da utilização da abordagem dinâmica neste estudo sobre o comportamento térmico de telhas, em nenhum momento os autores explicaram como os sensores foram instalados e a localização de cada um nos protótipos.

No caso da pesquisa de Morais e Roriz (2003), os autores optaram por analisar comparativamente o desempenho térmico de duas coberturas utilizadas em guaritas, sendo cada uma em um local. Na tentativa de correlação dos dados de temperaturas internas e externas do ar, os autores desenvolveram um modelo matemático para prever estas temperaturas e desta forma tornar mais realista a comparação entre os desempenhos térmicos das coberturas em questão. Também neste trabalho não foi relatada de maneira detalhada a etapa de monitoramento.

A coleta de dados experimentais precisos também é importante na formulação de equações preditivas da temperatura interna em ambiente construído, isto porque essas equações são desenvolvidas a partir de dados experimentais, levando em consideração as condições de ocupação e exposição ao clima. Em *Predicting Thermal Performance of Occupied Houses*, Givoni e Vecchia (2001) desenvolveram equações preditivas para duas residências ocupadas na cidade de Descalvado-SP, com características semelhantes, inclusive entre as famílias proprietárias, visto que o modo de ocupação dos usuários influencia o comportamento térmico do ambiente interno. Por meio desta pesquisa ficou comprovada a possibilidade de utilização das equações para prever a temperatura interna de edificações, ocupadas ou não, a partir de poucos dados do ambiente externo. Os dados experimentais de temperaturas superficiais internas do teto, e temperaturas internas do ar (de bulbo seco e úmido), utilizados por Givoni e Vecchia (2001), foram coletados por meio de termopares tipo T em cada um dos ambientes das residências selecionadas em Descalvado-SP, além dos dados meteorológicos registrados por uma estação automática. No entanto, tanto a localização de cada sensor nas residências, quanto à estação automática, não foram informadas.

Como exposto até o momento, nenhum dos trabalhos apresenta uma diretriz concreta em relação aos procedimentos metodológicos para coleta de dados experimentais, até mesmo porque a maioria das pesquisas ainda utiliza softwares computacionais para avaliação de desempenho e conforto térmicos, pois se apoiam nas regulamentações de normas nacionais e internacionais, sendo comum também, a utilização de bibliotecas climáticas cujos dados não garantem precisão, isso quando não são inventados para determinadas situações.

Assim, a compreensão do ritmo climático, a partir dos conceitos de Tipos de Tempo propostos por Monteiro (1969), para definição e aplicação dos episódios representativos do clima, permite melhor aproximação e conhecimento da realidade climática aplicada ao ambiente construído.

A abordagem dinâmica do clima, portanto, garante melhor precisão e consistência ao processo de aquisição de dados meteorológicos. Isto se faz importante desde a fase inicial do anteprojeto arquitetônico, para elaboração de espaços mais adequados à realidade climática local, até às avaliações pós-ocupação, incluindo-se também as avaliações de desempenho térmico e eficiência energética por meio de simulações computacionais, que só poderão apresentar resultados congruentes às necessidades térmicas desejadas, se forem validados por procedimentos experimentais de coleta de dados com rigor científico.

3. HIPÓTESE E OBJETIVOS

As duas hipóteses formuladas nesta investigação, de caráter experimental, referem-se às aplicações dos conceitos da abordagem dinâmica do clima relativas à Arquitetura.

A hipótese e o objetivo principais se referem à possibilidade de determinação de diretrizes para a coleta de dados de temperaturas internas aplicadas aos estudos sobre desempenho e conforto térmicos do ambiente construído, a partir da análise da distribuição de temperaturas internas em células de teste por meio da utilização de dias típicos experimentais, extraídos de um episódio representativo do fato climático.

Já a hipótese secundária, no entanto, refere-se às análises de desempenho térmico das células de teste nos dois dias típicos experimentais, para verificação da influência da radiação solar nas temperaturas internas.

Portanto, os objetivos específicos são as análises dos desempenhos térmicos das células de teste, por meio da coleta de dados de temperaturas superficiais internas (TSI) e temperaturas de bulbo seco (TBS), em dois dias típicos experimentais: um para condições de calor, ou domínio da massa tropical atlântica (mTa), e outro para domínio da massa polar atlântica (mPa), no qual os valores de radiação solar global e temperatura do ar externo foram os menores do período de coleta de dados.

Ressalta-se, portanto, a importância da compreensão dos processos atmosféricos, relacionando-os com os dados das variáveis meteorológicas tomados em superfície, e as possíveis repercussões sobre o ambiente construído.

4. METODOLOGIA

Tendo em vista a grande quantidade de variáveis inerentes à questão do conforto, optou-se por analisar apenas a temperatura, pois é mais perceptível aos usuários e é influenciada primeiramente pela radiação solar, fator genético do clima. Outro aspecto que nos levou a escolher apenas a variável temperatura foi a logística envolvida em todo o experimento, desde a colocação dos equipamentos, passando pela coleta periódica dos dados, até a manutenção de todo este aparato, que exigiu muito esforço e dedicação para garantir a confiabilidade dos registros. Incluir outras variáveis, como umidade ou velocidade do ar, tornaria o trabalho muito mais complexo, e seria indicado caso o trabalho envolvesse as análises de conforto térmico.

Como não existe uma norma adequada que estabeleça a maneira como os dados de temperaturas internas precisam ser coletados em uma edificação, seja em um estudo experimental acadêmico, ou em uma avaliação proposta pelo mercado, a investigação realizada foi a respeito da distribuição das temperaturas internas, no caso desta pesquisa, em duas células de teste com telhados diferentes, a partir de análises comparativas de desempenho térmico. O que se pretende é verificar as posições em que os sensores são instalados e atestar se existe ou não influência significativa destas colocações, que na maioria dos estudos é arbitrária. A escolha pela utilização das células de teste localizadas bem próximas a uma estação meteorológica automática também salienta a importância da fonte dos registros meteorológicos, que no nosso caso é a mais adequada do ponto de vista dos acontecimentos atmosféricos e seus registros diários no local.

As temperaturas internas coletadas nas células de teste foram as superficiais (tetos, paredes e pisos), denominadas como Temperaturas Superficiais Internas (TSI) e a temperatura interna do ar, ou de bulbo seco, chamada de Temperatura de Bulbo Seco (TBS). As análises de comportamento e desempenho térmicos, realizadas a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, possibilitaram a identificação de episódios representativos do fato climático, com repercussões sobre os valores das temperaturas internas destas duas células de teste, e a verificação da influência da radiação solar global nestes ambientes.

Esta investigação procurou transpor os conhecimentos, conceitos e métodos próprios da Geografia para a Arquitetura, já que não é uma análise climatológica ou meteorológica convencional, pois utiliza, apenas, alguns recursos para entendimento das flutuações e excitações impostas pelas variações climáticas do local, como a elaboração

de gráficos da radiação solar global e das principais variáveis climáticas, e a observação de imagens de satélite. Por este motivo a aplicação dos episódios representativos do clima aproximou a investigação proposta da realidade microclimática da área de estudo, ou seja, garantiu melhor resolução das repercussões do clima sobre os ambientes construídos, pois possibilitou a compreensão dos encadeamentos sucessivos de tipos de tempo sobre o local, relacionando a circulação atmosférica regional com os registros obtidos em superfície.

Esta pesquisa não é inovadora na aplicação de episódios representativos do clima na busca de condições adequadas ao Conforto Humano em edificações, a partir da realidade existente, já que se trata de um conhecimento adquirido, mas traz a novidade e as inquietações pessoais da maneira como esse conhecimento é empregado e como os experimentos são conduzidos e avaliados, no caso desta investigação, em relação ao desempenho térmico de edificações.

Portanto, a metodologia adotada neste trabalho se refere à elaboração dos procedimentos metodológicos, à montagem dos equipamentos e ao acompanhamento do experimento, bem como à avaliação dos resultados obtidos.

5.1. Desenvolvimento da pesquisa

Neste trabalho as séries de dados de temperaturas superficiais internas (TSI) e de bulbo seco (TBS) foram coletados por meio de termopares, instalados em locais pré-determinados em duas células de teste semelhantes, uma com cobertura verde e outra com telhado cerâmico sobre madeiramento e laje de concreto, construído de maneira convencional. Os dados de radiação solar global e das principais variáveis climáticas (temperatura externa e umidade relativa do ar, pressão atmosférica e pluviosidade) foram coletados pela estação meteorológica automática do Centro de Ciências da Engenharia Aplicadas ao Meio Ambiente (CCEAMA), da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). A descrição detalhada dos equipamentos e localização dos sensores nas células será feita posteriormente neste capítulo.

5.1.1. Localização e caracterização das células de teste e estação automática

O trabalho foi desenvolvido no canteiro experimental da Estação Climatológica do CCEAMA-USP (Fig. 8), às margens da Represa do Lobo na cidade de Itirapina -SP, entre

as coordenadas geográficas 22°01'22''/22°10'13'' S e 43°57'38''/ 47°53'57''W, e altitude de 733 m.

Figura 8 - Estação climatológica e canteiro experimental com as células de teste - CCEAMA-EESC-USP.
Fonte: Foto tirada por Gustavo Zen em 2015.

As células de teste ou unidades experimentais são construções em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços, com dimensões de 10 x 20 x 5 cm, sobre radier de concreto armado de 0,05 m, diferentes apenas no sistema de cobertura. Elas foram planejadas de forma a garantir equivalência a uma situação real na aquisição de dados e estão localizadas no terreno de maneira que tenham as mesmas condições de igualdade com relação à incidência da radiação solar e atuação dos ventos, sem gerar sombras uma na outra (Fig. 9).

Figura 9 - Levantamento do Canteiro experimental - localização das células de teste (situação sem escala) - CCEAMA-EESC-USP. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

As dimensões internas são 2,00 m x 2,50 m, com uma porta padrão de 2,10 m x 0,60 m voltada para fachada Leste e uma janela de 1,0 m x 0,70 m com orientação Norte. As portas e janelas são de madeira (Fig. 10 e 11).

Figura 10 - Célula de teste com cobertura verde. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 11 - Célula de teste com telha cerâmica. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

As edificações utilizadas nesta pesquisa fizeram parte de um estudo para a empresa Eternit S. A. concluído em 2003 (VECCHIA, 2003), no entanto, foram reformadas para se adequarem aos atuais objetivos: o sistema de cobertura verde foi construído a partir da reforma de uma célula de teste com telhas cerâmicas sobre madeiramento aparente e sem laje forro. No lugar do antigo telhado foi concretada *in loco* uma laje pré-moldada de lajotas cerâmicas e vigotas de concreto, com inclinação de 23% e platibandas de 0,40 m para conformação do telhado verde. Portanto, a célula de teste com cobertura verde ficou com pé-direito máximo de 2,86 m e mínimo de 2,54 m (Fig. 10). Já a segunda célula foi apenas limpa e teve as telhas cerâmicas reorganizadas sobre o madeiramento. Nessa célula, o pé-direito é de 2,40 m com laje forro plana e telhado com inclinação de aproximadamente 26% (Fig. 11), e optou-se por manter as pequenas aberturas existentes entre o telhado cerâmico e a laje (ático), ou seja, com circulação de ar permanente (Fig.12). Esta célula de teste pode ser considerada convencional, pois apresenta o sistema de cobertura amplamente utilizado na construção civil brasileira.

Figura 12 - Aberturas no ático da célula convencional. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

A cobertura verde é composta pela grama, um substrato com terra vegetal, uma manta de drenagem e uma camada de impermeabilização. Este conjunto foi colocado sobre a laje inclinada (Fig. 13).

Figura 13 - Desenho esquemático de uma cobertura verde (adaptado para o português). Fonte: Cardoso, G. T.; Vecchia, F. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. *Journal of Construction Engineering*, v.1, n.1, p.1-7, jan. 2013.

Embora a construção deste tipo de cobertura seja simples, o sistema de drenagem e a vedação devem ser escolhidos e executados com rigor de qualidade. A cobertura verde

foi projetada para ter um peso próprio equivalente ao peso de um sistema de telhado convencional com estrutura de madeira e telhas cerâmicas (Cardoso; Vecchia, 2013). A impermeabilização desta cobertura verde foi feita com a resina poliuretana derivada de óleo de mamona (*Ricinus communis*), desenvolvida pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (GQATP) do Instituto de Química de São Carlos-USP, e comercializado pela Cequil - Central Ind. Des. Polímeros Ltda., empresa localizada na cidade de Araraquara-SP. A utilização dessa resina na impermeabilização tem grande relevância, pois é um material biodegradável e não tóxico, ou seja, não causa danos ao meio ambiente e à saúde, além ser originário de um recurso renovável, contribuindo para uma construção sustentável (Cardoso; Claro Neto; Vecchia, 2012). O geocomposto MacDrain 2L utilizado para drenagem do substrato (parceria com Maccaferri do Brasil Ltda.), é leve e flexível: o núcleo é uma geomanta tridimensional composta de filamentos de polipropileno, com espessura de 10 a 18 mm, e filtros geotêxteis em seus dois lados, não tecidos à base de poliéster. Para drenagem da água da cobertura verde foram colocados dois tubos de PVC de 7,62 cm (3") na platibanda mais baixa, próximos às extremidades da cobertura. Como componente vegetal foi utilizada a grama-batatais (*Paspalum notatum*), também conhecida como grama-comum e grama de pasto, pois é resistente à ação da luz solar e ao pisoteamento.

5.1.2. Etapas da reforma da célula de teste com cobertura verde

Como dito anteriormente, a célula de teste com cobertura verde foi feita a partir da reforma de uma célula com telhado cerâmico sem laje. Esse foi o motivo pela qual se optou por essa célula, já que a ausência de uma laje forro facilitaria a construção de uma laje inclinada e geraria menos resíduo.

Para a reforma dessa célula foram gastos R\$ 1.928,47 entre mão de obra e materiais de construção. A resina poliuretana para impermeabilização foi doada pela empresa Cequil - Central Ind. Des. Polímeros Ltda. e a manta para drenagem pela Maccaferri do Brasil Ltda. Tanto a aplicação da resina quanto a colocação da manta MacDrain 2L foram realizadas pelos técnicos da Estação Climatológica do CCEAMA-EESC/USP. A colocação do substrato e da grama foram realizados por uma empresa contratada.

A primeira etapa desta reforma foi a retirada das telhas cerâmicas existentes (as que estavam em bom estado foram guardadas para serem reaproveitadas) e do madeiramento que dava suporte às telhas (Fig. 14 e 15).

Figura 14 - Retirada das telhas e do madeiramento existentes. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 15 - Célula de teste no início da reforma. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

O segundo passo foi a complementação de tijolos na fachada leste (lado da porta), conforme a Figura 16, montagem e concretagem da laje pré-moldada (Fig. 17) e construção das platibandas (Fig. 18).

Figura 16 - Colocação de tijolos-Fachada Leste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 17 - Montagem da nova estrutura. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 18 - Nova estrutura concretada. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Para finalizar a estrutura da cobertura verde e possibilitar a colocação do substrato e da vegetação, as platibandas foram rebocadas por dentro e pintadas de cor branco dos dois lados, e todo o telhado, inclusive as platibandas receberam a impermeabilização com a resina poliuretana e a manta MacDrain 2L. Depois da instalação da manta foram colocados o substrato (Fig. 19 e 20) e a vegetação (Fig. 21), no caso a terra e grama retirados de um local próximo ao canteiro experimental.

Figura 19 - Colocação da terra por máquina. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 20 - Conformação do substrato para receber a vegetação. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 21 - Irrigação da vegetação. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

5.1.3 Descrição dos termopares e da estação automática

Os termopares são amplamente utilizados em medições de temperaturas elevadas e reduzidas, dentro de um intervalo de 1 a 1600 °C, como também em diferenças pequenas entre temperaturas (ANTUNES, 1966). A Figura 22 representa esquematicamente o

funcionamento de um termopar: quando dois metais distintos são soldados em uma das extremidades (A), mantida à temperatura T_A , que é diferente da temperatura na extremidade não soldada (B), é possível medir o potencial elétrico entre os dois metais, fenômeno conhecido por *Efeito Termoelétrico*. O bipolo formado pelos dois metais possui na extremidade não soldada, mantida a uma temperatura T_B , os terminais acessíveis, e na outra extremidade soldada, em temperatura T_A , um gerador. Esse sistema depende, de modo geral, da diferença entre as temperaturas das extremidades (T_A e T_B), que é chamada de Força Eletromotriz (f.e.m.) termoelétrica (ANTUNES, 1966).

Figura 22 - Representação esquemática do funcionamento do termopar. Fonte: ANTUNES (1966).

Os dados de temperatura superficial interna e de bulbo seco das células de teste foram coletados por meio de termopares tipo T de cobre-constantan (liga metálica de cobre e níquel), 2x24 AWG, com medições em intervalos de 30 minutos, registrados e armazenados por um datalogger CR10X, o que garantiu resolução suficiente para as análises requeridas nesta investigação em escala microclimática.

Os termopares Tipo T são resistentes à corrosão em ambientes úmidos e são indicados para medições de temperatura do ar, pois sua faixa de aplicação é entre - 270 e 400 °C, além de oxidarem em determinados ambientes somente acima de 370 °C. Este tipo de termopar é constituído por um termoelemento positivo com Cu100% e um termoelemento negativo com Cu55%Ni45% (constantan). A força eletromotriz (f.e.m.) produzida é de -6,258mV a 20,872 mV. A acurácia dos termopares é significativa, ou seja, as temperaturas são medidas com erro de $\pm 0,1$ a $0,2$ °C, desde que os termopares estejam em perfeitas condições de uso e aplicação (KINZIE, 1973). Apesar das medições experimentais terem sido feitas com a precisão da unidade centesimal, optou-se por apresentar números arredondados, segundo a "Teoria dos erros" (VUOLO, 1992), para melhor percepção do real.

Para a coleta e armazenamento de dados das variáveis climáticas foram utilizados os equipamentos que compõem a estação meteorológica automática da empresa Campbell Scientific Inc. Outros equipamentos fazem parte da estação automática para mantê-la em

funcionamento, como bateria recarregável de 12V, painel solar e um datalogger CR10X exclusivo e configurado para as necessidades da estação.

Os termopares foram calibrados colocando-os em recipiente com gelo para verificação da temperatura antes das instalações nas células de teste, e monitorados periodicamente com termômetro de infravermelho digital com mira a laser durante o período de coleta de dados.

Todas as medições nas células de teste foram realizadas com as portas e janelas fechadas para verificação das temperaturas sem a influência do fluxo de ar nos registros coletados.

5.1.4. Instalação dos sensores de temperatura

A Figura 23 é referente à planta baixa esquemática das células de teste com as indicações dos cortes AA e BB, que serão apresentados, respectivamente, para mostrar as localizações dos sensores de temperatura de bulbo seco e temperatura superficial interna de uma das paredes.

Figura 23 - Planta baixa esquemática das células de teste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Para avaliar a temperatura interna do ar (TBS) os termopares foram instalados no centro das células, variando as alturas (0,10 m; 0,60 m; 1,10 m; 1,70 m e 2,10 m, a partir do piso). Essas alturas foram definidas exclusivamente para esta pesquisa, em caráter investigativo, de maneira que os sensores ficassem bem distribuídos e contemplassem a área comumente chamada de "zona habitada", pois é a região da edificação onde acontecem as atividades dos usuários. Outros dois sensores foram incluídos nessa avaliação: um sensor para temperatura superficial interna do piso (TSI 32) e outro para a superfície do teto (TSI 14), de acordo com as Figuras 24 e 25. O objetivo de coletar dados em diferentes alturas no eixo central das células é visualização do gradiente vertical de temperatura interna do ar, sem a influência direta de uma parede específica. Conhecer e analisar a diferença entre os valores da temperatura interna do ar é de fundamental importância em estudos que envolvem a sensação de estresse térmico dos usuários dos ambientes interiores.

Figura 24 - Corte esquemático da célula com cobertura verde - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 25 - Corte esquemático da célula com telhas cerâmicas e laje - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

No total foram instalados cinco sensores para aquisição de dados de TBS, com abrigos feitos de tubos de PVC, cor branco, comprimento de 30 cm e 10,16 cm (4") de diâmetro, com aplicação de uma manta de material plástico e superfície metalizada (*foil*) para melhor isolamento dos termopares (Fig. 26). Apesar de todos os abrigos conterem um *cooler* para ventilação forçada, optou-se por mantê-los desligados, pois como as medições foram feitas em ambientes internos, ou seja, sem a incidência direta da radiação solar, a utilização ou não desses dispositivos não afetaria as medições de temperatura de bulbo seco (ver Apêndice I). Outra razão foi devido ao sistema de energia para manter a ventilação forçada dos abrigos estar disponível em outra célula do canteiro experimental, distante das construções analisadas e por isso eram necessárias extensões externas, que comumente não funcionavam, pois ficavam expostas às intempéries e foram cortadas uma vez por funcionários, enquanto faziam a manutenção do gramado do canteiro.

Figura 26 - Interior da célula de teste com telhas cerâmicas - Sensores de temperatura de bulbo seco (TBS) e alguns sensores de temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Para as medições da temperatura superficial interna (TSI) nas paredes das duas células de teste foram instalados, no eixo central de cada envoltivo, outros dois sensores em alturas diferentes: 1,10 m e 1,70 m a partir do piso, conforme corte esquemático da cobertura verde na Figura 27. No total foram instalados 8 sensores para coleta das temperaturas superficiais internas das paredes.

Figura 27 - Corte esquemático da célula com cobertura verde - Sensores de temperatura superficial interna (TSI) para parede Leste. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Além desses sensores de temperatura de bulbo seco e de temperatura superficial interna das paredes, outros termopares foram instalados para coleta de dados de temperatura superficial interna na laje inclinada da cobertura verde e na laje horizontal da célula com telhas cerâmicas, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Esquema da Planta Interna de Cobertura das células- Sensores de temperatura superficial interna (TSI). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

A distribuição espacial dos termopares sobre essas superfícies partiu do ponto central, representado pelo sensor TSI 14, e foram traçados quatro eixos principais: dois perpendiculares entre si (longitudinal e transversal) e duas diagonais, que unem os cantos opostos dos dois sistemas de cobertura. Outros quatro eixos secundários foram traçados a 0,10 m das paredes, de maneira a coletar dados mais próximos a estas envolventes, sem que elas influenciassem nos registros. Alguns termopares foram instalados nas intersecções dos eixos primários com os secundários, e os demais posicionados equidistantes entre esses sensores e o central. A localização de cada sensor foi estabelecida pela própria pesquisadora em caráter investigativo e de forma que não sobrecarregassem as análises, visto que já era esperada uma grande quantidade de dados. No total foram instalados 17 sensores para coleta de dados de temperatura superficial interna dos sistemas de cobertura.

Com essa distribuição dos sensores na superfície interna das lajes, pretendeu-se a espacialização da medição e verificação da existência de diferenças significativas entre os valores de temperatura dos pontos.

Todos os termopares instalados nas superfícies foram colocados de maneira simples, com um pequeno furo na superfície para encaixar a ponta do sensor, e recobertos com pasta térmica para evitar interferências nos registros de dados (Fig. 29).

Figura 29 - Instalação de sensor de temperatura superficial interna (TSI) com pasta térmica (indicado pelo círculo vermelho). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

5.1.5. Análise climática da série de dados

De acordo com Monteiro (1973), o clima da região central do Estado de São Paulo é controlado por massas de ar equatoriais e tropicais, que configuram dois períodos diferentes: uma estação seca com inverno quente e seco, entre os meses de abril e setembro, e a estação chuvosa com verão úmido e quente, no período de outubro a março. Na estação seca predominam sobre a região as massas de ar Tropical Atlântica (mTa) e Polar Atlântica (mPa); esta estação é caracterizada pela baixa precipitação, pouca nebulosidade, baixa umidade relativa e temperaturas médias menores quando comparadas ao período chuvoso. A estação chuvosa apresenta temperaturas médias elevadas com precipitações abundantes e alta umidade relativa do ar, com predomínio da massa Equatorial Continental (mEc).

Neste trabalho, o regime climático da cidade de Itirapina-SP foi analisado na forma de episódios representativos, de acordo com a adaptação de Vecchia (1997) da definição de Tipos de Tempo de Monteiro (1969), que apresenta duas etapas básicas: Pré-Frontal, com o início do processo, expressa pelo prenúncio e avanço de uma massa de ar Polar Atlântica, e a Pós-Frontal, etapa final deste processo, representada pelas das fases de domínio e transição ou tropicalização da massa de ar polar. A partir do reconhecimento dos episódios climáticos registrados durante o período de coleta de

dados, por meio das análises das variáveis meteorológicas e confirmação com as imagens de satélite, foram extraídos dois dias típicos experimentais, um para condições de calor, ou seja, máxima radiação solar, maior temperatura externa e céu limpo, e outro para condições de domínio da mPa, que apresentou o menor valor para radiação solar global e temperatura externa do ar, mas aumento da umidade relativa e nebulosidade, sem precipitação. As duas situações climáticas, representadas pelos dias típicos experimentais escolhidos, são primordiais para comparações de desempenho térmico e compreensão da influência da radiação solar sobre o ambiente construído.

Os dados coletados são referentes ao período de janeiro a abril de 2013. Desse período foi selecionado o episódio climático registrado no mês de março e também foram extraídos os dois dias típicos experimentais, tendo como referência os valores de radiação solar e temperatura máxima das Normais Climatológicas 1960 - 1991 (1992).

No capítulo seguinte serão apresentadas as aplicações dos procedimentos metodológicos, utilizando o conceito de tipos de tempo para definição do episódio climático a ser analisado.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Análise do período coletado

Conforme exposto na Metodologia, o episódio representativo selecionado para análise é mostrado no período de monitoramento das flutuações do tempo meteorológico entre os dias julianos 58 a 83 (27/02/2013 à 24/03/2013).

Na definição do episódio representativo de estudo foram avaliados os dados das principais variáveis climáticas deste período por meio de gráficos, para identificação das etapas Pré e Pós frontais, com confirmação da passagem da frente fria no Estado de São Paulo a partir da análise sinótica e imagens do satélite GOES 13 (Geostationary Operational Environmental Satellite), fornecidos pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC-INPE) (Fig. 30). Em virtude do tamanho excessivo dos arquivos contendo as imagens de satélite, optou-se pela apresentação de apenas cinco delas, mostradas de forma sequencial, objetivando uma melhor visualização e entendimento do movimento da massa polar sobre o Sudeste brasileiro, e a razão das escolhas dos dias típicos experimentais para as análises propostas nesta pesquisa.

Dia 04/03/2013: radiação solar máxima do período, céu claro e sem precipitação.

Dia 08/03/2013: Etapa Pré-frontal – Fase de Prenúncio da mPa. Aumento da pressão atmosférica, da nebulosidade, mas sem precipitação.

Dia 09/03/2013: Etapa Pré-frontal – Fase de Avanço da mPa. Queda da pressão atmosférica, aumento da nebulosidade e precipitação

Dia 19/03/2013: Etapa Pós-frontal – Fase de Domínio da mPa : Aumento da pressão, da umidade, da nebulosidade, mas sem precipitação, e queda da temperatura externa do ar.

Dia 23/03/2013: Etapa Pós-frontal – Fase de Transição para mTa ou Tropicalização: Aumento da temperatura do ar, diminuição da umidade e céu limpo.

Figura 30 – Análise rítmica do período de 27/02 à 24/03/2013 com algumas variáveis e indicação das etapas da atuação da massa Polar Atlântica sobre a região. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Analisando as informações da Figura 30, identificou-se o episódio climático que teve início por volta do dia 08 de março com a Fase de Prenúncio da chegada da massa polar Atlântica (mPa), quando houve um aumento da pressão atmosférica, da nebulosidade, mas nenhuma precipitação foi registrada pela estação automática. Na Fase de Avanço da mPa, entre os dias 09 e 12 aproximadamente, torna-se notável o aumento da nebulosidade, seguida de precipitação, mas com queda na pressão atmosférica. Na sequência destes eventos, a massa polar estaciona temporariamente sobre a região em questão, modificando as condições locais do clima na Fase de Domínio (13 à 21/03), com diminuição da temperatura e aumento da umidade relativa do ar, aumento da nebulosidade, mas sem precipitação, e consequentemente diminuição da radiação solar global incidente. A partir do dia 21/03, a mPa começa a perder força na região pelo seu afastamento e a massa tropical, mais quente, volta a predominar na Fase conhecida como Transição ou Tropicalização (INPE, 2014).

Após a visualização dos fenômenos atmosféricos ocorridos no período coletado, selecionou-se os dias representativos experimentais de acordo com a metodologia. O dia 4 de março (dia juliano 63) foi escolhido como representativo para situação de predomínio da mTa, devido à sua característica de notável calor neste período monitorado, superando o valor de 27 °C, que corresponde à média das temperaturas máximas para a região São Carlos de 1961 a 1990, e está presente nas Normais Climatológicas publicadas pelo Ministério da Agricultura (1992). A amplitude térmica registrada nesse dia foi 14 °C, com temperatura mínima de 18 °C e máxima de 32 °C. O dia foi de céu limpo, com valores da radiação solar global atingindo 779 W/m². Para o dia típico experimental de domínio da mPa foi escolhido 19 de março (dia juliano 78), pois apresentou menor valor de radiação solar global (256,5 W/m²), menores valores para a temperatura externa do ar (máxima de 20,5 °C e mínima de 15,5 °C) e, consequentemente, menor amplitude térmica (5 °C), aumento da umidade relativa, alta nebulosidade, mas sem precipitação.

Conhecendo-se as condições meteorológicas do período de coleta, iniciou-se a análise dos dados de temperaturas superficiais internas (TSI) e de bulbo seco (TBS), para posterior discussão sobre a distribuição espacial térmica, conforme proposto na metodologia.

A seguir serão apresentados os resultados das principais análises comparativas entre os desempenhos térmicos da cobertura verde e do telhado convencional em relação às temperaturas de bulbo seco (TBS) e às temperaturas superficiais internas (TSI) das lajes

para o dia típico experimental de calor (04/03/2014). Outra duas análises foram realizadas para comparação entre os dois dias típicos experimentais para cada célula de teste, com o objetivo de visualização da influência da radiação solar sobre o ambiente interno das células, levando em consideração apenas um sensor de cada superfície e um para temperatura interna do ar. Nestas análises foram escolhidos os sensores das paredes e de bulbo seco a 1,70 m do piso, e os sensores centrais do teto e do piso. Os dados referentes às temperaturas superficiais das paredes foram comparados a fim de servirem de suporte à estas análises e se encontram no Apêndice II.

6.2. Análises dos dados para cobertura verde e telhado cerâmico convencional

6.2.1. Temperaturas de Bulbo Seco (TBS)

A Figura 31 e a Tabela 2 são referentes aos dados das célula com cobertura verde e mostram a variação diária das temperaturas de bulbo seco e temperaturas superficiais internas do piso e do teto, no eixo central do ambiente interno para o dia 04/03/2013, a situação de maior calor do período.

Figura 31 – Gráficos para temperatura de bulbo seco para célula com cobertura verde - Dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 2 – Valores de temperaturas de bulbo seco para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários)

Indicadores		Ar externo	TSI 32 (PISO)	TBS 01 (h=0,1m)	TBS 02 (h=0,6m)	TBS 03 (h=1,10m)	TBS 04 (h=1,70m)	TBS 05 (h=2,10m)	TSI 14 (h=2,70m)
Temp.	Máx.(°C) (hora)	32 (16h)	26 (18h30)	29 (16h30)	29,5 (17h)	30 (17h)	30 (17h30)	30 (17h30)	28,5 (17h30)
	Mín.(°C) (hora)	18 (6h30)	21,5 (7h)	20,5 (7h)	21 (7h)	21 (7h)	21 (7h)	21 (7h)	23 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	4,5	8,5	8,5	9	9	9	5,5

Com relação aos dados da cobertura verde, os sensores localizados na chamada "área habitada", ou seja, a 1,10 m e 1,70 m a partir do piso, e também o sensor posicionado a 2,10 de altura, registraram as maiores temperaturas máximas, 30 °C, e as maiores amplitudes térmicas, 9 °C; já os sensores mais próximos do piso, a 0,10 e 0,60 m (TBS 01 e 02, respectivamente) tiveram amplitudes térmicas um pouco menores, aproximadamente 8,5 °C. O sensor do piso, seguido do sensor instalado no teto, tiveram as menores temperaturas máximas e as menores amplitudes térmicas, em relação à

temperatura externa do ar. A diferença entre a temperatura externa do ar e o sensor do teto (TSI 14) foi 3,5 °C, enquanto que entre a temperatura externa do ar e os sensores a 1,10 m, 1,70m e 2,10 m (TBS 03, TBS 04 e TBS 05, respectivamente) foi aproximadamente 2 °C. As análises realizadas a partir das comparações entre os sensores de temperatura de bulbo seco revelaram que o gradiente térmico vertical é praticamente uniforme (Fig. 32 e 33).

Figura 32 - Diferenças entre temperaturas máximas registradas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com cobertura verde - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 33 - Diferenças entre temperaturas mínimas registradas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com cobertura verde - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Para a célula de teste com telhado cerâmico foram elaborados o gráfico da Figura 34 e a Tabela 3 para melhor visualização dos dados.

Figura 34 – Gráficos para temperatura de bulbo seco para célula com telhado cerâmico - Dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 3 – Valores de temperaturas de bulbo seco para célula com telhado cerâmico e ambiente externo (respectivos horários)

Indicadores		Ar externo	TSI 32 (PISO)	TBS 01 (h=0,1m)	TBS 02 (h=0,6m)	TBS 03 (h=1,10m)	TBS 04 (h=1,70m)	TBS 05 (h=2,10m)	TSI 14 (h=2,40m)
Temp.	Máx.(°C) (hora)	32 (16h)	26 (18h)	28,5 (17h)	29,5 (17h30)	30 (17h30)	30 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	22 (8h)	21 (6h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	4	7,5	8,5	9	9	9,5	9,5

No caso da análise para a célula convencional, o sensor do piso (TSI 32) teve a menor amplitude térmica (4 °C) em comparação a todos os outros sensores. Os sensores a 1,10 m (TBS 03) e 1,70 m (TBS 04) registraram amplitudes térmicas de 9 °C, enquanto que os sensores a 2,10 m (TBS 05) e o do teto (TSI 14) tiveram as maiores amplitudes térmicas entre todos os sensores, aproximadamente 9,5 °C. Isso mostra que o gradiente vertical de temperaturas nesta célula de teste não é uniforme, já que os valores de

temperatura máxima aumentaram conforme a proximidade do sistema de cobertura. As temperaturas máximas tiveram maior diferença entre os sensores do piso e do teto, e entre o piso e o sensor a 2,10 m (TBS 05), ambos valores de 4,5 °C. Com relação às temperaturas mínimas, todos os sensores de bulbo seco e o sensor do teto registraram 1 °C a menos que o sensor do piso (Fig. 35 e 36).

As diferenças entre a temperatura externa do ar e os sensores da “área habitada”, ou seja, a 1,10 m (TBS 03) e 1,70 m (TBS 04), foram 2 °C, e em comparação com o valor coletado pelo sensor do teto (TSI 14), a temperatura do ar externo foi 1,5 °C maior.

Figura 35 - Diferenças entre temperaturas máximas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com telhado cerâmico - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 36 - Diferenças entre temperaturas máximas pelos sensores no eixo vertical central da célula de teste com telhado cerâmico - Dia 04/03/2013. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Na comparação dos desempenhos térmicos das duas células de teste, os sensores do piso (TSI 32) tiveram as menores temperaturas máximas em relação a todos os outros sensores. Os sensores localizados a 0,60 m, 1,10 m e 1,70 m de altura registraram temperaturas máximas e mínimas iguais nas duas células de teste, portanto, amplitudes térmicas idênticas. No caso dos sensores a 2,10 m de altura, ou seja, mais próximos dos respectivos tetos, o termopar da célula com cobertura verde apresentou temperatura máxima 0,5 °C menor que a do mesmo sensor na célula convencional, mas as temperaturas mínimas foram semelhantes. Por este motivo as amplitudes térmicas registradas por estes sensores também foi 0,5 °C de diferença. Para finalizar, o sensor instalado no teto da célula com cobertura verde registrou temperatura máxima 2 °C menor que o sensor do teto da outra célula e, também, registrou temperatura mínima 2 °C maior. Por isso, a amplitude térmica do sensor do teto (TSI 14) na célula com cobertura verde foi 4 °C menor que a amplitude registrada pelo mesmo sensor na célula convencional.

6.2.2. Temperaturas Superficiais Internas (TSI) - Sistemas de cobertura

A análise principal sobre as temperaturas superficiais internas (TSI) está relacionada ao sistema de cobertura, para compreensão da espacialização da temperatura na superfície dos tetos sob a influência da radiação solar global, já que o sistema de cobertura é o elemento construtivo que recebe maior incidência de radiação.

Como explicado no capítulo sobre metodologia foram instalados 17 termopares na superfície interna da laje das duas células de teste, totalizando 34 sensores. Para facilitar a interpretação e análise dos dados coletados por esses sensores foram elaborados dois gráficos e suas respectivas tabelas, para cada uma das células: um para os sensores mais próximos das paredes, ou seja, os que estão localizados a 0,10 m de cada uma, e outro para os sensores mais internos, localizados nos pontos equidistantes entre os sensores próximos às paredes e o sensor central, sobre as linhas imaginárias (transversal, longitudinal e as duas diagonais). Em ambos os gráficos foram incluídos os dados do ponto instalado no centro.

Para a análise das temperaturas superficiais internas do teto da cobertura verde foram elaborados os gráficos da Figura 37 e as Tabelas 4 e 5. Para facilitar o entendimento proposto por esta análise, optou-se por gerar também uma imagem da planta de cobertura interna com o posicionamento dos termopares e suas respectivas temperaturas máximas e mínimas (Fig. 38).

Figura 37 – Gráficos para temperaturas superficiais internas (TSI) do teto para cobertura verde (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 4– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para cobertura verde e ambiente externo – sensores mais internos (respectivos horários)

Indicadores		Ar ext.	TSI 09	TSI 10	TSI 11	TSI 13	TSI 14	TSI 15	TSI 17	TSI 18	TSI 19
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	29 (18h)	29 (17h30)	29,5 (17h)	28,5 (18h)	28,5 (17h30)	29 (17h)	28,5 (18h)	29 (17h)	29 (17h)
	Mín.(°C) (hora)	18 (6h30)	23 (7h)	23 (7h)	22,5 (7h)	23 (7h30)	23 (7h30)	23 (7h30)	22,5 (6h30)	22,5 (6h30)	22,5 (6h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	6	6	7	5,5	5,5	6	6	6,5	6,5

Tabela 5– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para cobertura verde e ambiente externo – sensores próximos às paredes (respectivos horários)

Indicadores		Ar ext.	TSI 06	TSI 07	TSI 08	TSI 12	TSI 14	TSI 16	TSI 20	TSI 21	TSI 22
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30 (17h30)	29,5 (17h30)	30 (17h)	29 (17h30)	28,5 (17h30)	30 (17h)	29 (17h30)	28,5 (17h30)	29,5 (17h)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	22,5 (6h30)	22,5 (7h30)	23 (7h)	22,5 (7h)	23 (7h30)	23 (7h30)	23 (7h)	23 (07:30)	22,5 (7h)
Amplitude Térmica (°C)		14	7,5	7	7	6,5	5,5	7	6	5,5	7

Figura 38 – Planta interna do teto com as temperaturas máximas e mínimas dos sensores de TSI para a cobertura verde (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Analisando a Figura 38 é possível visualizar a espacialização das temperaturas máximas e mínimas na superfície interna do teto da cobertura verde, para o dia experimental de calor.

O sensor central (TSI 14) registrou temperatura máxima menor que a maioria dos sensores, pois está posicionado o mais distante das quatro fachadas, já os demais sensores mais internos apresentaram temperaturas máximas um pouco menores se comparados aos sensores mais próximos às paredes.

No caso dos sensores mais externos, os termopares posicionados próximos às fachadas Norte e Oeste registraram temperaturas máximas um pouco maiores que os termopares voltados às paredes Sul e Leste, possivelmente devido à trajetória aparente do sol, que pode ter influenciado na incidência da radiação solar sobre a cobertura verde. No entanto, o sensor TSI 21 posicionado na parte mais baixa da laje inclinada, e no meio dos dutos de drenagem da cobertura verde, registrou temperatura máxima menor que os sensores posicionados nesta região da superfície interna do teto, provavelmente pode ter sido influenciada por um pequeno acúmulo de água próximo ao sensor TSI 21 durante o período analisado. Mas no geral a distribuição das temperaturas máximas e mínimas pode

ser considerada uniforme, já que as maiores diferenças entre todos os sensores de temperatura superficial não passaram de 1,5 °C e as amplitudes térmicas também tiveram pouca variação, e neste caso estes fatos não possuem um sentido físico, pois fugiriam à percepção de usuários em estudos de conforto térmico.

No caso da análise das temperaturas superficiais internas do teto da célula com telhado cerâmico foram elaborados os gráficos da Figura 39 e as Tabelas 6 e 7. Da mesma forma para a cobertura verde, também foi feita uma imagem da planta de cobertura interna com o posicionamento dos termopares e suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para facilitar o entendimento proposto por esta análise (Fig. 40).

Figura 39 – Gráficos para temperaturas superficiais internas (TSI) do teto para célula de teste convencional (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 6– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para célula de teste convencional e ambiente externo – sensores mais internos (respectivos horários)

Indicadores		Ar ext.	TSI 09	TSI 10	TSI 11	TSI 13	TSI 14	TSI 15	TSI 17	TSI 18	TSI 19
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h30)	30 (18h)	30 (18h)	30 (18h)
	Mín.(°C) (hora)	18 (6h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (07:30)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (8h)	20,5 (8h)
Amplitude Térmica (°C)		14	9,5	9,5	9,5	9	9,5	9	9	9	9,5

Tabela 7– Valores de temperaturas superficiais internas (TSI) para célula de teste convencional e ambiente externo – sensores próximos às paredes (respectivos horários)

Indicadores		Ar ext.	TSI 06	TSI 07	TSI 08	TSI 12	TSI 14	TSI 16	TSI 20	TSI 21	TSI 22
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (18h)	30,5 (18h)	30,5 (18h)	30,5 (18h)	30,5 (17h30)	30 (18h)	31 (17h30)	31 (17h30)	29,5 (18h30)
	Mín.(°C) (hora)	18 (6h30)	21 (8h)	21 (8h)	21 (8h)	21 (7h30)	21 (7h30)	21 (8h)	20,71 (7h30)	21 (7h30)	20 (8h)
Amplitude Térmica (°C)		14	9,5	9,5	9,5	9,5	9,5	9	10	10	9,5

Figura 40 – Planta interna do teto com as temperaturas máximas e mínimas dos sensores de TSI para a telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

A partir da análise da Figura 40, baseada nos gráficos e nas tabelas correspondentes aos dados de temperaturas superficiais do teto da célula convencional, é possível visualizar a espacialização das temperaturas máximas e mínimas nesta superfície, para o dia experimental de calor.

Na célula convencional a distribuição espacial das temperaturas superficiais do teto também foi uniforme, com variações de 0,5 a 1,5 °C entre as máximas de alguns sensores, mas estas diferenças não seriam perceptíveis no caso de um estudo que também envolvesse o conforto térmico. A existência do ático com ventilação permanente entre o telhado e a laje desta célula, garantiu esta condição de uniformidade entre as temperaturas

máximas, exceto pelo sensor TSI 22, que pode ter sofrido um pouco de oxidação durante o período de coleta de dados, por isso registrou temperaturas um poucos menores em relação aos demais sensores.

Nas duas células de teste a distribuição das temperaturas superficiais internas do teto foram uniformes, mas como era de se esperar os valores das máximas foram menores e os das mínimas maiores na cobertura verde, além dos sensores deste sistema de cobertura terem apresentado amplitudes térmicas bem menores que a temperatura externa do ar, aproximadamente 7 °C a menos, e em relação aos sensores da célula convencional, cerca de 2 °C. Este fato demonstra o melhor desempenho da cobertura verde, pelo fato de atrasar a entrada de calor ao ambiente interno durante o dia e principalmente diminuir a perda térmica pela irradiação noturna.

6.3. Comparações entre os dias típicos experimentais - Verificação da influência da radiação solar global

Para compreensão do desempenho térmico das duas células de teste em situações de calor e verificação da influência da radiação solar global sobre os ambientes internos, outras duas análises foram feitas, considerando-se apenas o sensor do piso, o sensor central do teto, os sensores a 1,70m de altura em cada parede e o sensor de bulbo seco também a 1,70 m a partir do piso, para os dois dias típicos experimentais selecionados, o dia 04/03/2013 com o predomínio da massa tropical e o dia 19/03/2013 para o domínio da massa polar Atlântica na etapa Pós-frontal.

Para a célula de teste com cobertura verde foram elaborados os gráficos da Figura 41 e as Tabelas 8 e 9 para visualização dos dados.

Figura 41 – Gráficos para comparações entre as temperaturas superficiais (teto, piso e paredes) e de bulbo seco a 1,70 m de altura da cobertura verde, para os dias 04/03/2013(Dia típico experimental de calor) e 19/03/2013 (Dia típico experimental de domínio de massa polar Atlântica). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 8– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários) –Dia típico experimental de calor (04-03-2013)

Local		Exterior	Cobertura Verde - Ambiente Interno						
Indicadores		Ar externo	TSI 32 (Piso)	TBS 04 (1,70m)	TSI 24 (Sul)	TSI 26 (Oeste)	TSI 28 (Norte)	TSI 30 (Leste)	TSI 14 (Teto)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	26 (18h30)	30 (17h30)	29,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h)	28,5 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	21,5 (7h)	21 (7h)	20,5 (7h)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	23 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	4,5	9	9	10	10	9,5	5,5

Tabela 9– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para cobertura verde e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de domínio da massa polar atlântica (19-03-2013)

Local		Exterior	Cobertura Verde - Ambiente Interno						
Indicadores		Ar externo	TSI 32 (Piso)	TBS 04 (1,70m)	TSI 24 (Sul)	TSI 26 (Oeste)	TSI 28 (Norte)	TSI 30 (Leste)	TSI 14 (Teto)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	20,5 (15h30)	20 (20h)	20 (17h)	20 (17h30)	20 (17h30)	20,5 (17h30)	20 (18h)	20 (18h)
	Mín. (°C) (hora)	15,5 (3h30)	18 (8h)	17 (7h)	17 (7h)	17 (7h)	17 (7h30)	17 (7h)	18 (7h)
Amplitude Térmica (°C)		5	2	3	3	3	3,5	3	2

Para colaborar com a visualização dos dados apresentados nas Tabelas 8 e 9, elaborou-se um desenho em perspectiva da volumetria da célula com cobertura verde, considerando apenas o interior para facilitar a compreensão da imagem, com os sensores e suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para os dois dias experimentais de estudo (Fig. 42 e 43).

Figura 42 - Perspectiva da célula com cobertura verde e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 43 - Perspectiva da célula com cobertura verde e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de domínio da mPa (19/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Analisando os dados de temperaturas máximas nesta célula de teste para o dia 04/03/2013, as paredes norte e oeste apresentaram os maiores valores (30,5 °C), seguidos da parede leste e do sensor de bulbo seco (30 °C). Já o sensor instalado na superfície voltada ao sul registrou o menor valor entre todas as paredes (29,5 °C), devido à trajetória aparente do sol. O menor valor coletado para temperatura máxima foi do sensor do teto (TSI 14), aproximadamente 28,5 °C, cerca de 1,5 °C menor que o valor registrado pelo sensor de bulbo seco. Esta análise mostra que a temperatura interna do ar é influenciada principalmente pelas superfícies que mais transmitem calor, fato que coloca em dúvida a aplicabilidade do cálculo de temperatura radiante média¹, já que o valor obtido não possui um sentido físico, já que não representa nada na realidade.

¹ A temperatura radiante média é definida como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme. O cálculo é feito por meio de uma equação que utiliza a temperatura registrada pelo termômetro de globo, a temperatura interna do ar e a velocidade do vento. A temperatura de globo é coletada por meio de um termômetro de mercúrio dentro de uma esfera metálica de cor preta, para se aproximar ao máximo de um corpo negro e absorver e emitir a máxima radiação (BRUEL & KJAER, 1996).

No caso das temperaturas mínimas, todas as paredes registraram valores iguais (20,5 °C), e o maior valor coletado foi pelo sensor do teto (TSI 14), o que mostra o melhor desempenho da cobertura verde em relação à perda de calor noturna.

No dia 19/03/2013 o predomínio das principais condições meteorológicas impostas pela massa polar Atlântica, ou seja, baixa incidência da radiação solar devido ao aumento da nebulosidade, queda da temperatura externa do ar e aumento da umidade relativa, praticamente nivelaram todas as temperaturas máximas e todas as temperaturas mínimas, como ilustra a Figura 43.

Para analisar a célula convencional foram elaboradas a Figura 44 e as Tabelas 10 e 11, que mostram os valores para as comparações entre os dias típicos experimentais.

Figura 44 – Gráficos para comparações entre as temperaturas superficiais (teto, piso e paredes) e de bulbo seco a 1,70 m de altura da célula convencional, para os dias 04/03/2013(Dia típico experimental de calor) e 19/03/2013 (Dia típico experimental de domínio de massa polar Atlântica). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 10– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para célula convencional e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de calor (04-03-2013)

Local		Exterior	Telhado Cerâmico - Ambiente Interno						
Indicadores		Ar externo	TSI 32 (Piso)	TBS 04 (1,70m)	TSI 24 (Sul)	TSI 26 (Oeste)	TSI 28 (Norte)	TSI 30 (Leste)	TSI 14 (Teto)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	26 (18h)	30 (17h30)	29,5 (17h30)	30,5 (17h30)	31 (17h30)	30 (17h30)	30,5 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	22 (8h)	21 (7h30)	20 (8h)	20 (8h)	20 (7h30)	20,5 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	4	9	9,5	10,5	11	9,5	9,5

Tabela 11– Valores de temperaturas superficiais internas do teto, piso, paredes (1,70 m) e de bulbo seco (1,70 m) para célula convencional e ambiente externo (respectivos horários) - Dia típico experimental de domínio da massa polar atlântica (19-03-2013)

Local		Exterior	Telhado Cerâmico - Ambiente Interno						
Indicadores		Ar externo	TSI 32 (Piso)	TBS 04 (1,70m)	TSI 24 (Sul)	TSI 26 (Oeste)	TSI 28 (Norte)	TSI 30 (Leste)	TSI 14 (Teto)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	20,5 (15h30)	20,5 (19h)	20 (18h)	20 (18h)	20 (18h)	20 (17h30)	20 (18h)	20 (18h30)
	Mín. (°C) (hora)	15,5 (3h30)	19 (7h30)	17 (7h)	16,5 (7h)	16,5 (7h30)	16,5 (7h30)	16,5 (7h30)	17 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		5	1,5	3	3,5	3,5	3,5	3,5	3

Da mesma maneira que foi feita para a cobertura verde, elaborou-se as Figuras 45 e 46 para melhor visualização dos dados apresentados nas Tabelas 10 e 11, o qual mostra uma perspectiva da volumetria da célula com telhado cerâmico, considerando apenas o interior com os sensores e suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para os dois dias experimentais de estudo.

Figura 45 - Perspectiva da célula com telhado cerâmico e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de calor (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Figura 46 - Perspectiva da célula com telhado cerâmico e os sensores analisados com suas respectivas temperaturas máximas e mínimas, para o dia típico experimental de domínio da mPa (19/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Na análise para o dia 04/03/2013, as temperaturas máximas registradas pelas paredes, pelo piso e de bulbo seco seguiram o mesmo padrão dos valores coletados na célula com cobertura verde, exceto pelo sensor do teto que, na célula convencional, apresentou temperatura máxima de 30,5 °C, aproximadamente 2 °C maior que o valor do sensor do teto da outra célula (28,5 °C). Esta diferença só não foi maior, pois a célula convencional possui um ático com ventilação permanente, fato que auxilia na diminuição da temperatura superficial interna do teto. Já os valores das temperaturas mínimas foram praticamente iguais, entre 20 e 21 °C, menos o sensor do piso, que apresentou mínima de 22 °C.

Para o dia 19/03/2013 a célula convencional registrou temperaturas máximas e mínimas semelhantes para todos os sensores, assim como o ocorrido com a célula de teste com cobertura verde.

Comparando os dados das duas células de teste para o dia típico experimental de calor, as temperaturas máximas e mínimas foram praticamente iguais para todos os sensores, com exceção dos sensores do teto (TSI 14), que registrou valor de temperatura máxima menor na célula com cobertura verde. Mas para o dia 19/03/2013, considerado o

dia típico experimental de domínio da massa polar Atlântica, as duas células de teste tiveram desempenhos térmicos idênticos. Novamente este fato comprova a importante influência que a radiação solar global incidente exerce sobre os ambiente internos.

7. CONCLUSÃO

Quando esta investigação foi iniciada, buscou-se analisar os dados registrados pelos termopares em cada célula de teste, com a finalidade de se conhecer melhor a distribuição térmica nestes ambientes internos. No entanto, a similaridade nos dados mostrou que a distribuição espacial das temperaturas superficiais em cada um dos ambientes foi praticamente uniforme, ou seja, as diferenças entre os 17 pontos de sensores instalados nos tetos foram pequenas entre si. O mesmo aconteceu com as temperaturas de bulbo seco, que também registraram diferenças pouco significativas entre os cinco sensores em cada uma das células. Apesar disso, a distribuição dos sensores nos dois ambientes internos utilizados e a quantidade de dados coletados proporcionaram grande número de análises comparativas de desempenho térmico, sem encerrar outras possibilidades de trabalho sobre este assunto, o que evidencia a riqueza de estudos a serem realizados a partir da investigação iniciada nesta pesquisa.

Dessa forma foi possível definir diretrizes para coleta de temperaturas internas. Para medições de temperaturas superficiais internas (TSI), qualquer ponto pode ser considerado, desde que as superfícies sejam uniformes, e os sensores estejam protegidos por pasta térmica. No caso de medições de temperaturas de bulbo seco é importante que os sensores estejam inseridos em abrigos experimentais termicamente isolados (como descritos da pesquisa), e equidistantes das superfícies que poderão influenciar os dados coletados, como por exemplo paredes expostas às fachadas norte e oeste (Hemisfério Sul). Neste tipo de medição também é necessário verificar todas as possíveis influências que poderão ocorrer durante este processo, como por exemplo a ventilação ou os hábitos dos usuários, já que nesta pesquisa a única variável controlada e avaliada foi a temperatura nas duas células de teste fechadas. A altura para instalação dos sensores de bulbo seco poderá ser variável, pois dependerá do objeto de estudo investigado em cada pesquisa, o que contradiz as especificações das normas mencionadas no trabalho.

Para os dois tipos de medição também é necessário respeitar as seguintes diretrizes: os sensores devem estar protegidos da incidência da radiação solar direta e os requisitos para instalação e manutenção dos termopares precisam ser seguidos, de acordo com cada fabricante.

Respeitadas todas estas questões para coleta de dados de temperaturas internas e, a reprodução dos procedimentos metodológicos será possível em outros estudos experimentais, sejam eles em células de teste, em protótipos, ou também em ambientes já

ocupados. Mas as condições meteorológicas e de entorno deverão ser semelhantes às descritas neste trabalho.

Por este motivo é importante conhecer o ritmo habitual dos processos atmosféricos na região de estudo, para que as análises de desempenho e conforto apresentem resultados coerentes com a situação real do local, considerando sempre a radiação solar como principal fator desencadeador dos processos de trocas térmicas entre ambientes interno e externo, e não a temperatura externa do ar.

Portanto, este trabalho contribui de maneira significativa para futuros estudos na área da climatologia dinâmica aplicada ao ambiente construído.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS²

ADELARD, L.; BOYER, H.; GARDE, F.; GATINA, J. C. A detailed weather data generator for building simulations. *Energy and Buildings*, 31, p. 75–88, 2000.

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

ANDREASI, W. A. Avaliação do impacto de estratégias bioclimáticas na temperatura interna de edificações no Passo do Lontra, Pantanal do estado de Mato Grosso do Sul. 2001. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

ANTUNES, A. A. N. *Propriedades da Matéria*. L. P. M., 1966. 151p.

AROSZTEGUI, J. Exigencias mínimas de habitabilidad Térmica. In: I ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1, 1990, Gramado. *Anais...* Gramado: ENCAC, 1990. p. 121-125.

_____ Ayuda al proyectista em sus decisiones tempranas para uma arquitectura termicamente comfortable. In: ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2, 1993, Florianópolis. *Anais...* Florianópolis: ENCAC, 1993. p. 37-42.

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.

_____ *NBR 15575-1*. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

AYATA, T.; TABARES-VELASCO, P. C.; SREBRIC, J. An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup. *Building and Environment*, 46, p. 1851-1861, 2011.

² De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BARBOSA, M. J. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares. 1997. 274 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Produção e Sistema, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

BARBOSA, M. J.; LAMBERTS, R. Uma metodologia para especificar e avaliar o desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares, aplicada a Londrina – PR. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 15-28, jan./mar. 2001.

BARBOSA, M. J.; WEILLER, G. C.; LAMBERTS, R. Disposição dos equipamentos para medição da temperatura do ar em edificações. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 89-108, jul./set. 2007.

BRASIL. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. *Infoclima*. Disponível em: <<http://infoclima1.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 18 de jul. de 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. *Normais climatológicas (1961-1990)*. Brasília: Departamento Nacional de Meteorologia, 1992.

BRUEL & KJAER. *INNOVA AirTech Instrument: The Booklet of the Introduction to Thermal Comfort*, 1996, 32 pp. Disponível em: <<http://www.innova.dk>>. Acesso em: 18 de ago. de 2011.

CARDOSO, G. T; CLARO NETO, S.; VECCHIA, F. Rigid foam polyurethane (PU) derived from castor oil (*Ricinus communis*) for thermal insulation in roof systems. *Frontiers of Architectural Research*, v.1, n. 4, p. 348–356, dez. 2012.

CARDOSO, G, T.; VECCHIA, F. Thermal Behavior of Green Roofs Applied to Tropical Climate. *Journal of Construction Engineering*, v.1, n.1, p.1-7, jan. 2013

CORBELLA, O.; YANNAS, S. *Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental*. Rio de Janeiro, Revan, 2003, 287 p.

CUNHA, D. G. F.; VECCHIA, F. As abordagens clássica e dinâmica de clima: uma revisão bibliográfica aplicada ao tema da compreensão da realidade climática. *Ciência e Natura*, UFSM, 29 (1). p. 137-149, 2007.

DENCKER, K. C. G. L.; LAMBERTS, R. Monitoração de temperatura e umidade em duas residências localizadas na cidade de Manaus na estação de “inverno regional”. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: ANTAC, 2005.

DOCHERTY, M.; SZOKOLAY, S. V. *Climate analysis*. Brisbane, PLEA: Passive and Low Energy Architecture International, University of Queensland Printery, 1999. 57 p.

EGAN, M. D. *Concepts in thermal comfort*. New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1975, 203 p.

FARIA, J. R. G.; KANEKO, P. M. Análise térmica das salas de aula do campus da UNESP – Bauru. In: ENCONTRO NACIONAL, 6., e ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 3., 2001, São Pedro. *Anais...* São Pedro: ANTAC, 2003.

FREITAS, R. O que é conforto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. *Anais...* Maceio: COTEDI, 2005.p. 726-735.

GIVONI, B.; VECCHIA, F. Predicting thermal performance of occupied houses. In: THE 18th CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2001, Florianópolis, Brazil. *Anais...* Florianópolis: PLEA, 2001.

GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S. Arquitetura sustentável: uma integração entre ambiente, projeto e tecnologia em experiências de pesquisa, prática e ensino. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 51-81, out./dez. 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities*.1998.

LOUREIRO, C. Incidência de variáveis de projeto sobre o desempenho térmico de habitações de interesse social no Estado de Pernambuco. In: I ENCONTRO NACIONAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1, 1990, Gramado. *Anais...* Gramado: ENCAC, 1990. p. 45-51.

KINZIE, P. A. *Thermocouple Temperature Measurement*. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1973.

MONTEIRO, C. A. F. A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada Sul Oriental do Brasil: estudo geográfico sob forma de atlas. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1969.

_____. Análise rítmica em Climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho. *Climatologia*, São Paulo, n. 1, p. 1-21, 1971.

_____. *A dinâmica climática e as chuvas no Estado de São Paulo: estudo geográfico sobre a forma de atlas*. São Paulo: Instituto de Geografia- USP, 1973.

_____. *Clima e Excepcionalismo: Conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1991.

MORAIS, C; RORIZ, M. Comparação entre desempenhos térmicos de cobertura ajardinada e laje comum em guaritas. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBI-ENTE CONSTRUÍDO, 7; CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES,2,2003, Curitiba. *Anais...* Curitiba: COTEDI, 2003. v.1, p. 361-368.

MORILLÓN, D. *Impacto del cambio ambiental global en el sector residencial*. 1999. Instituto de Ingeniería. UNAM, México. Disponível em: <<http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/508/impacto.pdf> >. Acesso em: 05 de out. de 2014.

OLGYAY, A.; OLGAY, V. *Solar Control and Shading Devices*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1957. p. 201.

OLGYAY, V. *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas*. Barcelona: Gustavo Gili S. A., 1998. 203 p.

OLIVEIRA, M. M. F.; ARAÚJO, V. M. D.; PEDRINI, A.; MARINHO, G. S. Análise das propriedades termofísicas e dos desempenhos térmicos de sistemas construtivos. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: COTEDI, 2005. p. 1358-1366.

OKE, T. R. *Boundary Layer Climate*. 2nd ed. New York: Routledge, 1987.

PÉDELABORDE, P. *Introduction a l'étude scientifique du Climat*. Paris, Société d'Édition d'Enseignement Supérieur, 1970.

PERALTA, G.; SICHIERI, E.; FERREIRA, O. P. Análise do comportamento térmico da telha de material reciclado e telha de aço em episódio climático. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8; ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4, 2005, Maceió. *Anais...* Maceió: COTEDI, 2005. p. 1455-1460.

POVEDA, G.; WAYLEN, P. R.; PULWARTY, R. S. Annual and inter-annual variability of the present climate in northern South America and southern Mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234, p. 3-27, 2006.

SAITO, C. Avaliação de desempenho térmico de sistemas tradicionais de alvenarias e coberturas. 2009. 198 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2009.

SANTOS, W. N. et al. Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 14, nº 5, p. 354-359, 2004.

SILVA, A. C; VECCHIA, F. A. S. Clima e desempenho térmico de habitações em San Antonio de Los Baños, Cuba. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7; CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 2, 2003, Curitiba. *Anais...* Curitiba: COTEDI, 2003.v.1, p. 401-408.

SILVEIRA, L. M. Os sistemas atmosféricos e a variação do tempo em Maringá, estado do Paraná, Brasil. *Acta Sci. Technol*, 28, p. 79-84, 2006.

SORRE, M. *Les fondements de La Géographie Humaine: Les fondements biologiques, Essai d'une écologie de l'homme*, Tomo I. Paris: Librairie Armand Colin, 1951. 448 p.

STEINKE, E. T. *Climatologia fácil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 144 p.

VECCHIA, F. A. S. Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada ao conforto humano. 1997. 329 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

_____. *Comportamento térmico de sistema de cobertura*. São Paulo: Eternit S.A., 2003. v.01, 74 p.

VUOLO, J. H. *Fundamentos da teoria de erros*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo, SP. 2a Ed. 1992.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Understanding climate*. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/themes/climate/understanding_climate.php>. Acesso em: 15 de ago. de 2011.

ZAVATTINI, J. A. A produção brasileira em climatologia: o tempo e o espaço nos estudos do ritmo climático. *Terra Livre*, 20, p. 65-100, 2003.

APÊNDICE A

Verificação da contribuição da ventilação forçada aos abrigos

Este anexo foi destinado à verificação da interferência ou não da ventilação forçada, exercida pelos *coolers*, na aquisição de dados de temperatura interna do ar (bulbo seco) pelos termopares instalados dentro de abrigos de PVC revestidos com manta *foil*.

Este procedimento foi realizado logo após a instalação de todos os sensores nas células teste, para comprovar se seria realmente necessário manter a ventilação forçada por meio de *coolers* nos abrigos dos termopares.

Portanto, para esta verificação foram comparados os dados de temperatura de bulbo seco registrados pelo sensor TBS 03 (com *cooler*) e o sensor TBS 31(sem *cooler*), entre os dias julianos 313 e 317 de 2012, que correspondem ao período de 08 e 12 de novembro de 2012 (Fig. 47).

Figura 47 - Gráfico das temperaturas de bulbo seco registrados pelos sensores TBS 03 (com *cooler*) e TBS 31 (sem *cooler*) - entre os dia 08 e 12/11/2012. Fonte: Arquivo pessoal da autora.

O gráfico da Figura 47 mostra que as temperaturas dos sensores TBS 03 e TBS 31 foram idênticas, ou seja, não houve variação entre os valores registrados pelos dois sensores.

APÊNDICE B

Análises das principais comparações entre as temperaturas superficiais internas (TSI) das paredes e outros sensores

Neste anexo estão descritas as análises referentes às principais comparações entre os sensores localizados nas paredes e alguns posicionados em outros lugares nas células de teste. Pelo caráter investigativo da pesquisa foram feitos gráficos e tabelas para comparações entre os sensores das paredes e os que estão no teto, mas alinhados aos eixos delas, e comparações entre os sensores das paredes com os de temperatura de bulbo seco localizados na chamada "zona habitada" (TBS 03 e 04). Todos os gráficos e tabelas de cada célula de teste foram analisados em conjunto para comparação entre os desempenhos térmicos de cada ambiente interno.

1. Comparações entre temperaturas superficiais internas - Parede sul e teto

Para a cobertura verde e célula com telhado cerâmico a Figura 48 e a Tabela 12 mostram a variação diária (máximas e mínimas) das temperaturas superficiais internas dos sensores posicionados a 1,10 m (TSI 23) e 1,70 m (TSI 24), instalados no eixo central da parede sul, e do sensor do teto (TSI 12) localizado a 0,10 m dessa parede, mas também alinhado aos outros dois sensores.

Figura 48 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede sul e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 12 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Sul das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)			Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)		
Indicadores		Ar externo	TSI 23 (h=1,10m)	TSI 24 (h=1,70m)	TSI 12 (h=2,70m)	TSI 23 (h=1,10m)	TSI 24 (h=1,70m)	TSI 12 (h=2,40m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	29,5 (17h30)	29,5 (17h30)	29 (17h30)	29 (17h30)	29,5 (17h30)	30,5 (18h)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h)	20,5 (7h)	22,5 (7h)	20 (8h)	20 (8h)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	9	9	6,5	9	9,5	9,5

Na célula com cobertura verde as amplitudes térmicas dos sensores dispostos a 1,10 m e 1,70 m na parede sul foram iguais entre si e bem maiores que a amplitude apresentada pelo sensor TSI 12 instalado no teto, no alinhamento do eixo central desta parede. Os sensores da parede registraram temperaturas máximas e mínimas iguais e maiores em 0,5 °C em relação à máxima do sensor do teto e 2 °C a menos em relação à mínima.

Para a célula com telhado cerâmico as amplitudes térmicas dos sensores da parede sul e do teto foram praticamente iguais, apesar do sensor TSI 23 ter registrado temperatura máxima 0,5 °C menor que os outros dois sensores. Mas esta diferença não é significativa, já que não é perceptível fisicamente. Mesmo com amplitudes térmicas

semelhantes, o sensor do teto registrou temperaturas máxima e mínima maiores em 1 °C em comparação com os sensores da parede sul.

Comparando o desempenho das duas células de teste, os sensores das paredes sul apresentaram resultados semelhantes. No entanto, os sensores localizados nas superfícies das lajes tiveram resultados diferentes: o sensor da cobertura verde registrou menor valor de amplitude térmica (6,5 °C), enquanto que o sensor célula com telhado cerâmico obteve amplitude de 9,5 °C, aproximadamente 3 °C a mais que o sensor do teto da cobertura verde. Portanto, a cobertura verde teve melhor desempenho térmico em relação ao sistema cobertura.

2. Comparações entre temperaturas superficiais internas - Parede oeste e teto

Na Figura 49 e Tabela 13 são mostradas as variações diárias das temperaturas superficiais internas dos sensores localizados no eixo central da parede oeste de cada célula de teste, distantes do piso 1,10 m (TSI 25) e 1,70 m (TSI 26), e do sensor TSI 07 instalado no teto a 0,10 m dessa parede, mas também alinhado aos outros dois sensores.

Figura 49 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede oeste e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 13 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Oeste das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)			Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)		
Indicadores		Ar externo	TSI 25 (h=1,10m)	TSI 26 (h=1,70m)	TSI 07 (h=2,86m)	TSI 25 (h=1,10m)	TSI 26 (h=1,70m)	TSI 07 (h=2,40m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	29,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (18h)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	22,5 (7h30)	20,5 (7h30)	20,5 (8h)	21 (8h)
Amplitude Térmica (°C)		14	10	10	7	10	10	9,5

Os sensores instalados na parede oeste de cada célula de teste registraram temperaturas máximas e mínimas iguais e, portanto, mesma amplitude térmica. A menor amplitude térmica foi registrada pelo sensor do teto na cobertura verde, que apresentou temperatura máxima menor em 1 °C e mínima maior em 2 °C em relação a todos os sensores analisados, inclusive da célula convencional. Nesta análise os sensores da parede oeste apresentaram temperaturas semelhantes ao sensor do teto na célula convencional e , portanto, novamente fica evidente que a cobertura verde teve o melhor desempenho na comparação dos dois sistemas de cobertura.

3. Comparações entre temperaturas superficiais internas - Parede Norte e teto

Já para a parede norte, a Figura 50 e Tabela 14 mostram a variação diária das temperaturas superficiais internas dos sensores localizados a 1,10 m e 1,70 m no eixo central da parede (TSI 27 e 28, respectivamente), e do sensor no teto (TSI 16) posicionado a 0,10 m dessa parede e alinhado aos outros dois sensores.

Figura 50 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede norte e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 14 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Norte das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)			Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)		
Indicadores		Ar externo	TSI 27 (h=1,10m)	TSI 28 (h=1,70m)	TSI 16 (h=2,70m)	TSI 27 (h=1,10m)	TSI 28 (h=1,70m)	TSI 16 (h=2,40m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (17h)	30,5 (17h30)	30 (17h)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (18h)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h)	20,5 (7h30)	23 (7h30)	20 (8h)	20 (7h30)	21 (8h)
Amplitude Térmica (°C)		14	10	10	7	10,5	10,5	9

Nas comparações de desempenhos entre as células de teste, os sensores instalados nas paredes norte também registraram valores similares, com amplitudes térmicas aproximadamente de 10 °C. No caso dos sensores localizados nas lajes das células, as temperaturas máximas registradas também foram iguais, mas as temperaturas mínimas foram bem diferentes, o sensor da cobertura verde registrou temperatura mínima de 23 °C, ou seja, 2 °C maior que a coletada pelo sensor na outra célula. O motivo pode ser devido à posição do sensor TSI 16 na célula convencional: como a laje dessa célula é plana e o telhado tem inclinação de 26%, o ático e as pequenas aberturas entre a laje e o telhado formaram um "colchão" de ar, mas com circulação permanente, suficiente para influenciar a medida do sensor 16, mas não tão eficiente contra a perda de calor noturna.

Portanto, a amplitude térmica do sensor TSI 16 na célula convencional foi 2 °C maior que a do sensor instalado na cobertura verde.

4. Comparações entre temperaturas superficiais internas - Parede Leste e teto

No caso da parede leste, a Figura 51 e a Tabela 15 mostram a variação diária das temperaturas superficiais internas dos sensores instalados no eixo central dela, a 1,10 m (TSI 29) e 1,70 m do piso (TSI 30), e do sensor do teto TSI 21, alinhados aos outros dois sensores e posicionado a 0,10 m dessa parede.

Figura 51 – Gráficos de Temperaturas Superficiais Internas da parede leste e do teto (alinhado ao eixo central desta parede), para as duas células de teste (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 15 – Valores de Temperaturas Superficiais Internas para parede Leste das duas células de teste e ambiente externo (respectivos horários)

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)			Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)		
Indicadores		Ar externo	TSI 29 (h=1,10m)	TSI 30 (h=1,70m)	TSI 21 (h=2,54m)	TSI 29 (h=1,10m)	TSI 30 (h=1,70m)	TSI 21 (h=2,40m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	29,5 (17h)	29,5 (17h)	28,5 (17h30)	30 (17h)	30 (17h30)	31 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	23 (7h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	9	9	5,5	9,5	9,5	10

Os desempenhos térmicos dos sensores instalados na parede leste de cada célula foram semelhantes, situação que foi igual para as demais paredes analisadas. A diferença de desempenho novamente ficou entre os sensores localizados nas lajes das células: o sensor da cobertura verde registrou temperatura máxima de 28,5 °C e mínima de 23 °C, com amplitude térmica de 5,5 °C, enquanto que as temperaturas máxima e mínima coletadas pelo sensor da célula convencional foram 31 e 21 °C, respectivamente, com amplitude térmica de 10 °C. O motivo para estes valores também pode estar relacionado à posição destes sensores: nas duas células os sensores estão na parte mais baixa das lajes, mas no caso da cobertura verde o sensor TSI 21 está entre as duas saídas do sistema de drenagem, logo, é possível que a água acumule um pouco neste ponto, e na célula convencional o sensor está posicionado em um local em que existe menos espaço entre a laje e o telhado, portanto, o ático não auxilia tanto na diminuição da temperatura nesta situação.

5. Comparações entre temperaturas superficiais internas da parede Sul e temperatura de bulbo seco dos sensores a 1,10 m e 1,70 m

Os gráficos da Figura 52 e a Tabela 16 mostram os dados para comparações entre os sensores da parede sul e os sensores de temperatura de bulbo seco (TBS 03 e 04) localizados na "zona habitada", ou seja, a 1,10m e 1,70m do piso.

Figura 52 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Sul) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 16 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Sul) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)				Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)			
Indicadores		Ar externo	TSI 23 (1,10m)	TSI 24 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)	TSI 23 (1,10m)	TSI 24 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)
Temp.	Máx.(°C) (hora)	32 (16h)	29,5 (17h30)	29,5 (17h30)	30 (17h)	30 (17h30)	29 (17h30)	29,5 (17h30)	30 (17h30)	30 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h)	20,5 (7h)	21 (7h)	21 (7h)	20 (8h)	20 (8h)	21 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	9	9	9	9	9	9,5	9	9

Na comparação entre as duas células de teste, apenas o sensor instalado na parede sul a 1,70m de altura na célula convencional registrou temperatura máxima 0,5 °C a mais que as demais temperaturas máximas, mas esta diferença não é perceptível fisicamente, portanto, pode-se considerar que as duas células apresentaram desempenhos térmicos semelhantes, quando comparados os sensores da parede sul e os sensores de bulbo seco. Por isso mesmo as amplitudes térmicas foram praticamente idênticas.

6. Comparações entre temperaturas superficiais internas da parede Oeste e temperatura de bulbo seco dos sensores a 1,10 m e 1,70 m

A Figura 53 e a Tabela 17 mostram os dados de temperaturas máximas e mínimas, para comparações entre os sensores da parede oeste e de temperatura de bulbo seco posicionados a 1,10m e 1,70m a partir do piso.

Figura 53 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Oeste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04-03-2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 17 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Oeste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)				Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)			
Indicadores		Ar externo	TSI 25 (1,10m)	TSI 26 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)	TSI 25 (1,10m)	TSI 26 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h)	30 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h30)	30 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	21 (7h)	21 (7h)	20,5 (7h30)	20,5 (8h)	21 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	10	10	9	9	10	10	9	9

Novamente as duas células de teste apresentaram desempenhos térmicos semelhantes: os sensores das paredes a oeste registraram temperaturas máximas 0,5 °C maiores que os sensores de bulbo seco, mas também coletaram temperaturas mínimas 0,5 °C menores em relação aos de bulbo seco. Por este motivo as amplitudes térmicas dos sensores das paredes foram 1 °C maiores que as amplitudes dos sensores de bulbo seco.

7. Comparações entre temperaturas superficiais internas da parede Norte e temperatura de bulbo seco dos sensores a 1,10 m e 1,70 m

Para a fachada norte foram elaboradas a Figura 54 e a Tabela 18, que mostram os dados das duas células de teste para comparações entre os sensores da parede e os sensores de temperatura de bulbo seco (TBS 03 e 04) localizados a 1,10 m e 1,70 m do piso.

Figura 54 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Norte) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 18 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Norte) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)				Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)			
Indicadores		Ar externo	TSI 27 (1,10m)	TSI 28 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)	TSI 27 (1,10m)	TSI 28 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	30,5 (17h)	30,5 (17h30)	30 (17h)	30 (17h30)	30,5 (17h30)	30,5 (17h30)	30 (17h30)	30 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h)	20,5 (7h30)	21 (7h)	21 (7h)	20 (8h)	20 (7h30)	21 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	10	10	9	9	10,5	10,5	9	9

As comparações propostas nesta análise apresentaram resultados semelhantes aos mostrados na análise anterior para a parede oeste, visto que estas duas direções (norte e oeste) são as que mais recebem incidência de radiação solar no Hemisfério Sul. Portanto, pode-se considerar que o desempenho térmico da fachada norte é similar ao da fachada oeste nesta pesquisa.

8. Comparações entre temperaturas superficiais internas da parede Leste e temperatura de bulbo seco dos sensores a 1,10 m e 1,70 m

No caso da fachada leste foram elaboradas a Figura 55 e a Tabela 19, que mostram os dados para comparações entre os sensores da parede e de temperatura de bulbo seco, todos localizados a 1,10m e 1,70m a partir do piso.

Figura 55 – Gráficos de comparações entre Temperatura Superficial Interna (Parede Leste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m), para a cobertura verde e telhado cerâmico (04/03/2013). Fonte: Arquivo pessoal da autora.

Tabela 19 – Valores de Temperatura do ar externo, Temperaturas Superficiais Internas (Parede Leste) e Temperatura de Bulbo Seco (1,10 m e 1,70 m) - respectivos horários

Local		Exterior	Cobertura Verde (Ambiente Interno)				Telhado Cerâmico (Ambiente Interno)			
Indicadores		Ar externo	TSI 29 (1,10m)	TSI 30 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)	TSI 29 (1,10m)	TSI 30 (1,70m)	TBS 03 (1,10m)	TBS 04 (1,70m)
Temp.	Máx. (°C) (hora)	32 (16h)	29,5 (17h)	29,5 (17h)	30 (17h)	30 (17h30)	30 (17h)	30 (17:30)	30 (17h30)	30 (17h30)
	Mín. (°C) (hora)	18 (6h30)	20,5 (7h30)	20,5 (7h30)	21 (7h)	21 (7h)	20,5 (07:30)	20,5 (07:30)	21 (7h30)	21 (7h30)
Amplitude Térmica (°C)		14	9	9	9	9	9,5	9,5	9	9

Assim como ocorreu com a parede norte e oeste, a parede leste também apresentou desempenho térmico semelhante ao da parede sul, mesmo que os sensores instalados na parede leste da célula convencional tenham registrado temperaturas máximas 0,5 °C a mais que os mesmos sensores na cobertura verde, já que esta diferença é imperceptível fisicamente.