

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL

**ESTUDO DE CASOS SOBRE A INÉRCIA TÉRMICA DE
EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP**

Kelen Almeida Dornelles

SÃO CARLOS

2004

Kelen Almeida Dornelles

**ESTUDO DE CASOS SOBRE A INÉRCIA TÉRMICA DE
EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Roriz

SÃO CARLOS

2004

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

D713ec

Dornelles, Kelen Almeida.

Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP / Kelen Almeida Dornelles. -- São Carlos : UFSCar, 2004.

148 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2004.

1. Arquitetura e conservação de energia . 2. Inércia térmica. 3. Conforto térmico. 4. Materiais de construção. I. Título.

CDD: 721.04672 (20^a)

**ESTUDO DE CASOS SOBRE A INÉRCIA TÉRMICA DE
EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP**

KELEN ALMEIDA DORNELLES

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 20 de abril de 2004, pela
Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Maurício Roriz, Dr. (UFSCar)
(Orientador)

Prof^ª. Rosana Caram, Dr^ª. (EESC-USP)
(Examinador Externo)

Prof. Roberto Lamberts, PhD. (UFSC)
(Examinador Externo)

Dedico esta dissertação à memória de meus avôs, Acyr e Percilino, grandes mestres e amigos, que hoje iluminam e guiam minha vida como anjos protetores.

AGRADECIMENTOS

Ao **Senhor**, Criador de todas as coisas, que guia minha vida todos os dias.

Aos **meus pais, Vera e Roberto** e à **minha irmã, Sabrina**, pelo amor incondicional, apoio, confiança e incentivos, fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao **professor Maurício Roriz**, por sua valiosa orientação, dedicação e ensinamentos durante a realização desta pesquisa e em todos os momentos em que precisei de um mestre e amigo.

Aos **professores Roberto Lamberts e Rosana Caram de Assis**, que aceitaram a participação na banca examinadora.

Aos **professores Lucila Chebel Labaki e Admir Basso**, pelas contribuições na fase de qualificação desta pesquisa.

À **CAPES**, pela bolsa de estudos.

Ao **CNPq**, que financiou a compra dos sensores eletrônicos utilizados nos monitoramentos desta pesquisa.

Ao **CRHEA** da EESC – USP, que forneceu os dados da Estação Climatológica.

Ao **Francis Rodrigues de Souza**, aluno de iniciação científica da FAPESP, pelo auxílio nas pesquisas de campo.

Ao **Julio**, meu namorado, companheiro e amigo de todas as horas, pelo carinho, compreensão e ajuda em todas as etapas desta pesquisa.

Aos meus colegas de mestrado, **Caroline e Marcus André**, pela amizade e troca de conhecimentos.

À **Maria Cecília**, secretária do PPGCIV, sempre pronta a ajudar.

Aos **professores membros do Conselho de Coordenação do PPGCIV**, os quais contribuíram com minha formação como profissional do meio acadêmico e como ser humano.

À **família do professor Maurício Roriz** e em especial à sua esposa, Maristela, que sempre me recebeu muito bem em sua casa durante a realização desta pesquisa.

Aos **moradores das edificações** selecionadas, que permitiram o monitoramento das mesmas.

"Há homens que lutam um dia e são bons. Há outros que lutam um ano e são melhores. Há os que lutam muitos anos e são muito bons. Porém, há os que lutam toda a vida. Esses são os imprescindíveis".

Bertold Brecht

RESUMO

DORNELLES, Kelen Almeida. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos, SP.** 2004. 148f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

Neste trabalho, investigou-se o uso da inércia térmica em edificações localizadas na cidade de São Carlos, SP, cujo clima pode ser caracterizado como semi-úmido. O objetivo desta pesquisa foi verificar a hipótese de que a utilização da inércia térmica, em edificações submetidas ao clima específico da cidade, permite otimizar o desempenho térmico de edificações e reduzir a necessidade de sistemas artificiais de climatização para restabelecer o conforto nos ambientes. Com base nos dados obtidos no monitoramento de ambientes de sete diferentes edificações, analisou-se o desempenho térmico de cada ambiente frente a condições típicas de inverno e verão. Para estes dois períodos, adotando-se um “dia de referência”, fez-se o cálculo do desconforto por frio ou calor acumulado ao longo deste dia e se estimou a necessidade de aquecimento e refrigeração, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes. Além das análises para inverno e verão, também se estimou a necessidade de aquecimento e refrigeração dos ambientes ao longo de todos os meses do ano. Esta análise permitiu verificar as reais influências da inércia térmica sobre as condições de conforto em edificações, as quais estão submetidas ao clima da cidade de São Carlos. As diversas formas de análise demonstraram que apenas a utilização da inércia térmica não é suficiente para oferecer condições de conforto térmico nos ambientes, quando submetidos ao clima específico da cidade. Sugere-se que a utilização da inércia térmica seja combinada com outras estratégias de condicionamento passivo, de tal forma a otimizar o desempenho térmico das edificações.

Palavras-chave: inércia térmica, conforto térmico, desempenho térmico e energético de edificações, sistemas construtivos.

ABSTRACT

DORNELLES, Kelen Almeida. **Case study of buildings thermal inertia in Sao Carlos, SP**. 2004. 148p. Dissertation (M.Sc. in Civil Construction) - Post-Graduation Program in Civil Construction, Universidade Federal de Sao Carlos, Sao Carlos, 2004.

In this work, it was investigated the use of thermal inertia in buildings located in Sao Carlos city, SP, which presents semi-humid climate. This research aims to verify the hypothesis that the use of thermal inertia in buildings submitted to the specific climate of Sao Carlos allows to optimize the thermal performance of buildings and to reduce waste of energy to restore indoor thermal comfort. From data obtained by monitoring of seven different buildings, the thermal performance of each one was analyzed when they are submitted to typical summer and winter conditions. To these seasons, adopting a "reference day", it was estimated the heating and cooling requirement to restore the indoor comfort conditions. Besides the analyses for winter and summer seasons, it was estimated the indoor cooling and heating requirement along all months of the year. Through this analyze, it was possible to verify the real influences of thermal inertia on the indoor comfort conditions. The results indicates that only the use of thermal inertia is insufficient to provide indoor thermal comfort conditions for buildings submitted to the specific climate of Sao Carlos. It is suggested to match the use of thermal inertia with others passive strategies, in such a way to optimize the thermal performance of buildings.

Key words: thermal inertia, thermal comfort, thermal and energetic performance of buildings, building systems.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Exemplo de habitações no Senegal (África).	22
Figura 2.2: Exemplo de edificação no Japão.	22
Figura 2.3: Exemplo de edificação em clima quente e seco (Tunísia).	22
Figura 2.4: Exemplo de edificação com grande área de vidros, São Paulo.	23
Figura 2.5: Exemplo de construção alemã na região sul do Brasil.	24
Figura 2.6: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.	26
Figura 2.7: Carta Bioclimática adaptada a partir da sugerida por Givoni.	26
Figura 2.8: Propagação da onda de temperatura em função da difusividade.	31
Figura 2.9: Absorção de energia em uma parede em função da efusividade.	32
Figura 2.10: Correlação entre difusividade (a) e efusividade térmica (b) dos materiais.	32
Figura 2.11: Correlação entre difusividade (a) e efusividade térmica (b) para diferentes tipos de materiais de construção.	33
Figura 2.12: Fator de Amortecimento (μ') em função da espessura, para diferentes materiais.	37

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Sensor utilizado para as medições, modelo HOBO.	51
Figura 3.2: Caixas de EPS utilizadas na calibração dos sensores.	51
Figura 3.3: Recipiente de alumínio para proteção dos sensores.	52
Figura 3.4: Graus-Hora de Refrigeração.	57

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Zona Bioclimática 4 e o clima de São Carlos sobre a Carta Bioclimática.	63
Figura 4.2: Localização da cidade de São Carlos, no estado de SP, e das edificações analisadas no mapa da cidade.	66
Figura 4.3: Edificação 1, vista das fachadas Norte e Oeste do ambiente 1.	67
Figura 4.4: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 1.	67
Figura 4.5: Planta baixa do ambiente monitorado – Edificação 1.	68
Figura 4.6: Edificação 2, vista da fachada Leste do ambiente 2.	68
Figura 4.7: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 2.	69
Figura 4.8: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 2.	69
Figura 4.9: Edificação 3, vista da fachada Sul.	70
Figura 4.10: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 3.	70
Figura 4.11: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna – Ambiente 3.	71
Figura 4.12: Edificação 4, vista da fachada Oeste do ambiente 4.	71
Figura 4.13: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 4.	72
Figura 4.14: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 4.	73

Figura 4.15: Edificação 5, vista das fachadas Leste e Norte.....	73
Figura 4.16: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 5.....	74
Figura 4.17: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 5.	74
Figura 4.18: Edificação 6, vista das fachadas Norte e Oeste.....	75
Figura 4.19: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 6.	75
Figura 4.20: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 6.....	76
Figura 4.21: Edificação 7, vista das fachadas Leste e Norte.....	76
Figura 4.22: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 7.....	77
Figura 4.23: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 7.	77

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 1.....	80
Figura 5.2: Dia de Referência – Edificação 1.	81
Figura 5.3: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 2.....	81
Figura 5.4: Dia de Referência – Edificação 2.	82
Figura 5.5: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 3.....	83
Figura 5.6: Dia de Referência – Edificação 3.	83
Figura 5.7: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 4.....	84
Figura 5.8: Dia de Referência – Edificação 4.	85
Figura 5.9: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 5.....	85
Figura 5.10: Dia de Referência – Edificação 5.	86
Figura 5.11: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 6.....	86
Figura 5.12: Dia de Referência – Edificação 6.	87
Figura 5.13: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 7.....	88
Figura 5.14: Dia de Referência – Edificação 7.	88
Figura 5.15: Diferenças entre microclimas – 1° e 2° Períodos de Medições	89
Figura 5.16: Diferenças entre microclimas – 3° e 4° Períodos de Medições.	90

CAPÍTULO 6

Figura 6.1: Temperaturas médias mensais – Estação Climatológica CRHEA.....	93
Figura 6.2: Temperaturas de bulbo seco para período de inverno – Julho/2002.....	93
Figura 6.3: Temperaturas diárias, máximas, médias e mínimas – Período de Inverno.	94
Figura 6.4: Dia de Referência (26/07/2002) – Período de Inverno.....	94
Figura 6.5: Temperaturas de bulbo seco para período de verão – Outubro/2002.	95
Figura 6.6: Temperaturas diárias, máximas, médias e mínimas – Período de Verão.....	95
Figura 6.7: Dia de Referência (14/10/2002) – Período de Verão.	96
Figura 6.8: Curvas de variação das temperaturas internas – Período de Inverno.	97
Figura 6.9: Amplitude Térmica – Período de Inverno.	99
Figura 6.10: Coeficiente de Amortecimento Térmico – Período de Inverno.....	100

Figura 6.11: Curvas de variação das temperaturas internas – Período de Verão.	101
Figura 6.12: Amplitude Térmica – Período de Verão.....	103
Figura 6.13: Coeficiente de Amortecimento Térmico – Período de Verão.	103
Figura 6.14: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 1.....	104
Figura 6.15: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 2.....	105
Figura 6.16: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 3.....	105
Figura 6.17: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 4.....	105
Figura 6.18: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 5.....	106
Figura 6.19: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 6.....	106
Figura 6.20: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 7.....	106
Figura 6.21: Graus-Hora de desconforto diário – Dia de Referência de Inverno.	107
Figura 6.22: Graus-Hora de desconforto diário – Dia de Referência de Verão.....	108
Figura 6.23: Estimativas da necessidade de Aquecimento e Refrigeração – Inverno.	110
Figura 6.24: Estimativas da necessidade de Aquecimento e Refrigeração – Verão.....	112
Figura 6.25: Graus-Dia de desconforto mensal por frio.....	115
Figura 6.26: Graus-Dia de desconforto mensal por calor.	115
Figura 6.27: Estimativas da necessidade anual de refrigeração e aquecimento.	116
Figura 6.28: Quantidade anual de calor a ser retirado e fornecido aos ambientes	117

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1: Materiais maciços na escala macroscópica.....	33
-----------------------------------------------------------	----

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1: Correção dos valores medidos em cada sensor.	52
Tabela 3.2: Classificação das construções a partir do Fator de Resposta.....	60

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1: Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 4.	64
Tabela 4.2: Transmitância Térmica, Atraso Térmico e Fator de Calor Solar admissíveis para vedações externas para a Zona Bioclimática 4.....	64
Tabela 4.3: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 4.....	64
Tabela 4.4: Períodos de medições.	65
Tabela 4.5: Caracterização dos ambientes monitorados.....	78

CAPÍTULO 6

Tabela 6.1: Dados da estação climatológica do CRHEA para o ano de 2002.	92
Tabela 6.2: Dados de TBS internas estimadas - Período de Inverno.	97
Tabela 6.3: Atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas – Período de Inverno.....	98
Tabela 6.4: Dados de TBS internas estimadas - Período de Verão.....	101
Tabela 6.5: Atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas – Período de Verão.....	102
Tabela 6.6: Limites Confortáveis de Temperatura – Julho e Outubro de 2002.....	104
Tabela 6.7: Graus-hora de desconforto diário, por frio ou calor, para verão e inverno.....	107
Tabela 6.8: Estimativas da quantidade de calor diária a ser retirada, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Inverno.	109
Tabela 6.9: Estimativas da quantidade de calor diária a ser fornecida, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Inverno.	109
Tabela 6.10: Estimativas da quantidade de calor diária a ser retirada, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Verão.....	111
Tabela 6.11: Estimativas da quantidade de calor diária a ser fornecida, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Verão.....	111
Tabela 6.12: Graus-dia de desconforto mensal e anual, por frio e calor, para os 12 meses do ano.....	114
Tabela 6.13: Estimativas da necessidade anual de refrigeração e aquecimento para restabelecer o conforto térmico nos ambientes.	116
Tabela 6.14: Legenda dos dados necessários ao cálculo do Fator de Resposta.....	118
Tabela 6.15: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 1.	119
Tabela 6.16: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 2.	119

Tabela 6.17: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 3.	120
Tabela 6.18: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 4.	120
Tabela 6.19: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 5.	121
Tabela 6.20: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 6.	121
Tabela 6.21: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 7.	122
Tabela 6.22: Classificação da inércia térmica das edificações a partir do Fator de Resposta.	122
Tabela 6.23: Parâmetros de caracterização do comportamento térmico das edificações.	123

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Introdução e Justificativas	17
1.2 Objetivos	18
1.3 Estrutura da Dissertação	19
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Arquitetura Bioclimática e o Conforto nas Habitações	21
2.2 Zoneamento Bioclimático Brasileiro	25
2.3 Conceitos e Propriedades relacionados à Inércia Térmica	27
2.3.1 Fluxos de Calor entre Ambientes	27
2.3.2 Propriedades Termofísicas dos Materiais relacionadas à Inércia Térmica	28
2.3.2.1 Calor Específico	28
2.3.2.2 Densidade	29
2.3.2.3 Condutividade Térmica	29
2.3.2.4 Calor Específico Volumétrico	29
2.3.2.5 Difusividade Térmica	30
2.3.2.6 Efusividade Térmica	31
2.3.3 Atraso Térmico	34
2.3.4 Amortecimento Térmico	36
2.4 Inércia Térmica	38
2.4.1 Massa Térmica x Inércia Térmica	40
2.4.2 Uso de Inércia Térmica como Estratégia Bioclimática	42
2.4.3 Os Tipos de Inércia Térmica segundo Pierre Lavigne	44
2.4.3.1 Inércia de Transmissão	44
2.4.3.2 Inércia de Absorção	45
2.4.4 A Inércia Térmica e o Método de Mahoney	45
3. MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 Instrumentos de Medição	50
3.2 Apresentação dos Dados Medidos	53
3.2.1 Distribuição das Temperaturas Externas e Internas	53
3.2.2 Dia de Referência dos Ambientes Monitorados	53
3.3 Ajuste das Curvas de Temperatura Interna aos Dias Representativos de Verão e Inverno	54
3.4 Graus-Dia e Graus-Hora de Desconforto	56

3.5 Estimativa da Necessidade de Aquecimento ou Refrigeração dos Ambientes	58
3.6 Classificação da Inércia Térmica de Edificações	60
4. ESTUDO DE CASOS	63
4.1 Caracterização Climática de São Carlos	63
4.2 Monitoramento das Temperaturas nas Edificações	64
4.3 Objetos de Estudo	65
4.3.1 Edificação 1	67
4.3.2 Edificação 2	68
4.3.3 Edificação 3	70
4.3.4 Edificação 4	71
4.3.5 Edificação 5	73
4.3.6 Edificação 6	74
4.3.7 Edificação 7	76
4.4 Caracterização dos Ambientes Monitorados	77
5. RESULTADOS DOS MONITORAMENTOS	80
5.1 Edificação 1	80
5.2 Edificação 2	81
5.3 Edificação 3	82
5.4 Edificação 4	83
5.5 Edificação 5	85
5.6 Edificação 6	86
5.7 Edificação 7	87
5.8 Diferenças Climáticas entre Microclimas	88
6. ANÁLISES DA INÉRCIA TÉRMICA DAS EDIFICAÇÕES	92
6.1 Análise em Meses de Inverno e Verão	92
6.1.1 Temperaturas Externas e Dia de Referência – Mês de Inverno	93
6.1.2 Temperaturas Externas e Dia de Referência – Mês de Verão	95
6.1.3 Ajuste das Curvas de Temperatura Interna aos Dias de Referência de Inverno e Verão	96
6.1.4 Graus-Hora de Desconforto para Inverno e Verão	103
6.1.5 Estimativas da Necessidade de Aquecimento e Refrigeração nos Ambientes – Inverno e Verão	109
6.2 Análise Anual	112
6.3 Classificação da Inércia Térmica das Edificações	118
6.4 Comportamento Térmico das Edificações	123

7. CONCLUSÕES	126
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132
APÊNDICES	136
<i>Apêndice A – Temperaturas Internas – Inverno e Verão</i>	137
<i>Apêndice B – Planilhas de Mahoney para São Carlos</i>	145
ANEXO	147
<i>Anexo A – Propriedades Termofísicas de Alguns Materiais</i>	148

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

"A mente que se abre a uma nova idéia jamais voltará ao seu tamanho original".

Albert Einstein

1. INTRODUÇÃO

1.1 Introdução e Justificativas

O início de um novo século e de um novo milênio tem provocado maior conscientização com as questões ambientais, principalmente as relacionadas à visão holística do desenvolvimento sustentável, na qual cada sistema contribui para o uso consciente dos recursos naturais. No setor de construção de edificações, destaca-se a fundamental atuação de profissionais ligados à concepção de projetos de edifícios, os quais podem contribuir com a minimização de impactos ambientais e melhorar a qualidade de vida da população. Neste âmbito, destaca-se a adoção de diretrizes de conforto ambiental ainda na fase de projeto, produzindo-se edificações energeticamente mais eficientes. Diminuindo-se o consumo de energia para manter os ambientes internos em condições de conforto ao usuário, reduz-se a necessidade de construir usinas geradoras de energia, as quais são causadoras de inúmeros impactos ambientais. Dentre estes impactos, o alagamento de grandes áreas com destruição da fauna e da flora é um dos principais danos causados ao meio ambiente.

No entanto, alguns profissionais têm desconsiderado tais diretrizes, principalmente no que se refere à produção de ambientes termicamente confortáveis. A omissão de tais profissionais, frente às condições de conforto dos usuários, gerou o surgimento de edificações com elevados consumos de energia, sem se pensar nos impactos que surgiriam no decorrer dos anos. A partir da crise do petróleo em 1973 e, mais recentemente, após a crise energética brasileira em 2001, evidenciam-se as preocupações com a redução do consumo energético e, conseqüentemente, com o controle térmico dos ambientes e da eficiência dos equipamentos utilizados para proporcionar conforto.

Segundo informações divulgadas pela Eletrobrás (1999), o condicionamento ambiental (refrigeração, aquecimento e iluminação dos ambientes) participa com 3% no consumo global de energia elétrica do país, mas somente os aparelhos de ar-condicionado representam 20% do consumo comercial.

Com relação ao uso da energia elétrica no setor de edificações, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) divulgou as seguintes informações:

As edificações compõem um segmento de grande potencial de combate ao desperdício de energia elétrica, uma vez que representam 42% do consumo total e englobam quase todos os usos finais. Cerca de 84% das edificações são industriais, residenciais e comerciais, com forte predomínio destas últimas. Com a implantação de medidas para redução do consumo de energia em prédios já existentes (*retrofit*), o consumo pode ser reduzido em aproximadamente 30%. Em prédios já projetados dentro do conceito de eficiência energética, a economia pode chegar a até 50% (ELETROBRÁS, 1999).

Neste contexto, a adaptação do projeto arquitetônico ao clima de uma dada região e a escolha de materiais condizentes a este clima são fatores determinantes para se garantir uma arquitetura de boa qualidade, implicando em projetos racionalizados, capazes de reduzir o consumo de energia e oferecer condições de satisfação térmica ao usuário.

Uma das estratégias arquitetônicas e construtivas que oferece tais resultados é a utilização da inércia térmica, caracterizada como a capacidade que tem uma edificação de armazenar calor e liberá-lo algum tempo depois. A inércia térmica provoca dois importantes efeitos sobre os fluxos de calor entre o ambiente interno das edificações e o meio exterior. O primeiro, denominado Amortecimento, atua como redutor das oscilações das temperaturas internas. O segundo é o Atraso Térmico, ou seja, a defasagem das mesmas em relação às temperaturas externas.

O uso da inércia térmica para otimizar o desempenho térmico e a eficiência energética de edificações pressupõe a caracterização do clima da região em estudo. Especificamente para a cidade de São Carlos (SP), que apresenta verão quente e úmido e inverno frio e seco, o uso da inércia térmica como estratégia construtiva merece atenção, devido às grandes oscilações diárias de temperatura do ar que ocorrem na cidade.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa foi verificar a hipótese de que, para edificações localizadas na cidade de São Carlos (SP), a utilização de sistemas construtivos de maior inércia térmica permite otimizar o desempenho térmico das mesmas e reduzir a necessidade de sistemas artificiais de climatização para restabelecer o conforto nos ambientes.

Para se verificar esta hipótese, foram analisadas as variações das temperaturas interna e externa em diferentes edificações localizadas em São Carlos, além de análises da inércia térmica das mesmas, quando submetidas a diferentes condições de clima externo.

1.3 Estrutura da Dissertação

Após este capítulo de introdução e justificativas do referido estudo, faz-se uma discussão, na Revisão Bibliográfica, sobre o termo Arquitetura Bioclimática e sua relação com o conforto térmico em edificações, visto que a Inércia Térmica é uma das estratégias construtivas que utilizam os conceitos do bioclimatismo. A seguir, descreve-se a classificação climática do Brasil e alguns conceitos e propriedades relacionados à Inércia Térmica, tais como: fluxos de calor entre ambientes, propriedades termofísicas dos materiais, atraso e amortecimento térmicos. Segue-se com a caracterização da inércia térmica e seu uso, assim como uma discussão sobre os tipos de inércia térmica, segundo Pierre Lavigne (2001). Este segundo capítulo é finalizado com uma discussão sobre o Método de Mahoney, o qual é utilizado nas análises de inércia térmica desta pesquisa.

O capítulo seguinte trata da metodologia adotada, tanto para a obtenção dos dados de temperatura do ar nas edificações analisadas, quanto para a forma de tratamento estatístico dos mesmos. No capítulo 4, são descritos os objetos de estudo selecionados para análise e a caracterização climática da cidade de São Carlos.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos durante as pesquisas de campo e as diferenças climáticas observadas entre os diversos pontos monitorados na cidade. No capítulo 6 são descritas as análises da inércia térmica das edificações estudadas, assim como as estimativas de necessidade de refrigeração e aquecimento dos ambientes.

Para finalizar, o capítulo 7 trata das conclusões, destacando os resultados obtidos com este estudo e as recomendações para edificações submetidas ao clima semi-úmido. Para trabalhos futuros, sugere-se alguns tópicos a partir de limitações encontradas durante a realização desta pesquisa.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*"A vida só pode ser compreendida olhando-se para trás;
mas só pode ser vivida olhando-se para frente".*

Soren Kierkegaard

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Arquitetura Bioclimática e o Conforto nas Habitações

A bioclimatologia, de acordo com Lamberts, Ghisi e Papst (2000), é o estudo das relações entre o clima e o ser humano, ou seja, a interação do ambiente, seus fatores e elementos climáticos, com as sensações térmicas dos seres vivos.

A concepção bioclimática de uma edificação pode ser definida como a que utiliza, por meio da arquitetura, as condições favoráveis do clima com o objetivo de satisfazer às exigências de conforto térmico do homem (OLGYAY, 1963). Assim, a Arquitetura Bioclimática responde a um desenho racional e harmônico com a natureza e se baseia no aproveitamento das condições ambientais do entorno (meio natural), a fim de se obter situações de conforto térmico no interior das edificações, com baixo consumo energético.

Para Izard e Guyot (1983), uma boa arquitetura bioclimática é a que permite que o edifício se beneficie de ambientes internos próximos ao conforto, sem utilizar recursos do condicionamento térmico artificial. Sob condições extremas, quando os equipamentos artificiais forem necessários, a adequação da edificação ao clima permite que se consuma uma quantidade bem menor de energia. Contudo, em muitos casos, aparelhos de condicionamento térmico artificial são necessários para corrigir erros de projeto que poderiam ter sido evitados se fossem tomadas algumas precauções na fase de concepção. No caso de edificações em climas quentes, Givoni (1994) destaca que a arquitetura bioclimática envolve o projeto arquitetônico e também a escolha de materiais que garantam conforto, visando minimizar a demanda de energia necessária para resfriar o edifício.

A adequação das habitações ao clima foi umas das características fundamentais da arquitetura anterior aos nossos tempos. Através de sábios processos culturais, foi possível enfrentar as situações de frio, calor, ventos, etc., gerando respostas que hoje nos fazem refletir perante a fragilidade das edificações atuais a situações similares. A busca pelo conforto ambiental no espaço arquitetônico levou o ser humano tanto ao desenvolvimento da tecnologia aplicada às construções como à

formação de uma identidade arquitetônica própria de cada região da Terra (Figuras 2.1, 2.2 e 2.3). É importante destacar que, quando se fala em arquitetura bioclimática, não se está falando de uma área específica da arquitetura, ou um estilo de arquitetura, uma vez que toda boa arquitetura tem que ser bioclimática para que seja adequada e eficaz, como tem sido durante a história.



Figura 2.1: Exemplo de habitações no Senegal (África).

Fonte: <http://www.chez.com/julienmarembert/photo.html>



Figura 2.2: Exemplo de edificação no Japão.

Fonte: <http://www.chez.com/julienmarembert/photo.html>

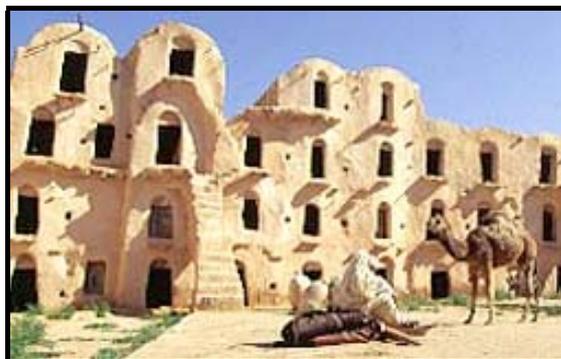


Figura 2.3: Exemplo de edificação em clima quente e seco (Tunísia).

Fonte: <http://julien.mammouth.free.fr/tunisie-page8.html>

No entanto, apesar dos princípios bioclimáticos serem utilizados desde os primórdios da construção civil, alguns profissionais responsáveis pelas edificações produzidas nas últimas décadas ignoravam as características climáticas de cada região, devido principalmente à rápida evolução da tecnologia e à disponibilidade de energia barata.

Na década de 50, houve uma rápida resposta da arquitetura mundial frente à diminuição dos preços do petróleo e o desenvolvimento, em larga escala, dos sistemas de climatização e iluminação artificial e a utilização de materiais de construção mais leves. Exemplos disso são os grandes edifícios de escritórios, como caixas de vidro (Figura 2.4), onde as influências do clima, do local e do ambiente urbano não encontraram respostas dentro das soluções arquitetônicas, sendo este um dos exemplos mais significativos de uma arquitetura com uma grande dependência das fontes de energia, distante do ambiente físico natural e ambiental (PEÑA, 1998).



Figura 2.4: Exemplo de edificação com grande área de vidros, São Paulo.

Fonte: <http://www.arcoweb.com.br>

Entretanto, devido à crise do petróleo em 1973 e ao inesperado impacto ambiental, a arquitetura bioclimática passou a ser objeto de maiores estudos e pesquisas. Pela primeira vez surgiu o termo “Projeto Bioclimático”, abordado pelos irmãos Olgyay (1963), que aplicaram a bioclimatologia na arquitetura considerando o conforto térmico humano. Para os irmãos Olgyay, a forma do edifício e a adaptação dos materiais construtivos empregados em diferentes regiões do globo devem considerar as características culturais de cada povo e a adaptação ao clima regional.

A influência arquitetônica dos povos é muito marcante em determinadas culturas, de tal forma que, mesmo mudando os seus assentamentos para locais com características climáticas diferentes daquelas de origem, os descendentes de antigas civilizações não adaptaram as construções às características locais. No Brasil, o hábito de adotar os modelos externos de construção vem desde o surgimento das primeiras vilas coloniais. As edificações eram feitas imitando os modelos dos países europeus, transportando para o território brasileiro construções estranhas à realidade climática local. Na região Sul do Brasil, por exemplo, a colonização alemã ditou uma linguagem muito marcante, em que os telhados mantiveram grandes inclinações, mesmo sem a necessidade de se evitar o acúmulo de neve (Figura 2.5).



Figura 2.5: Exemplo de construção alemã na região sul do Brasil.

Fonte: <http://www.belasantacatarina.com.br/blumenau>

Em parte da Europa, diferentemente do Brasil, o estabelecimento do conforto térmico no interior de suas edificações reside basicamente na conservação do calor interno, devido aos rigores das temperaturas de inverno. Mas na maior parte do território brasileiro, o objetivo da adequação da edificação ao clima é reduzir o ganho de calor pelas superfícies envolventes, no sentido de manter a temperatura interna em condições de conforto durante o dia e durante a noite. Contudo, é importante destacar que o Brasil também é constituído por regiões subtropicais e temperadas, como é o caso da região Sul, e outras com clima composto (verão úmido ou super úmido e inverno seco), como é o caso de algumas localidades da região Sudeste.

Em climas compostos têm-se as duas situações, ou seja, a necessidade de evitar os ganhos térmicos dos componentes da edificação no período diurno e a perda do calor interno no período noturno, principalmente nas estações de outono e inverno. Portanto, torna-se tarefa difícil adotar uma tecnologia construtiva que atenda às diversas solicitações do clima e que propicie ambientes confortáveis ao usuário.

Segundo Santamouris e Asimakopoulous (1996)¹, citado por Papst (1999, p.13), o uso da inércia térmica tem efeito positivo tanto no verão quanto no inverno. No verão, o ganho solar durante o dia é armazenado na massa térmica, reduzindo os picos das cargas de resfriamento. Com um tempo de atraso, este calor é liberado para o interior da edificação, provocando uma mudança no horário de pico da carga de resfriamento e reduzindo o seu valor. Comparando edificações com pouca e muita inércia térmica para meia-estação (outono e primavera), o autor observou que edificações leves podem precisar de aquecimento para uma parte do dia e resfriamento para outra. Já edificações com mais inércia térmica não apresentam esta variabilidade e, dependendo das condições externas, podem apresentar condições internas favoráveis.

Neste contexto, o presente trabalho procurou verificar a hipótese de que, para o clima semi-úmido da cidade de São Carlos, edificações com sistemas construtivos de maior inércia térmica apresentam melhores desempenhos térmicos e menores consumos de energia.

2.2 Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Para se garantir condições térmicas satisfatórias no interior das edificações, é importante que o projetista tenha conhecimento do clima local para adequar o projeto da edificação ao clima. Desta forma, as sensações de desconforto impostas por climas muito rígidos (excessivo calor, frio ou ventos), podem ser amenizadas no ambiente construído. O conhecimento do clima local também irá propiciar ambientes que sejam, no mínimo, tão confortáveis como os espaços ao ar livre, em climas amenos (FROTA; SCHIFFER, 1995).

O Brasil é um país de clima tropical. No entanto, dizer apenas que é tropical não define as características de cada região deste amplo território. Inserido no clima tropical há vários tipos específicos, determinados conforme a posição e característica geográfica de uma dada região.

¹ SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOUS, D. Heat attenuation. In: _____. **Passive cooling of buildings**. UK: James & James, 1996. cap. 8.

O projeto de norma técnica desenvolvido no âmbito da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2003c) propõe a divisão do território brasileiro em oito zonas bioclimáticas relativamente homogêneas quanto ao clima (Figura 2.6).

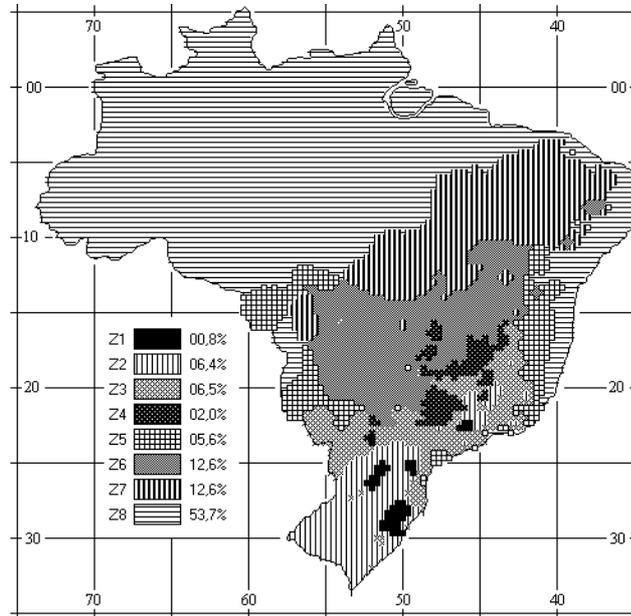


Figura 2.6: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

Fonte: ABNT (2003c)

Neste projeto de norma, foi estabelecido um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas às habitações de interesse social. Para a determinação destas diretrizes construtivas, esse projeto adotou um processo misto entre o Método de Mahoney (ver item 2.4.4) e uma Carta Bioclimática adaptada a partir da sugerida por Givoni (1992), a qual apresenta as seguintes zonas estratégicas (Figura 2.7):

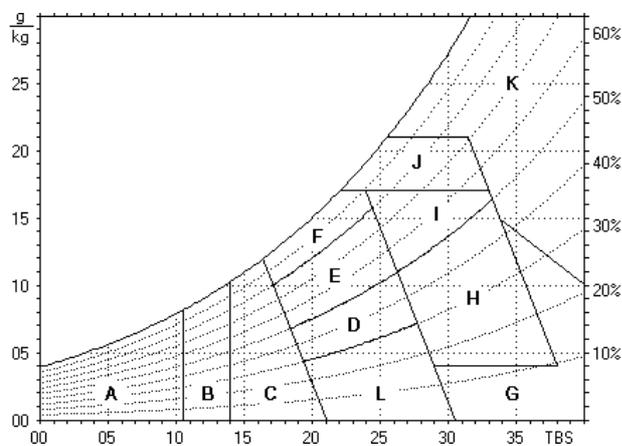


Figura 2.7: Carta Bioclimática adaptada a partir da sugerida por Givoni.

Fonte: ABNT (2003c)

- A – Zona de aquecimento artificial (calefação);
- B – Zona de aquecimento solar da edificação;
- C – Zona de massa térmica para aquecimento;
- D – Zona de Conforto Térmico (baixa umidade);
- E – Zona de Conforto Térmico;
- F – Zona de desumidificação (renovação do ar);
- G + H – Zona de resfriamento evaporativo;
- H + I – Zona de massa térmica de refrigeração;
- I + J – Zona de ventilação;
- K – Zona de refrigeração artificial;
- L – Zona de umidificação do ar.

Para a cidade de São Carlos, as recomendações e estratégias construtivas, sugeridas no referido projeto de norma, são apresentadas no Capítulo 4, item 4.1.

2.3 Conceitos e Propriedades relacionados à Inércia Térmica

2.3.1 Fluxos de Calor entre Ambientes

Os problemas de transmissão de calor que se apresentam na prática são abordados, na maioria dos casos, supondo um *regime estacionário*, onde as temperaturas não variam com o tempo, o qual implica que os fluxos permanecem constantes nos períodos considerados. Nestas condições, a quantidade de calor que entra em um elemento construtivo é igual a que sai, de tal forma que sua energia interna não sofre variação alguma.

Segundo Yáñez (1982), ao considerar constantes as temperaturas exterior e interior, pode-se ter uma certa aproximação com a realidade se considerarmos períodos curtos de tempo. Isto também estaria justificado quando as variações de temperatura são de pequena amplitude. Contudo, os processos naturais de trocas térmicas que se observam diariamente ocorrem em *regime variável*, ou seja, há uma mudança de temperatura durante as trocas de calor. Um caso particular do regime térmico variável acontece quando as variações de temperatura se repetem em intervalos de tempo iguais e sucessivos.

Para Rivero (1985), esse caso configura o *regime periódico* e representa, de forma aproximada, os fenômenos térmicos que ocorrem no meio exterior. Este caso se aplica às variações da temperatura do ar ao longo das 24 horas de um dia e que são repetidas durante os dias consecutivos. Tais variações podem ser representadas por uma onda aproximadamente senoidal, cujo período é 24 horas. Em um dia típico, o ar atinge sua temperatura mínima por volta do nascer do sol e a máxima no início da tarde.

Segundo Akutsu e Vittorino (1997), um fator determinante no método para a avaliação do desempenho térmico de edificações é, sem dúvida, a característica climática do local de implantação da edificação. Isto se reflete diretamente no modelo matemático utilizado para se determinar as trocas térmicas que ocorrem entre o ambiente externo e os componentes da edificação. O ponto principal, neste aspecto, é decidir entre o que pode ser tratado como condição de regime permanente e o que pode ser considerado em função das condições dinâmicas que não podem ser desprezadas. Isto significa uma distinção clara entre poder trabalhar com equações muito simples, de fácil solução, no caso de se tratar de regime permanente, ou ter que resolver sistemas de equações mais complexos, com maior número de variáveis, o que é mais adequado através do uso de computadores, quando se trata de condições de regime variável.

2.3.2 Propriedades Termofísicas dos Materiais relacionadas à Inércia Térmica

2.3.2.1 Calor Específico

O calor específico (c) de uma substância é definido como a quantidade de calor necessária para incrementar em uma unidade de temperatura a unidade de massa da substância. Sua unidade é expressa em J/kg.K (KOENIGSBERGER et al, 1977).

Quanto mais elevado o calor específico de uma substância, mais calor absorverá para um incremento dado de temperatura. A água, entre todas as substâncias, é a que tem o calor específico mais elevado: 4187 J/kg.K. Em função disso, a água é utilizada como meio de armazenamento térmico em várias situações.

2.3.2.2 Densidade

A densidade (ρ), ou massa volumétrica de um material, define o quociente entre a quantidade de massa (kg) que caracteriza o material e o volume unitário (m^3), (GONZÁLEZ, 2002). Sua unidade é expressa em kg/m^3 .

O intervalo de valores de densidade, incluindo-se os metais, mantém uma relação de 1 a 600. Estes variam desde 5 a $30 kg/m^3$ nos isolantes e até $8900 kg/m^3$ no cobre. Porém, considerando-se apenas os materiais de construção, esta relação diminui para 1 a 170.

2.3.2.3 Condutividade Térmica

A condutividade térmica (λ) expressa a capacidade do material para conduzir calor, e é, por definição, o quociente entre a densidade de fluxo térmico e o gradiente de temperatura (GONZÁLEZ, 2002). Sua unidade é expressa em $W/m.K$.

O intervalo de valores de condutividade nos materiais é muito amplo. Entre os menos condutores ou isolantes, como a espuma de poliuretano ($0,026 W/m.K$), e os mais condutores, como o cobre ($389 W/m.K$), existe uma relação de 1 a 15000. No entanto, para os materiais de construção, incluídos os isolantes, esta relação é de 1 a 135.

Segundo González (2002), estas três propriedades enunciadas são características elementares de qualquer material, desde o ponto de vista térmico. O estudo do comportamento dos materiais em regime dinâmico obriga à introdução de outras características complexas dos mesmos (combinação das características elementares) e que permitem sua caracterização quando estão submetidos às variações cíclicas de um lugar. Estas três características são: o *Calor Específico Volumétrico* (ρc), a *Difusividade Térmica* (a) e a *Efusividade Térmica* (b).

2.3.2.4 Calor Específico Volumétrico

O calor específico volumétrico (ρc) é o produto entre o calor específico e a densidade e caracteriza a “capacidade de armazenamento de calor” ou “capacidade térmica volumétrica de um material”.

Uma vez que o calor específico varia muito pouco entre os materiais, a capacidade de armazenamento destes depende estritamente da densidade dos mesmos. Por essa razão, faz-se referência às paredes de pedra, concreto ou tijolo como de alta capacidade de acúmulo de calor, diferentemente dos painéis leves, de materiais isolantes ou compostos (GONZÁLEZ, 2002).

2.3.2.5 Difusividade Térmica

A difusividade térmica (a) expressa a capacidade de um material para transmitir uma variação de temperatura (LAVIGNE, 1994). Esta propriedade trata da noção de velocidade de difusão e é determinada pela equação 2.1. Sua unidade é expressa em m^2/s .

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad [\text{Eq. 2.1}]$$

Onde:

a = difusividade térmica do material (m^2/s);

λ = condutividade térmica do material ($W/m.K$)

ρ = densidade do material (kg/m^3)

c = calor específico do material ($J/kg.K$)

Conceitualmente, a difusividade mostra como se difunde o calor, sendo proporcional à velocidade de propagação de uma onda de temperatura dentro de uma parede ou um teto (CORBELLA; YANNAS, 2003).

Corbella e Yannas (2003) exemplificam o efeito da difusividade considerando-se uma parede muito absorvente, sobre a qual há grande incidência de radiação solar. A temperatura da face externa dessa parede aumenta significativamente. Se a parede tiver difusividade térmica “ a ” grande, rapidamente haverá um aumento da temperatura na face interna (o que por sua vez aumentará a temperatura do ar no interior). Um valor baixo de “ a ” consegue retardar em muitas horas o aumento de temperatura da face interna da parede.

Segundo Givoni (1998), valores superiores de difusividade resultam em difusões mais rápidas do calor através da massa do material. Geralmente, a difusividade é alta para materiais de condutividade térmica alta e capacidade de armazenamento de calor baixa.

Assim como mostra a figura 2.8, para “a” maior, corresponde uma maior velocidade de propagação da onda de temperatura.

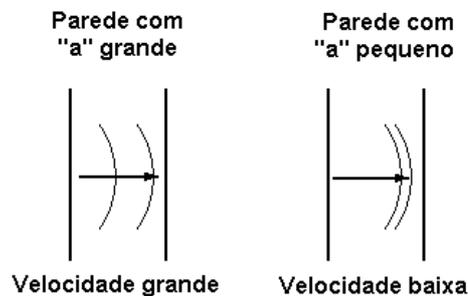


Figura 2.8: Propagação da onda de temperatura em função da difusividade.

Fonte: CORBELLA; YANNAS (2003)

2.3.2.6 Efusividade Térmica

A efusividade térmica (b) expressa a capacidade de um material para absorver ou restituir um fluxo de calor (LAVIGNE, 1994). Esta propriedade caracteriza como facilmente o calor pode ser absorvido pela superfície do material e é determinada pela equação 2.2.

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c} \quad [\text{Eq. 2.2}]$$

Onde:

b = difusividade térmica do material ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$)^{1/2};

λ = condutividade térmica do material ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

ρ = densidade do material (kg/m^3)

c = calor específico do material ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

Segundo Corbella e Yannas (2003), a efusividade térmica é proporcional à quantidade de energia que um material de construção, ou um elemento interno, é capaz de absorver (e depois restituir).

Um elemento interno que tenha “ b ” grande indica que, em caso de elevação da temperatura do ar interno, ele “roubará” muita energia desse ar; como consequência, a temperatura do ambiente interno não aumentará tanto (Figura 2.9).

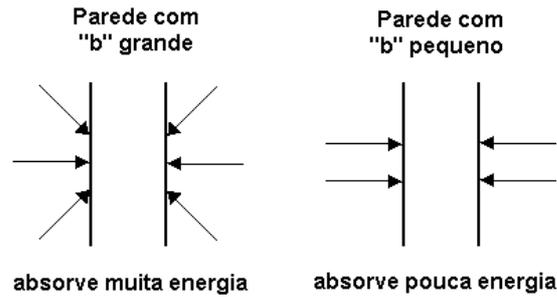


Figura 2.9: Absorção de energia em uma parede em função da efusividade.

Fonte: CORBELLA; YANNAS (2003)

O processo inverso também acontece: quando o ar interno diminui sua temperatura, os materiais com valor elevado de "b" lhe entregarão energia, não deixando que o resfriamento seja muito grande. Assim, as oscilações da temperatura serão menores. A amplitude será muito menor dentro do ambiente comparada ao exterior (CORBELLA; YANNAS, 2003).

Outros dois gráficos apresentados por González (2002) mostram a correlação entre a difusividade e a efusividade térmica, em escala logarítmica, para diferentes materiais. Em geral, pode-se dizer que, para valores baixos de efusividade ($0 < b < 300$), à medida que esta aumenta, a difusividade diminui exponencialmente (Figura 2.10). E para valores altos de efusividade ($b > 1000$), a difusividade cresce exponencialmente. Porém, a correlação com a difusividade é muito dispersa para valores intermediários de efusividade ($300 < b < 1000$).

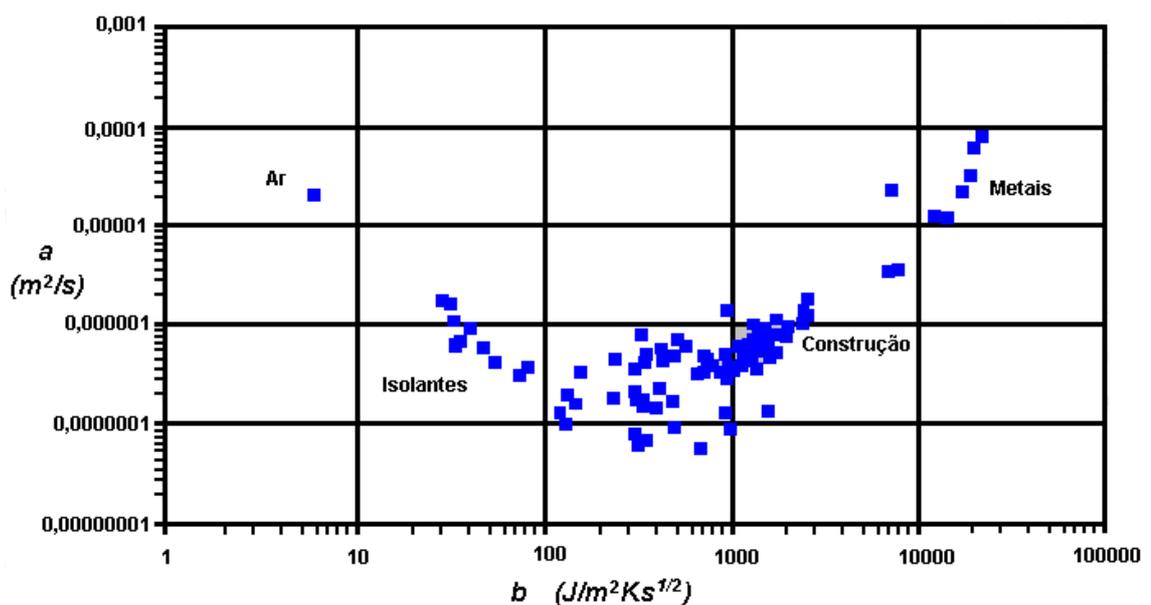


Figura 2.10: Correlação entre difusividade (a) e efusividade térmica (b) dos materiais.

Fonte: Adaptado de GONZÁLEZ (2002)

No gráfico seguinte (Figura 2.11), são apresentados os materiais isolantes e os de construção. Esta última correlação permite compreender de maneira muito mais rápida a relação entre os diferentes materiais.

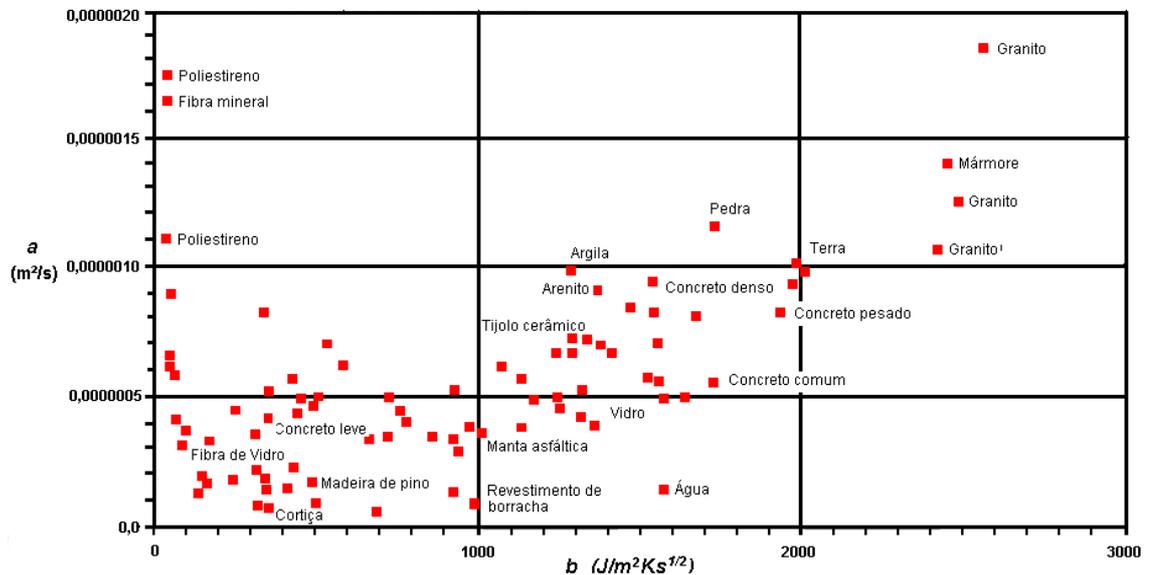


Figura 2.11: Correlação entre difusividade (a) e efusividade térmica (b) para diferentes tipos de materiais de construção.

Fonte: Adaptado de GONZÁLEZ (2002)

Segundo Lavigne (1994), o projetista deve julgar os materiais de forma menos simplista do que faz usualmente. O autor classifica os materiais em dois grupos: *materiais maciços na escala macroscópica* (Tabela 2.1) e *materiais porosos*.

Tabela 2.1: Materiais maciços na escala macroscópica.

MATERIAL		λ	<i>a</i>	<i>b</i>
Material de alvenaria		Média	Média	Média
Madeira e aglomerado de madeira		Fraca	1/3 da média	Fraca
Fibra de madeira com lâminas		Fraca	1/3 da média	Fraca
Isolantes	Plásticos alveolares	Muito fraca	Média	Muito fraca
	Fibras	Muito fraca	Média	Muito fraca

Fonte: LAVIGNE (1994).

Os *materiais porosos* são aqueles compostos por materiais pré-fabricados, tais como blocos porosos de concreto, tijolo, tijolo vazado, etc. Pode-se considerar os *valores equivalentes* que provocariam os mesmos efeitos que os materiais maciços. Lavigne (1994) faz as seguintes observações sobre os materiais porosos:

- Os vazios “freiam” a passagem do calor. Portanto, a condutividade λ equivalente decresce com a quantidade de vazios;
- A capacidade de absorver calor, por unidade de volume do conjunto, diminui com os vazios (quanto mais vazios, menor a capacidade de armazenar calor). Portanto, o produto ρc equivalente decresce com o aumento da proporção de vazios;
- No que concerne a sua difusividade “ a ”, sua evolução depende de cada caso, tendo em conta que se a condutividade λ equivalente decresce e ρc equivalente decresce, ambos decrescem sem que apenas um deles possa decidir quantitativamente na relação $a = \lambda_{\text{equivalente}} / \rho c_{\text{equivalente}}$;
- No que concerne à efusividade “ b ”, λ e ρc equivalentes decrescem com o aumento da proporção de vazios. A efusividade equivalente $b = \lambda_{\text{equivalente}} \times \rho c_{\text{equivalente}}$ decresce com o aumento de vazios.

De acordo com Izard (1993), para reduzir as amplitudes de um fluxo térmico, as paredes do envelope (paredes externas) devem apresentar uma fraca difusividade e uma forte efusividade. Esse objetivo pode ser atingido seja por meio da escolha de um material único adequado em uma parede homogênea (por exemplo, concreto comum), seja pelo emprego criterioso de paredes compostas de forma tal que a fraca difusividade esteja na face exterior e a forte efusividade na face interna (por exemplo: parede de concreto denso, revestida externamente por fibra de madeira).

2.3.3 Atraso Térmico

O calor produzido na superfície externa de um elemento submetido á radiação solar se transmite lentamente para o interior do ambiente. Este calor é transmitido de partícula em partícula, o que provoca um certo retardo (atraso) no tempo. Este atraso depende dos parâmetros que intervêm no processo de transmissão de calor por condução em regime variável, ou seja, a condutividade térmica (λ), o calor específico (c), a densidade (ρ) e a espessura (e). No projeto de norma da ABNT (2003a, p.4), encontra-se a seguinte definição para *Atraso Térmico* (φ):

Tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor. O atraso térmico depende da capacidade térmica do componente construtivo e da ordem em que as camadas estão dispostas (ABNT, 2003a, p.4).

O atraso térmico em uma placa homogênea (constituída por um único material), com espessura “e” e submetida a um regime térmico variável e senoidal, com período de 24 horas, pode ser estimado pela equação 2.3 ou 2.4 (ABNT, 2003b):

$$\varphi = 1,382.e \sqrt{\frac{\rho.c}{3,6\lambda}} \quad [\text{Eq. 2.3}]$$

$$\varphi = 0,7284.\sqrt{R_t.C_t} \quad [\text{Eq. 2.4}]$$

Onde:

φ = atraso térmico (horas);

e = espessura da placa (m);

λ = condutividade térmica do material (W/m.K);

ρ = densidade do material (kg/m³);

c = calor específico do material (J/kg.K);

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente ((m².K)/W);

C_t = capacidade térmica do componente (kJ/m².K).

No caso de um componente formado por diferentes materiais, superpostos em “n” camadas paralelas às faces (perpendiculares ao fluxo de calor), o atraso térmico varia conforme a ordem das camadas.

Para calor específico em (kJ/(kg.K)), o atraso térmico é determinado através da expressão 2.5:

$$\varphi = 1,382.R_t \sqrt{B_1 + B_2} \quad [\text{Eq. 2.5}]$$

Onde:

R_t = resistência térmica de superfície a superfície do componente ((m².K)/W);

B_1 = é dado pela equação 2.6;

B_2 = é dado pela equação 2.7.

$$B_1 = 0,226 \frac{B_0}{R_t} \quad [\text{Eq. 2.6}]$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t} \right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10} \right) \quad [\text{Eq. 2.7}]$$

Onde:

B_0 = é dado pela equação 2.8.

$$B_0 = C_T - C_{Text} \quad [\text{Eq. 2.8}]$$

Onde:

C_T = é a capacidade térmica total do componente (kJ/(m².K));

C_{Text} = é a capacidade térmica da camada externa do componente (kJ/(m².K)).

Observações:

1) Nas equações 2.7 e 2.8, o índice “ext” se refere à última camada do componente, junto à face externa;

2) Considerar B_2 nulo, caso seja negativo.

2.3.4 Amortecimento Térmico

Durante o processo de transmissão de calor, nem todo o calor que entra através da face externa de um elemento chegará à face interna, pois parte dele será consumida no aquecimento do próprio material da parede. Portanto, o valor máximo da temperatura interna será menor que o da externa. Segundo Rivero (1985), a propriedade de um fechamento de diminuir a amplitude das variações térmicas é chamada de *capacidade de amortecimento*.

Sendo A_{int} e A_{ext} respectivamente as amplitudes de variação das temperaturas interna e externa, define-se o Coeficiente de Amortecimento (μ) de um sistema construtivo como o quociente entre estas duas amplitudes (Equação 2.9):

$$\mu = \frac{A_{int}}{A_{ext}} \quad [\text{Eq. 2.9}]$$

Onde:

μ = coeficiente de amortecimento (adimensional);

A_{int} = amplitude interna (K);

A_{ext} = amplitude externa (K).

Embora adotada internacionalmente, esta definição inverte o conceito usual da palavra “amortecimento”, pois os maiores valores de μ correspondem às maiores oscilações da temperatura interna. Por este motivo, torna-se conveniente definir uma outra variável diretamente proporcional ao amortecimento, chamada de Fator de Amortecimento (μ') e expressa pela equação 2.10:

$$\mu' = 1 - \mu = 1 - \frac{A_{int}}{A_{ext}} \quad [\text{Eq. 2.10}]$$

A figura 2.12 indica as variações do fator de amortecimento ($\mu'=1-\mu$) para diversos materiais e em função das espessuras do componente construtivo (DORNELLES; RORIZ, 2003). Os cálculos foram feitos através do método da Admitância³, conforme equações apresentadas por Roriz (1996).

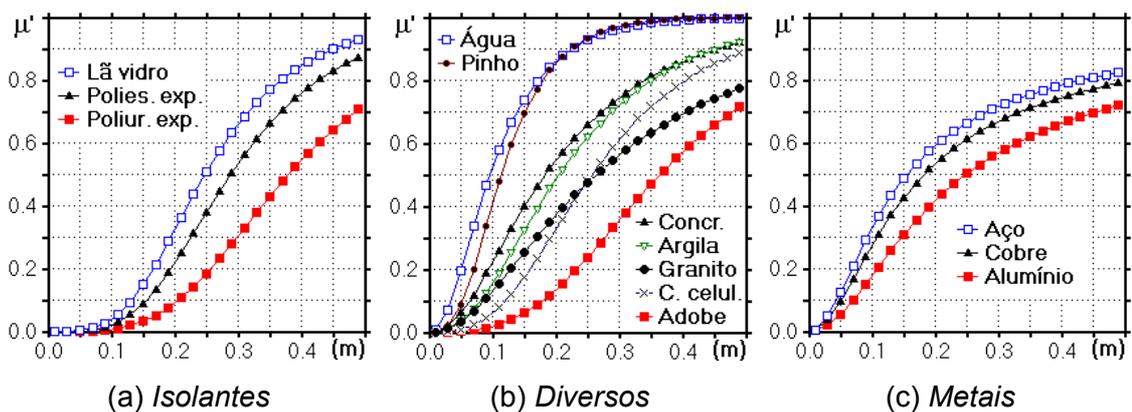


Figura 2.12: Fator de Amortecimento (μ') em função da espessura, para diferentes materiais.

Fonte: DORNELLES; RORIZ (2003)

³ Procedimento da Admitância - “Técnica para estimar transferências de energia e mudanças de temperatura sob condições cíclicas estacionárias. Foi desenvolvido no BRE (Building Research Establishment), por Danter e Loudon (1970), como um processo de cálculo das temperaturas no interior de edificações e é particularmente recomendado para climas em que as cargas térmicas provenientes da radiação solar sejam mais significativas”. (RORIZ, 1996, p.19)

No gráfico 2.12b, o alto calor específico da madeira (pinho) provoca o excelente desempenho deste material em relação ao amortecimento térmico. Percebe-se, por exemplo, que uma parede maciça de pinho com 15 cm de espessura provoca um amortecimento de 0,70, ou seja, faz com que a oscilação da temperatura interna corresponda a apenas 30% da que ocorre com a externa. Para proporcionar o mesmo resultado, seriam necessários 27 cm de concreto ou tijolo (argila), ou 34 cm de concreto celular, ou 40 cm de granito, ou 50 cm de adobe.

Esta comparação demonstra o equívoco comum de se relacionar a inércia térmica com a massa. Para uma mesma espessura, a massa da madeira representa apenas pequena parcela (em torno de 25%) da massa do concreto ou do granito. Vale observar, além destes aspectos, que para espessuras abaixo de 25 cm, o granito apresenta um fator de amortecimento menor que o do concreto celular. Aos 25 cm as curvas se cruzam e, para maiores espessuras, o concreto celular é que tem o melhor resultado.

Neste trabalho, adotou-se o conceito usual de coeficiente de amortecimento térmico, citado por Rivero (1985), conforme a equação 2.9.

2.4 Inércia Térmica

A arquitetura bioclimática é baseada em estratégias arquitetônicas e construtivas que evitem desperdício de energia e otimizem o conforto ambiental de seus usuários. Uma destas estratégias é a utilização da Inércia Térmica, importante característica dos sistemas construtivos, que provoca dois importantes efeitos sobre os fluxos de calor entre o ambiente interno das edificações e o meio exterior: redução das amplitudes (*Amortecimento* - μ) das temperaturas internas e defasagem (*Atraso* - φ) das mesmas em relação às temperaturas externas.

A inércia térmica depende da *Difusividade* (a) e da *Efusividade Térmica* (b) dos materiais empregados nos sistemas construtivos e pode ser caracterizada como a capacidade que tem uma edificação de armazenar calor e liberá-lo algum tempo depois. Em edificações com pouca inércia, as oscilações das temperaturas internas tendem a acompanhar as que ocorrem no ambiente externo. A necessidade de grande inércia térmica aumenta, segundo Papst (1999), quanto maior a variação da temperatura externa, radiação solar e ganhos de calor.

Lamberts, Dutra e Pereira (1997), definem a inércia térmica como a capacidade que o material tem de reter no seu interior parte do calor que é conduzido através dele, consequência de sua massa térmica⁴. Quanto maior a massa térmica, maior o calor retido. Os autores afirmam que, no caso de uma localidade onde as temperaturas oscilam entre valores altos durante o dia e baixos à noite, pode-se utilizar a massa térmica dos fechamentos para acumular calor durante o dia, retê-lo e, mais tarde (à noite), devolvê-lo ao interior. Haverá uma diminuição da amplitude da temperatura interna, a qual oscilará de forma amortecida. O pico de temperatura acontecerá algumas horas após o fechamento estar submetido ao pico da temperatura externa (atraso térmico).

Papst (1999) comenta que o uso da inércia térmica em ambientes comerciais pode fazer com que o pico máximo da temperatura interna ocorra em um período posterior, normalmente o noturno, quando não há ocupação. No caso de ambientes residenciais, este pico de temperatura pode ocorrer quando a edificação está tendo sua maior ocupação. Desta forma, há uma maior preocupação com o uso da inércia térmica em ambientes residenciais, pois o horário onde a edificação melhora as condições internas pode ser o horário de menor uso, sendo que o pior desempenho térmico pode ocorrer no horário de maior ocupação (noturno).

O efeito da inércia térmica para regiões de clima temperado não se limita somente ao período de 24 horas. Para Rivero (1985), se após vários dias consecutivos de calor a temperatura do ar desce bruscamente, o interior dos locais mantém-se ainda quente por um ou dois dias. É a chamada Inércia Térmica Global do edifício, ou seja, a capacidade de uma edificação em acumular calor lentamente nos materiais que a compõe, para cedê-lo depois.

Para Koenigsberger et al (1977), o papel da inércia térmica é significativo quando existem grandes flutuações entre as temperaturas externa e interna. Esta propriedade, frente às variações térmicas externas, quando a estrutura é esfriada e aquecida periodicamente com a presença de radiação solar, apresenta um efeito marcante sobre as condições térmicas internas. A inércia térmica estabelece condições internas mais estáveis diariamente, tanto no verão quanto no inverno.

⁴ Massa Térmica - Análise combinada entre a densidade do material que compõe o fechamento e sua espessura (PAPST, 1999). O termo "massa térmica" será usado neste trabalho sempre que a referência bibliográfica empregar a expressão "thermal mass". Uma discussão sobre esse termo é abordada no item 2.4.1 deste trabalho.

Segundo Roriz (2001a), historicamente, a literatura especializada sempre recomendou o aproveitamento da inércia em edificações localizadas em regiões secas e desérticas, onde esta propriedade proporciona resultados mais significativos diante das acentuadas oscilações térmicas típicas destas regiões. Entretanto, pesquisas desenvolvidas nos últimos anos vêm indicando que a chamada “massa térmica” pode ser interessante mesmo em climas semi-úmidos, como o existente no interior do estado de São Paulo. A seguir, é feita uma discussão sobre o termo “massa térmica” e sua relação com a inércia, além do relato de alguns estudos relacionados à utilização destas propriedades para diminuir o uso de sistemas artificiais de climatização.

2.4.1 Massa Térmica x Inércia Térmica

Diversos autores costumam usar o conceito “*thermal mass*” em seus trabalhos, o qual se refere à combinação entre densidade (ρ) e espessura (e) dos componentes de uma edificação. Segundo Papst (1999), devido ao calor específico dos materiais de construção (inorgânicos) encontrar-se na estreita faixa de 0,87 a 1,67 kJ/kg.K, a *capacidade térmica*⁵ dos componentes das edificações é quase completamente dependente do peso da estrutura. Assim, a massa térmica das edificações pode estar contida em paredes, partições internas, pisos, coberturas, etc., desde que sejam constituídos de material com grande capacidade térmica, como o concreto, tijolos, telhas, etc.

Segundo Givoni (1998), o efeito quantitativo da massa no desempenho térmico das edificações depende da interação entre a massa e a condutividade térmica do material que formam os elementos massivos, assim como da posição relativa das diferentes camadas, com diferentes massas e resistências térmicas. Muitos tipos de paredes e coberturas são compostos de camadas de materiais com diferentes propriedades térmicas, como elevada massa (concreto ou pedra) e materiais isolantes. Givoni comenta que o efeito da massa de tais elementos construtivos sobre a média das temperaturas internas, atraso e oscilação, para uma edificação fechada e sem ar condicionado, depende da ordem das camadas do isolante e da massa.

⁵ Capacidade Térmica - Produto entre o calor específico (c) e a densidade (ρ) de um material pela espessura (e) do fechamento. Sua unidade é expressa em kJ/(m².°C). É a quantidade de calor requerida para elevar em uma unidade a temperatura de um fechamento de área igual à unidade e de uma espessura determinada (RIVERO, 1985).

Portanto, o efeito da massa não depende somente da espessura e peso das paredes e coberturas, mas também da quantidade e localização do isolante no envelope. Givoni (1998) exemplifica este efeito considerando que uma edificação com paredes de 20 cm de espessura, isoladas externamente por 5 cm de poliestireno, é efetivamente de maior massa térmica do que uma edificação com paredes de 40 cm de concreto sem isolante, apesar de ter apenas metade da massa desta.

Segundo Kalogirou, Florides e Tassou (2002), o conceito de “thermal mass” é comumente utilizado para expressar a habilidade dos materiais em armazenar uma quantidade significativa de energia térmica e retardar a transferência de calor através do componente de uma edificação. Este atraso na transferência do calor conduz a três importantes resultados:

- O tempo de resposta mais lento tende a moderar as flutuações das temperaturas internas frente às oscilações das temperaturas externas;
- Em climas quentes ou frios, reduz a necessidade de condicionamento artificial em comparação com edificações similares, de pouca massa térmica;
- Transfere a demanda de energia da edificação para períodos fora do horário de pico, pois a armazenagem de energia é controlada através do correto dimensionamento da massa e dos sistemas de climatização artificial.

A massa térmica, segundo esses autores, pode ser caracterizada pela difusividade térmica (a) dos materiais de construção. A transferência de calor através de um material de alta difusividade térmica é rápida, a quantidade de calor armazenada em seu interior é relativamente pequena e o material responde rapidamente às mudanças de temperatura.

O efeito da massa térmica no comportamento da edificação varia principalmente com o clima do local onde o edifício está inserido e com a posição do isolamento da parede com relação à massa da edificação. O clima ideal para se obter vantagens através do uso da massa térmica é aquele que apresenta grandes flutuações das temperaturas diárias.

Segundo Kosny (2001), em alguns climas, a construção de envelopes massivos em edificações (concreto, terra, etc.), pode ser uma das maneiras mais efetivas de reduzir as cargas para aquecimento e refrigeração de edificações. Na Europa, a grande maioria das edificações residenciais é construída usando

tecnologias de paredes massivas, fazendo com que o ambiente das edificações, sem ar condicionado, seja relativamente confortável, mesmo em países com climas quentes como Espanha, Itália ou Grécia.

2.4.2 Uso de Inércia Térmica como Estratégia Bioclimática

Diversos são os estudos relacionados à utilização da Inércia Térmica (ou Massa Térmica) como estratégia bioclimática, visando melhorar as condições de conforto térmico e minimizar os custos com o consumo de energia das edificações.

Para quantificar a influência real da inércia, pesquisadores do Departamento de Energia dos Estados Unidos desenvolveram recente pesquisa no Laboratório Nacional de Oak Ridge. Para 6 diferentes cidades, foram analisados três diferentes sistemas construtivos: casas construídas com troncos de madeira, painéis de concreto autoclavado e blocos de concreto. Com base nos resultados, estabeleceram fatores de correção (multiplicadores) a serem aplicados sobre as resistências térmicas de cada sistema analisado e em função de cada clima específico. Esta correção no cálculo do desempenho é denominada “Benefício Dinâmico para Sistemas Massivos”, ou DBMS, “Dynamic Benefit for Massive Systems” e vem sendo adotada em novas normas técnicas estaduais sobre eficiência energética de edificações (WILSON, 1998). Os resultados desta pesquisa indicam que, dependendo do clima, o efeito da inércia pode ser negativo, neutro ou positivo sobre o consumo energético das edificações. Nas construções em blocos de concreto, por exemplo, a inércia só foi recomendável para o clima de 1 entre as 6 cidades estudadas.

Norén et al (1999) calcularam a necessidade anual de energia para aquecer três edificações suecas, com diferentes inércias. A partir dos resultados obtidos neste estudo, puderam observar que a inércia térmica tem grande influência sobre o consumo anual de energia para aquecimento de edificações em climas semelhantes ao da Suécia. Os autores concluíram que a edificação de maior inércia térmica apresentou menor consumo de energia para climatização e que bastam pequenas mudanças na inércia para se obter uma grande diferença no consumo de energia final.

Em algumas localidades dos EUA, estudos de campo têm demonstrado que a demanda de energia para aquecimento e refrigeração de edificações, contendo fechamentos de alta massa térmica, pode ser menor do que para edificações similares, construídas com paredes leves.

A construção de um conjunto de edificações residenciais, localizadas em Pueblo (Colorado), combinou o conceito de massa térmica com o projeto solar passivo, para criar casas energeticamente eficientes, confortáveis, sustentáveis e mais acessíveis financeiramente que muitos outros tipos de casas solares. O Departamento de Energia do Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) ajudou a projetar e monitorar o uso de energia em duas das primeiras casas construídas. Como resultado, a empresa responsável pela construção pôde desenvolver casas 63% mais eficientes energeticamente que as casas convencionais construídas anteriormente (NREL, 2000).

Kosny et al (2001) realizaram uma análise teórica e experimental do desempenho térmico e energético de sistemas construtivos com alta e baixa massa térmica. A performance térmica de 16 tipos de paredes foi investigada para edificações residenciais e o potencial de economia de energia foi apresentado para dez diferentes climas dos EUA. A análise comparativa das 16 diferentes configurações dos materiais mostrou que, para paredes de elevada resistência térmica, obteve-se uma economia de energia nas edificações acima de 8%. No caso de edificações com paredes de madeira substituídas por paredes massivas, essa economia chegou a 18% de toda a energia consumida pela edificação. Segundo os autores, o benefício da massa térmica é função da configuração do material da parede, clima, tamanho da edificação e orientação.

Shaviv, Yezioro e Capeluto (2001) investigaram a influência da massa térmica e da ventilação noturna sobre a temperatura máxima interna no verão, para diferentes locais no clima quente e úmido de Israel. Segundo os autores, a combinação entre massa térmica e ventilação natural pode reduzir a temperatura máxima interna nas edificações durante o verão. Desta forma, as temperaturas de conforto podem ser atingidas pela aplicação adequada destas duas estratégias, além de se economizar energia, caso um sistema de ar condicionado seja utilizado. Os resultados obtidos mostraram que, para este clima específico de Israel, pode-se obter uma redução de 3 a 6°C em uma edificação pesada, sem a utilização de um sistema de ar condicionado. Para Shaviv, Yezioro e Capeluto (2001), a exata redução obtida depende da quantidade de massa térmica, da taxa de ventilação noturna e da oscilação da temperatura do local entre o dia e a noite.

2.4.3 Os Tipos de Inércia Térmica segundo Pierre Lavigne

Para Pierre Lavigne (2001), quando se considera o regime dinâmico das solicitações periódicas, estas produzem uma amplitude interior (A_{int}) que é função de dois tipos de inércia que resistem às solicitações: uma *Inércia de Transmissão* e uma *Inércia de Absorção*.

2.4.3.1 Inércia de Transmissão

A *inércia de transmissão* é característica da envolvente e resiste à transmissão das solicitações provocadas pelas oscilações da temperatura exterior e pela energia solar incidente.

Segundo Lavigne (2001), a temperatura e o sol, parâmetros do regime periódico, atuam de modos diferentes. Ou seja, as partes opacas da envolvente transmitem sempre, nos materiais, as oscilações de temperatura e radiação segundo os mesmos princípios físicos. Mas as partes transparentes, que transmitem as oscilações de temperatura da mesma maneira que as opacas, transmitem a oscilação de radiação principalmente por sua transparência, sem provocar o amortecimento e o atraso que ocorrem nas partes opacas. Assim, para uma envolvente, pode-se considerar:

Uma *inércia de transmissão* da oscilação da temperatura, que depende:

- Das diferentes superfícies opacas e transparentes;
- Da constituição das paredes: a inércia cresce com a espessura, com a efusividade (b) e com o inverso da difusividade (a) e da condutividade (λ) dos materiais. Em paredes com mais de uma camada, é preferível localizar a mais isolante no lado exterior da envolvente.

Uma *inércia de transmissão* da oscilação de radiação, que depende:

- Das diferentes superfícies opacas e transparentes e de suas orientações e proteções solares, particularmente para as transparentes;
- Da constituição das paredes opacas, conforme as mesmas propriedades já mencionadas para a oscilação da temperatura, mas considerando também a absorvância (α) das superfícies exteriores em relação à radiação solar.

2.4.3.2 *Inércia de Absorção*

A *inércia de absorção* é característica das vedações interiores (paredes, pisos, estruturas, etc.) e das camadas internas das envolventes e limita a amplitude da temperatura interior por absorção (e “desabsorção”) da energia térmica que penetra no volume (edifício). A *inércia de transmissão* é desejável para reduzir a transmissão das oscilações, mas a *inércia por absorção* é necessária, pois a de transmissão não pode ser infinita e sempre há alguma absorção. Além deste aspecto, existe uma produção de calor interna ao volume. Segundo Lavigne (2001), a *Inércia por Absorção* cresce com:

- As superfícies em contato com o ar exterior e que podem absorver o calor: paredes, estruturas, pisos, etc. e a camada interna da envolvente;
- A efusividade dos materiais das vedações: maior efusividade resulta em maior inércia;
- A espessura das camadas que absorvem o calor (mas não proporcionalmente). Para um período normal de oscilação de 24 horas e no caso de paredes de concreto, pedra ou tijolo cerâmico maciço, a inércia por absorção tem comportamento assintótico a partir de 10 cm de espessura.

Lavigne comenta que, quando o mesmo ciclo se repete diariamente, não há vantagem (térmica) em se ter vedações internas com espessuras além de 10 cm. Neste caso, a *inércia por absorção* pode ser definida como uma “quantidade de efusividade” que é a soma das quantidades de efusividade de cada superfície, ou seja, o produto entre a efusividade do material da superfície considerada e a respectiva área desta mesma superfície.

2.4.4 *A Inércia Térmica e o Método de Mahoney*

Carl Mahoney, baseado em longa experiência desenvolvida no Department of Tropical Studies, Architectural Association School, Londres, e auxiliado por uma equipe de especialistas e ex-alunos daquela instituição, elaborou um método de análise do desempenho térmico de edificações, que há mais de trinta anos facilita a escolha de recursos apropriados de desenho bioclimático.

As Tabelas de Mahoney foram inicialmente desenvolvidas em 1969 e publicadas em uma monografia da Organização das Nações Unidas, de autoria de Otto Koenigsberger, Carl Mahoney e John Martin Evans (1971). Este trabalho já incluía os ajustes, resultantes do teste da metodologia em mais de 50 contextos climáticos diferentes, e trazia exemplos de recomendações em seis tipos climáticos diferentes. Essa publicação original circulou principalmente entre os órgãos governamentais e teve uma distribuição reduzida nos meios acadêmicos e de pesquisa (EVANS, 1999).

Com a sua inclusão no “Manual of Tropical Housing” (KOENIGSBERGER et al, 1974) e, posteriormente, com a edição destas publicações traduzidas para o espanhol e o francês, assegurou-se uma ampla difusão do método. Evans (2000) comenta que o conceito foi desenvolvido durante um estudo realizado na Nigéria, onde o clima muda gradualmente, desde as condições quentes e úmidas sobre a costa Sul, com pouca variação durante o ano, até condições típicas de deserto no Norte, com maior amplitude térmica diurna e mudanças de estação mais marcantes.

Os livros sobre arquitetura tropical propunham soluções que eram modelos para climas específicos, tais como os climas quente e úmido das zonas equatoriais ou o quente e seco do deserto, como exemplificado no livro de Olgyay (1963). No entanto, para Evans (2000), o maior problema reside em se definir normas bioclimáticas de desenho para climas de transição, onde os projetistas requerem informações sobre as modificações das normas na medida em que variam as condições climáticas.

No Método de Mahoney, a análise é realizada em quatro etapas:

1) Análise dos dados meteorológicos típicos de cada mês (temperaturas médias máximas e mínimas, amplitude média, umidade relativa, pluviosidade e velocidade e direção dos ventos), preparados com certas simplificações a fim de se determinar suas características principais;

2) Comparação destes dados com zonas de conforto diurnas e noturnas, tendo como resultado um diagnóstico diurno e noturno dos meses com condições quentes, frias ou confortáveis;

3) Identificação de indicadores de umidade (U1, U2, U3) e aridez (A1, A2, A3), a partir da análise das condições climáticas coincidentes com conforto ou desconforto em cada mês. Por exemplo: calor com alta umidade e baixa amplitude térmica;

4) Definição de diretrizes de desenho e construção, dependendo do número de meses com distintos indicadores.

Evans (2000) apresentou as principais diferenças entre o Método de Mahoney e outros estudos e métodos, como os diagramas de Olgyay (1963) e Givoni (1976). No Método de Mahoney, as zonas de conforto contemplam variações segundo a temperatura média anual, considerando um modelo adaptável de conforto com diferentes zonas para o dia e a noite. Além disso, é possível avaliar a duração das condições de desconforto e a necessidade de responder com recursos bioclimáticos específicos, equilibrando as necessidades em distintas épocas do ano.

Estas diferenças podem ser vistas claramente na aplicação da inércia. O Método de Mahoney considera a inércia térmica indispensável, quando uma acentuada amplitude média mensal (igual ou superior a 10°C) coincide com umidade baixa ou moderada (grupo de umidade menor que 4) - indicador A1. Sua utilização é recomendada através da aplicação de coberturas pesadas, para climas compostos com estações úmidas e secas, que apresentam no mínimo 6 meses do indicador A1, e para todas as paredes de edificações que apresentem no mínimo 3 meses deste indicador.

Atualmente, o Método de Mahoney tem sido pouco utilizado, aparecendo ocasionalmente em trabalhos apresentados em congressos e alguns cursos de pós-graduação. Dentre as limitações deste método, Evans (1999) destaca os seguintes aspectos:

- Foi desenvolvido para climas equatorial e tropical, como pode ser visto a partir dos indicadores. Apesar de grande parte dos climas brasileiros enquadrar-se nesta categoria, uma área significativa do país apresenta climas com características de temperado, para os quais é necessário o desenvolvimento de indicadores adequados;
- Foi planejado para fornecer diretrizes iniciais de projeto para empreiteiros, muitas vezes não familiarizados com regiões distantes em países de grande extensão. Não havia a intenção de ser uma ferramenta de pesquisa para o enfoque da dimensão bioclimática da arquitetura;
- Suas recomendações foram originalmente desenvolvidas para edifícios escolares, mas adaptadas posteriormente para a habitação popular. As aplicações relativas a outras tipologias construtivas devem ser feitas com cautela. Os conceitos

envolvidos aplicam-se a edifícios sem ar condicionado, que maximizem o uso de estratégias passivas de aquecimento e refrigeração.

Apesar destas limitações, segundo Evans (1999), o Método de Mahoney apresenta algumas vantagens didáticas, necessárias para qualquer ferramenta de projeto com enfoque bioclimático:

- **Clareza:** apresenta um processo explícito, conjugando dados climáticos, análise de conforto térmico e indicadores de estratégias bioclimáticas para recomendações de projeto;
- **Velocidade:** as tabelas podem ser preenchidas rapidamente, impedindo interrupções no processo de projeto. Alguns programas computacionais utilizam as Tabelas de Mahoney para simulações do desempenho térmico de edificações, como o Arqitrop (Brasil) e Archipak (Austrália);
- **Dados de entrada simplificados:** para obter as recomendações de projeto são necessários apenas dados climáticos limitados e disponíveis para vários centros urbanos;
- **Saída para projeto:** relacionada às etapas do processo de projeto, promovendo informações simples nas etapas adequadas do desenvolvimento desse;
- **Praticidade:** fornece recomendações relativas aos elementos de projeto, tais como o espaço exterior, formas da edificação, coberturas, paredes e aberturas.

Como o próprio nome sugere, Carl Mahoney desenvolveu o conceito inicial das Tabelas de Mahoney. No entanto, segundo Evans (2000), Otto Koenigsberger foi quem viu o potencial do método e motivou um grupo de colaboradores, possibilitando uma grande difusão das tabelas através de duas importantes publicações. O método foi visto por ele como uma contribuição ao grande problema de melhorar a qualidade de vida da população dos países em desenvolvimento.

Com o objetivo de otimizar o conforto térmico de usuários de edificações na cidade de São Carlos, SP e evitar o desperdício de energia com sistemas artificiais de climatização, este trabalho se propôs a avaliar a utilização da inércia térmica em edificações submetidas ao clima específico da cidade. A hipótese em que se baseia esta pesquisa é que, para o clima semi-úmido que apresenta inverno frio e seco e verão quente e úmido, sistemas construtivos com maior inércia térmica proporcionam ambientes mais confortáveis e edificações energeticamente mais eficientes.

Capítulo 3

MATERIAIS E MÉTODOS

"Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros foram".

Alexandre Graham Bell

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para se atingir os objetivos deste trabalho, optou-se por investigar o fenômeno da Inércia Térmica a partir de pesquisas de campo. Assim sendo, com base nos dados obtidos no monitoramento de ambientes de sete diferentes edificações, analisou-se o desempenho térmico de cada ambiente, frente a condições típicas de inverno e verão. Para estes dois períodos, adotando-se um “dia de referência”, fez-se o cálculo do desconforto por frio ou calor acumulado ao longo deste dia, considerando-se os limites de conforto indicados nas Planilhas de Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1971). Com estes valores, estimou-se a necessidade de aquecimento ou refrigeração para restabelecer o conforto térmico nos ambientes.

Para uma análise comparativa, classificou-se a inércia térmica das edificações por meio de um parâmetro chamado Fator de Resposta (*FR*), conforme apresentado por Szokolay (1987). Este parâmetro divide as construções em três diferentes grupos: Construção Leve, Construção Média e Construção Pesada. Com o auxílio da nova versão do software Arquitrop 5.0, ainda de uso restrito, calculou-se o *FR* para cada ambiente monitorado, comparando-os com os resultados obtidos nas pesquisas de campo.

Neste capítulo, são descritos os materiais e métodos adotados nas pesquisas de campo e a forma de tratamento estatístico dos dados obtidos nas medições. Os objetos de estudo são apresentados no capítulo 4.

Os resultados obtidos com as pesquisas de campo são apresentados no capítulo 5 e a análise da inércia térmica das edificações é descrita no capítulo 6.

3.1 Instrumentos de Medição

Para a coleta de temperaturas de bulbo seco, no interior e exterior de cada ambiente, foi adotado um sistema eletrônico de aquisição de dados, constituído por registradores de temperatura e umidade, modelo “HOBO”, fabricados pela empresa ONSET Computer Corporation (Figura 3.1).



Figura 3.1: Sensor utilizado para as medições, modelo HOBO.

Fonte: <http://www.onsetcomp.com/products>

Este sistema foi escolhido porque apresenta boa precisão ($\pm 0,39$ °C nas medidas de temperatura e $\pm 3\%$ nas medidas de umidade relativa) e tem alta capacidade de armazenamento de dados (entre 32000 e 65000 medições).

Foram utilizados 10 sensores, sendo que 7 deles medem temperatura e umidade (Hobos H487, H488, H489, H490, H491, H492 e H493), 1 mede temperatura e umidade, porém com uma precisão muito maior (Hobo H395) e 2 sensores medem temperatura, umidade, luminosidade e temperatura externa - esta por meio de um cabo conectado ao sensor - (Hobos H132 e H133).

Devido à diversidade de sensores utilizados, optou-se por fazer uma verificação da dispersão dos valores medidos, onde todos os sensores foram colocados no interior de um sistema de isolamento térmico, constituído por duas caixas de poliestireno expandido (EPS), formando uma câmara de ar entre elas (Figura 3.2a). Essas caixas foram revestidas interna e externamente por película de alumínio brilhante, para elevar a resistência térmica total do conjunto (Figura 3.2b).



(a)



(b)

Figura 3.2: Caixas de EPS utilizadas na calibração dos sensores.

Os sensores registraram valores de temperatura do ar durante 5 dias, em intervalos de 10 minutos. A caixa permaneceu fechada por um tecido, permitindo pequenas trocas de ar com o meio exterior. Os valores obtidos em todos os sensores foram comparados com os dados obtidos pelo sensor H395, que apresenta maior precisão ($\pm 0,2$ °C). A tabela 3.1 apresenta os valores a serem somados aos resultados, obtidos durante os monitoramentos de temperatura de bulbo seco.

Tabela 3.1: Correção dos valores medidos em cada sensor.

SENSOR	VALOR A SER SOMADO (°C)
H395	0,000
H132	0,215
H133	0,204
H487	0,216
H488	0,222
H489	0,337
H490	0,444
H491	0,300
H492	0,285
H493	0,630

O treinamento no uso dos instrumentos foi realizado através de monitoramentos pilotos, visando-se obter mais informações sobre os sensores e uma definição das melhores condições e formas de monitoramento das temperaturas de bulbo seco. As medições iniciais indicaram que, para registrar exatamente as temperaturas do ar, mesmo em ambientes internos, o sistema deveria ser protegido contra a influência de radiações térmicas (Figura 3.3). Neste sentido, cada sensor foi instalado no interior de um recipiente de alumínio, com tampa e com pequenos furos laterais, que permitissem o movimento do ar. Para evitar o contato direto entre o aparelho e o alumínio, adotou-se um suporte de madeira.



Figura 3.3: Recipiente de alumínio para proteção dos sensores.

No interior das edificações, os sensores foram instalados na região central dos ambientes monitorados e a cerca de 1,70 m a partir do piso. No lado externo das edificações, os sensores foram instalados preferencialmente na fachada Sul, protegidos da chuva, radiação solar direta, poeira e roubo.

3.2 Apresentação dos Dados Medidos

3.2.1 Distribuição das Temperaturas Externas e Internas

As temperaturas do ar, medidas a intervalos de 10 minutos no interior e exterior de cada edificação, foram plotadas em gráficos que relacionam temperatura e tempo. Esta forma de apresentação dos dados permite uma melhor compreensão do comportamento climático nos períodos de medições, além de uma análise mais detalhada do desempenho das edificações, quando submetidas a entradas de frentes-frias, variações bruscas da temperatura externa, etc.

3.2.2 Dia de Referência dos Ambientes Monitorados

Segundo o projeto de norma da ABNT (2002), para a avaliação do desempenho térmico de edificações por meio de medição, o dia tomado para análise deve ser um dia típico de projeto, de verão ou inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. Esse projeto de norma recomenda trabalhar com uma seqüência de três dias e analisar os dados do terceiro dia.

É importante comentar que este projeto de norma ainda não foi aprovado e, portanto, suas recomendações devem ser utilizadas com cautela. Considerar uma seqüência de apenas três dias pode ser insuficiente no caso de edificações de alta inércia térmica, uma vez que os efeitos provocados pela inércia podem se manifestar apenas após este período no interior das edificações. No entanto, devido à falta de outra recomendação, adotou-se os parâmetros apresentados nesse projeto de norma.

Desta forma, foi escolhido um dia típico de projeto para cada ambiente monitorado, que será chamado de “*dia de referência*”. Este dia foi escolhido a partir de uma seqüência de três dias de monitoramento, em que a variação da curva de temperatura, no exterior das edificações, apresentou um comportamento homogêneo. O “*dia de referência*” será utilizado para as análises de desempenho no Capítulo 6.

Além de ser uma recomendação do projeto de norma, a escolha de um dia típico de projeto permite uma análise mais real do comportamento das edificações, frente a variações do clima externo. Caso seja adotado um “*dia médio*”, os dias com comportamentos muito dispersos, devido à entrada de frentes-frias ou ondas de calor, podem mascarar o comportamento mais “típico” das temperaturas internas nas edificações. Segundo Roriz (1995), o ar externo atinge sua temperatura mínima por volta do nascer do sol e a máxima no início da tarde, influenciadas, principalmente, pela radiação solar. Devido ao atraso térmico na transmissão da onda de calor, os picos de temperatura interna ocorrerão algum tempo depois de acontecer no exterior. A entrada de frentes-frias transfere os picos de temperatura interna para horários diferentes dos que normalmente ocorrem.

3.3 Ajuste das Curvas de Temperatura Interna aos Dias Representativos de Verão e Inverno

Como citado anteriormente, o dia tomado para análise deve corresponder a um dia típico de projeto, de verão ou de inverno. Analisando-se as normais climatológicas da cidade considerada, pode-se determinar os meses mais representativos para esses períodos. Deste modo, a partir do maior valor entre as médias mensais das temperaturas máximas, obtém-se o mês representativo de verão. Para definir o mês representativo de inverno, determina-se o menor valor entre as médias mensais das temperaturas mínimas, escolhendo-se este mês como o mais representativo deste período.

No entanto, quando o período de medições não corresponde aos meses mais representativos destes momentos, ou quando as edificações são monitoradas em períodos distintos, pode-se adotar um método de tratamento estatístico de dados para corrigir esta falha. Neste caso, considera-se um conjunto de dados obtidos a partir de estações climatológicas locais, o qual compreenda os meses representativos de verão e de inverno, definidos a partir das normais climatológicas. Com base nestes dados, as curvas de distribuição das temperaturas internas são ajustadas ao novo clima externo.

Quando o monitoramento de edificações ocorre em períodos distintos, registram-se diferenças entre os climas externos de cada local monitorado, as quais são parcialmente responsáveis pelas diferenças observadas entre as temperaturas, nos ambientes internos das edificações. Por conseqüência, a comparação entre os

efeitos térmicos dos respectivos sistemas construtivos torna-se mais difícil. Para solucionar este problema, adotou-se um método que permite comparar o comportamento de cada ambiente monitorado, frente a condições semelhantes de clima externo.

Inicialmente, determina-se a relação observada, de hora em hora, entre as temperaturas interna e externa, para cada ambiente monitorado, por meio do cálculo do Fator de Variação da Temperatura Interna (FTI_h). Essa relação é um indicador da capacidade de amortecimento térmico de cada sistema construtivo, conforme a seguinte equação:

$$FTI_h = \frac{(TI_h - TE_{Min})}{A_{Ext}} \quad [\text{Eq. 3.1}]$$

Sendo:

FTI_h = fator de variação da temperatura interna, para a hora “h”;

h = hora do dia, entre 0 e 24h, (horas);

TI_h = temperatura interna na hora “h”, (°C);

TE_{Min} = temperatura externa mínima, (°C);

A_{Ext} = amplitude das temperaturas externas = $TE_{Máx} - TE_{Min}$, (K).

A partir do fator de variação da temperatura interna (FTI_h) de cada ambiente monitorado, faz-se o cálculo estimativo das temperaturas que ocorreriam internamente, se todas as edificações estivessem submetidas ao mesmo clima externo (Equação 3.2).

$$TIC_h = TER_{Min} + FTI_h \times AR_{Ext} \quad [\text{Eq. 3.2}]$$

Onde:

TIC_h = temperatura interna corrigida (ajustada), para a hora “h”, (°C);

h = hora do dia, entre 0 e 24h, (horas);

TER_{Min} = temperatura mínima externa do dia de referência, (°C);

FTI_h = fator de variação da temperatura interna, para a hora “h” (°C);

AR_{Ext} = amplitude externa do dia de referência = $TER_{Máx} - TER_{Min}$, (K).

Com base nas novas temperaturas, obtidas a partir da equação 3.2, determina-se a curva de variação da temperatura interna do ambiente considerado, se estivesse submetido a outro clima externo. Este método parte do pressuposto que, independente do período do ano, as edificações apresentam o mesmo comportamento quando submetidas a diferentes climas externos. Ou seja, a capacidade de amortecimento térmico da edificação não dependerá da época do ano, mas apenas das flutuações cíclicas externas.

3.4 Graus-Dia e Graus-Hora de Desconforto

Segundo Szokolay (1987), o conceito de Graus-Dia (*GD*) de refrigeração pode ser definido como um excesso acumulado de temperatura, acima de um valor estabelecido como “Temperatura de Base” (*T_b*), ao longo de um período mensal ou anual. Trata-se, portanto, de um número indicativo do rigor climático local e pode ser usado para verão ou inverno. No caso do inverno, quantificará o *déficit* acumulado de temperatura abaixo de *T_b*, indicando, portanto, a necessidade de aquecimento. Este número é calculado em relação às médias mensais (*TMM*) ou anuais (*TMA*) da temperatura exterior, conforme apresentado por Szokolay (1987):

GD(ano) = soma das diferenças diárias, ao longo dos 365 dias do ano:

$$GD(ano) = \sum (TMA - T_b) \quad [\text{Eq. 3.3}]$$

GD(mês) = soma das diferenças diárias, ao longo dos dias do mês:

$$GD(mês) = \sum (TMM - T_b) \quad [\text{Eq. 3.4}]$$

De maneira análoga, conforme citado por Roriz (2001b), Graus-Hora (*GH*) é um número que pode ser estimado como $GH = GD \times 24$, mas resultados mais precisos serão obtidos tomando valores horários das diferenças entre a temperatura do ar e a temperatura de base, ao longo de todo o período considerado (dia, mês ou ano):

GH = soma das diferenças horárias, ao longo do período considerado. Em Kh:

$$GH = \sum (T_h - T_b) \quad [\text{Eq. 3.5}]$$

Sendo:

T_h = temperatura do ar no momento “h”, (°C);

h = hora (variando da primeira até a última do período).

O número total de Graus-Hora de necessidade de refrigeração, em um dia típico de determinado mês, pode ser estimado graficamente. Conforme a figura 3.4, marca-se a Temperatura de Base (T_b) sobre a curva de variação horária da temperatura. As abscissas são horas e as ordenadas temperaturas. Portanto, a soma das áreas acima da Temperatura de Base (T_b) representa o total de Graus-Hora de necessidade de refrigeração, no período considerado.

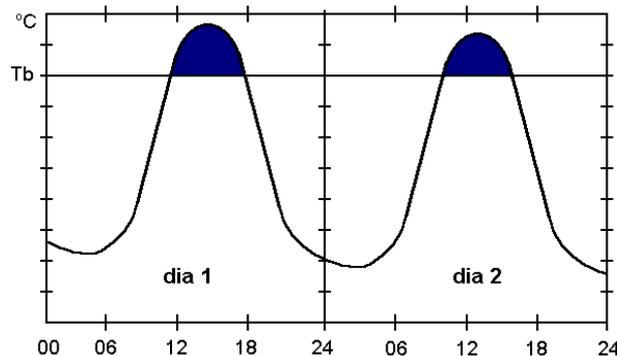


Figura 3.4: Graus-Hora de Refrigeração.

Szokolay (1987) indica, como valores usuais, $T_b = 18^{\circ}\text{C}$ para inverno e 26°C para verão. Como já foi mencionado, na situação de inverno considera-se o déficit acumulado de temperatura:

$$GH = \sum (18 - T_h) \quad [\text{Eq. 3.6}]$$

Considerando-se as novas curvas de variação das temperaturas internas, para cada ambiente monitorado, pode-se determinar o somatório de graus-hora de desconforto por frio ou calor, acumulado ao longo do dia de referência. Para isso, ao invés de se considerar apenas uma temperatura de base, como proposto por Szokolay, para cada período considerou-se os limites de conforto indicados nas Planilhas de Mahoney (KOENIGSBERGER; MAHONEY; EVANS, 1971), por ser um dos únicos métodos que diferenciam limites diurnos e noturnos de conforto.

O método de Mahoney considera que as pessoas preferem, durante a noite, temperaturas mais baixas do que as desejadas nas horas diurnas. Roriz (2003) faz uma análise sobre observações práticas e modelos teóricos acerca das sensações térmicas humanas e supõe que as temperaturas de conforto acompanham a oscilação horária da temperatura exterior. Segundo o autor, um aspecto de grande importância relaciona-se ao chamado relógio biológico (ou circadiano) dos seres humanos:

[...] o organismo humano dispõe de um mecanismo de registro de determinados ritmos da natureza. O movimento de rotação da Terra ao redor do próprio eixo e a conseqüente oscilação diurna da temperatura do ar estabelece um destes ciclos, com as temperaturas mínimas ocorrendo pouco depois do nascer do Sol e, as máximas, duas ou três horas após o meio-dia. Sendo este ritmo um dos mais evidentes na natureza, é plausível supor que o relógio biológico o considere (RORIZ, 2003).

Roriz (2003) completa esta análise ao dizer que o homem, durante todos os dias de sua existência, vai condicionando-se ao fato de que nas horas noturnas as temperaturas são mais baixas. E que esta seria uma possível explicação para o fato de uma temperatura aceita como confortável nas primeiras horas da tarde, seja “insuportável” se vier a acontecer durante a madrugada. Uma discussão mais aprofundada sobre o assunto é feita nesse artigo, apresentado por Roriz (2003).

Com base na explicação anterior, parece razoável supor que as preferências térmicas humanas variem ao longo das horas do dia. Ao adotar apenas dois intervalos (dia e noite), o Método de Mahoney procura simplificar a questão. No entanto, não é sensato dizer que até determinado horário uma temperatura seja aceita como confortável e já no momento seguinte passe a ser desagradável. E isso precisa ser enfatizado.

3.5 Estimativa da Necessidade de Aquecimento ou Refrigeração dos Ambientes

Conforme Szokolay (1987), a partir da equação 3.7 pode-se estimar a quantidade de calor acumulada ao longo das horas de um dia, que precisa ser retirada ou fornecida ao ambiente, para restabelecer o conforto térmico no mesmo.

$$Q = GH * q \quad [\text{Eq. 3.7}]$$

Onde:

Q = Quantidade de calor a ser retirada (refrigeração) ou fornecida (aquecimento) ao ambiente (Wh/dia);

GH = Somatório de graus-hora de desconforto, por frio ou calor, acumulado ao longo do dia considerado (Kh/dia);

q = taxa de trocas térmicas por condução (q_c) e convecção (q_v), determinada a partir da equação 3.8, em W/K:

$$q = q_c + q_v \quad [\text{Eq. 3.8}]$$

Sendo q_c e q_v dadas pelas equações 3.9 e 3.10:

$$q_c = \sum_{i=1}^n (A \times U)_i \quad [\text{Eq. 3.9}]$$

Onde:

q_c = taxa de trocas térmicas por condução, (W/K);

A = área da vedação externa "i" (m²);

U = transmitância térmica da vedação externa "i" (W/m²K);

n = número de vedações externas.

$$q_v = 0,33 \times N \times V \quad [\text{Eq. 3.10}]$$

Onde:

q_v = taxa de trocas térmicas por ventilação, (W/K);

N = número de renovações do ar por hora (volumes/h);

V = volume do ambiente (m³).

A equação 3.7, apresentada por Szokolay (1987), não considera o efeito da inércia térmica para o cálculo da necessidade de aquecimento ou refrigeração de edificações. No entanto, quando o somatório de graus-hora de desconforto é obtido a partir de monitoramentos, este valor é resultado do efeito da inércia térmica de cada edificação monitorada.

Assim, a partir dos quantitativos de desconforto para cada ambiente monitorado, pode-se determinar qual destes necessita de uma menor quantidade de energia para restabelecer o conforto no seu interior. Com estes valores, é possível verificar-se quanto a inércia térmica permite reduzir o consumo de energia para o condicionamento ambiental das edificações.

3.6 Classificação da Inércia Térmica de Edificações

A classificação da inércia térmica de edificações pode ser feita através do Fator de Resposta (FR), conforme apresentado por Szokolay (1987). Este parâmetro depende, principalmente, da taxa do fluxo térmico devido à Admitância (q_a) e é determinado a partir da equação 3.11:

$$FR = \frac{q_a + q_v}{q_c + q_v} \quad [\text{Eq. 3.11}]$$

Sendo:

FR = Fator de Resposta da edificação (ou ambiente);

q_c = taxa do fluxo térmico devido à condução (Equação 3.9);

q_v = taxa do fluxo térmico devido à ventilação (Equação 3.10);

q_a = taxa total de admitância do ambiente, determinada a partir da equação 3.12, em W/K:

$$q_a = \sum_{i=1}^n (A \times Y)_i \quad [\text{Eq. 3.12}]$$

Onde:

A = área da superfície "i" (m^2);

Y = admitância da superfície "i" ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$);

n = número de superfícies.

A inércia térmica das edificações é classificada a partir do valor deste parâmetro, de acordo com os seguintes intervalos, apresentados na tabela 3.2:

Tabela 3.2: Classificação das construções a partir do Fator de Resposta.

FATOR DE RESPOSTA	CLASSIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO	CLASSIFICAÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA
$FR \leq 3$	Construção Leve	Inércia Baixa
$3 < FR \leq 5$	Construção Média	Inércia Média
$FR > 5$	Construção Pesada	Inércia Alta

Fonte: Szokolay (1987)

Segundo Szokolay (1987), alguns Fatores de Resposta ($FR \cong 10$) podem ser obtidos por meio de vedações espessas e pesadas ou pela conjugação de uma massa moderada com forte isolamento e pouca infiltração de ar, ou seja, baixos valores para q_c e q_v .

Os valores ideais da taxa de ventilação (q_v) de cada ambiente dependem do clima e do tipo de atividade ali desenvolvida, de acordo com Roriz (1996). Segundo este autor, o valor de N depende da estanqueidade ou da abertura das esquadrias. Mesmo em um ambiente com portas e janelas fechadas, valores mínimos são provocados pelas infiltrações. Em edificações típicas européias, esses valores mínimos podem variar desde 0,5 até 3 renovações por hora. No caso brasileiro, onde normalmente são menores os cuidados com a estanqueidade, as taxas mínimas devem ser significativamente mais altas.

Para situações de baixa ocupação como, por exemplo, a maioria dos ambientes residenciais, Szokolay (1987) recomenda $N = 1$. No entanto, quando há alta produção de calor ou vapor (em cozinhas ou certos ambientes industriais), o ar do ambiente deve ser renovado 10 ou até 30 vezes por hora.

Algumas considerações devem ser feitas para o cálculo do Fator de Resposta:

- No cálculo da taxa de fluxo térmico devido à condução (q_c), considera-se a transmitância térmica apenas dos elementos em contato com o exterior;
- Para o cálculo da taxa total de admitância de um ambiente (q_a), considera-se todas as superfícies internas do mesmo (vedações externas e internas, forro e piso);
- Para o caso de pisos em contato com o solo, o cálculo da admitância deve considerar a relação entre comprimento e largura do piso, a umidade do solo (o valor da condutividade do solo cresce em meses com mais chuva), etc.

CAPÍTULO 4

ESTUDO DE CASOS

"Quando você elimina o impossível, o que sobra, por mais incrível que pareça, só pode ser a verdade".

Arthur Conan Doyle

4. ESTUDO DE CASOS

4.1 Caracterização Climática de São Carlos

A cidade de São Carlos está situada no estado de São Paulo a 22°01' de latitude Sul, 47°53' de longitude Oeste e 856m de altitude. É a cidade de maior altitude em relação aos municípios circunvizinhos e, por isso, é totalmente exposta à intensa ventilação e insolação. Conforme as Normais Climatológicas observadas entre 1960 e 1990 (BRASIL, 1992), durante oito meses do ano, entre abril e novembro, as médias mensais de umidade relativa em São Carlos permanecem abaixo de 70%. Neste mesmo período, as amplitudes médias mensais de temperaturas (diferenças entre médias de máximas e médias de mínimas) variam entre 10 e 11,8 °C. De acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro estabelecido no projeto de norma da ABNT (2003c), a cidade de São Carlos está localizada na Zona Bioclimática 4 (Figura 4.1a). Os dados climáticos de São Carlos foram plotados sobre a Carta Bioclimática adotada no referido projeto, a qual está representada na figura 4.1b.

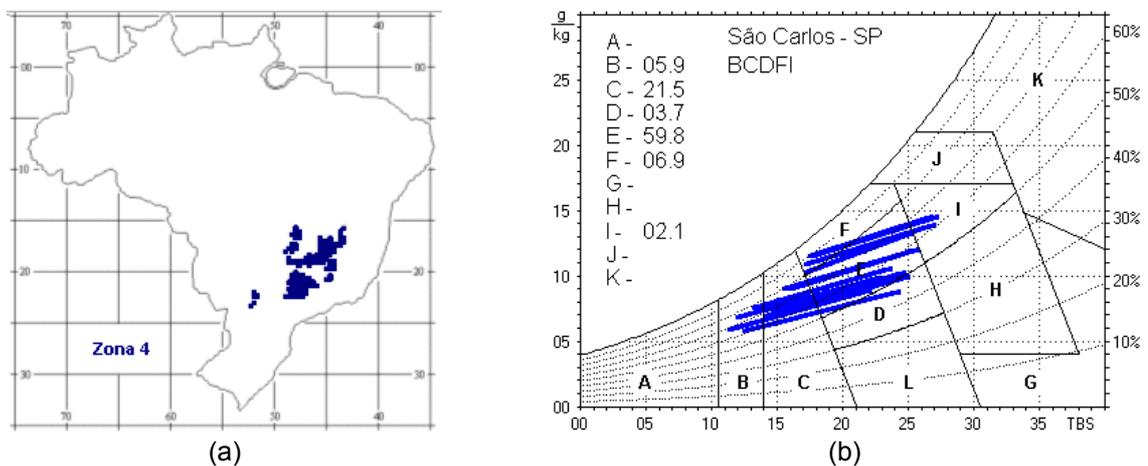


Figura 4.1: Zona Bioclimática 4 e o clima de São Carlos sobre a Carta Bioclimática.

Fonte: Adaptado de ABNT (2003c).

O referido projeto apresenta, em anexo, uma relação de 330 cidades cujos climas foram classificados e o zoneamento e as estratégias foram definidos. Para a cidade de São Carlos, classificada na zona 4, são recomendadas as seguintes estratégias construtivas (Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3):

Tabela 4.1: Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 4.

ABERTURAS PARA VENTILAÇÃO A (% da área de piso)	SOMBREAMENTO DAS ABERTURAS
MÉDIAS: $15\% < A < 25\%$	Sombrear as aberturas

Fonte: ABNT (2003c)

Tabela 4.2: Transmitância Térmica, Atraso Térmico e Fator de Calor Solar admissíveis para vedações externas para a Zona Bioclimática 4.

VEDAÇÕES EXTERNAS	TRANSMITÂNCIA TÉRMICA U (W/m².K)	ATRASO TÉRMICO φ (horas)	FATOR DE CALOR SOLAR FCS (%)
Parede: <i>Pesada</i>	$U \leq 2,20$	$\varphi \geq 6,5$	$FCS \leq 3,5$
Cobertura: <i>Leve Isolada</i>	$U \leq 2,00$	$\varphi \leq 3,3$	$FCS \leq 6,5$

Fonte: ABNT (2003c)

Tabela 4.3: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 4.

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
VERÃO	H) Resfriamento evaporativo e Massa Térmica para resfriamento J) Ventilação seletiva (nos períodos quentes em que a temperatura interna seja superior à externa)
INVERNO	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Os códigos H, J, B e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil.

Fonte: ABNT (2003c)

Neste trabalho, será adotada a caracterização climática da cidade de São Carlos conforme o Projeto de Norma Técnica da ABNT (2003c). As diretrizes construtivas, nele contidas, serão utilizadas para comparações com os resultados obtidos nesta pesquisa.

4.2 Monitoramento das Temperaturas nas Edificações

As medições de temperatura de bulbo seco ocorreram em 4 diferentes períodos, como descrito na tabela 4.4:

Tabela 4.4: Períodos de medições.

PERÍODO	EDIFICAÇÃO
1º Período de medições 15/setembro/2002 a 22/setembro/2002	Edificação 1 Edificação 2
2º Período de medições 28/setembro/2002 a 08/outubro/2002	Edificação 3 Edificação 4
3º Período de medições 02/novembro/2002 a 07/novembro/2002	Edificação 5
4º Período de medições 18/março/2003 a 26/março/2003	Edificação 6 Edificação 7

A diversidade dos períodos de medições deve-se, principalmente, à disponibilidade dos sensores para realizar os monitoramentos, uma vez que estavam sendo utilizados em outras pesquisas.

Em cada edificação foram instalados dois sensores para a aquisição dos dados de temperatura de bulbo seco, sendo um no interior do ambiente selecionado e um no exterior da edificação. Os equipamentos foram programados para registrar as temperaturas em intervalos de 10 minutos, totalizando 144 registros por dia. Durante o monitoramento, todos os ambientes permaneceram com portas, janelas e vidros fechados e sem ocupação.

4.3 Objetos de Estudo

Para a escolha dos objetos de estudo, procurou-se identificar um conjunto de edificações que permitisse comparar diferentes tipologias construtivas, principalmente em relação à inércia térmica. Este conjunto compreendeu 12 edificações residenciais, totalizando 18 ambientes monitorados. No entanto, a partir de uma análise preliminar dos dados obtidos durante os monitoramentos, optou-se por escolher apenas sete edificações (um ambiente em cada edificação). Isto porque alguns dos ambientes monitorados tiveram interferências externas que, sem a colaboração dos moradores para descrever tais interferências, poderiam “mascarar” os efeitos específicos da inércia durante a análise dos dados obtidos. Entre essas interferências, pode-se destacar a falta de controle das variáveis de ocupação (fontes internas de calor, abertura e fechamento de janelas, etc.), incidência de radiação solar direta sobre os sensores instalados externamente, etc.

Na escolha das sete edificações, procurou-se, também, destacar algumas características dos ambientes monitorados, tais como insolação, sombreamento, cor de superfícies externas e orientação de fachadas, uma vez que essas características apresentam grande influência sobre as temperaturas internas das edificações.

A figura 4.2 apresenta o mapa de localização da cidade de São Carlos no estado de São Paulo e a localização das edificações analisadas no mapa da cidade.

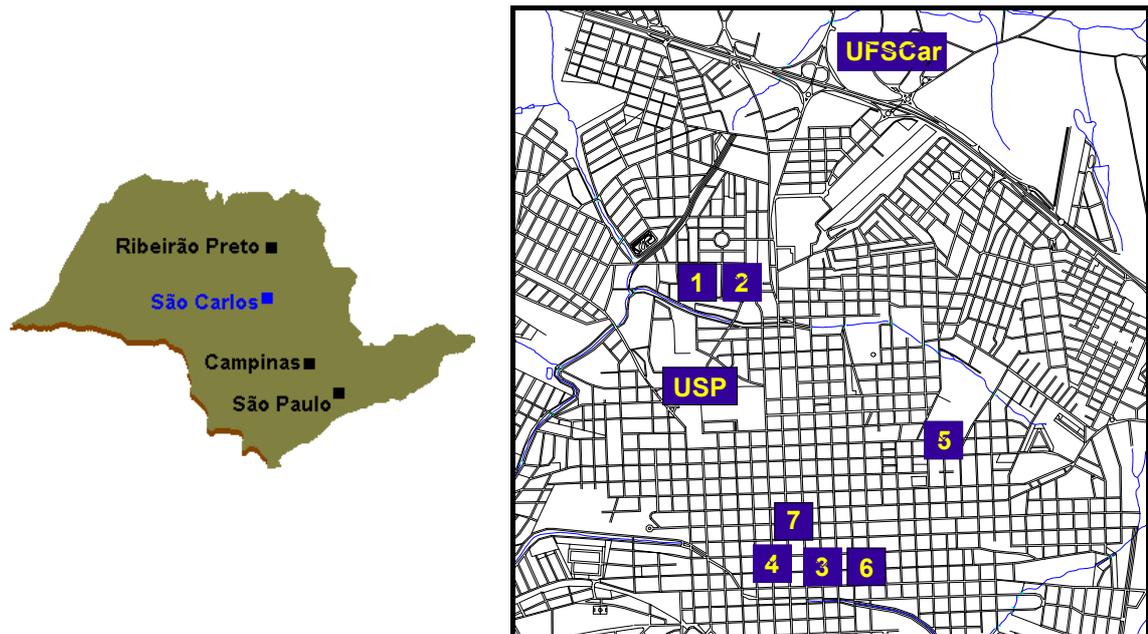


Figura 4.2: Localização da cidade de São Carlos, no estado de SP, e das edificações analisadas no mapa da cidade.

Para a caracterização das edificações analisadas, identificou-se as seguintes variáveis:

- *Variáveis do Projeto Arquitetônico:* dimensões, orientação, aberturas, áreas envidraçadas, cores externas, insolação e sombreamento, etc;
- *Variáveis do Sistema Construtivo:* dimensões dos componentes e propriedades termofísicas dos materiais (condutividade, calor específico, densidade);
- *Variáveis de Ocupação:* fontes internas de calor (pessoas, equipamentos, lâmpadas, etc.), horários de ocupação, horários de abertura de janelas, energia consumida com sistemas de refrigeração e de aquecimento dos ambientes, etc.

As variáveis do projeto arquitetônico, dos sistemas construtivos e da ocupação de cada ambiente analisado são descritas a seguir.

4.3.1 Edificação 1

Esta edificação situa-se no bairro residencial Cidade Jardim, em uma região onde predominam edificações de até 4 pavimentos. Foram monitoradas as temperaturas internas de um ambiente situado no 3º pavimento, o qual permaneceu fechado e sem ocupação durante o período de medições. O ambiente possui 2 fachadas não sombreadas, com orientações Norte e Oeste, conforme apresentado na figura 4.3.



Figura 4.3: Edificação 1, vista das fachadas Norte e Oeste do ambiente 1.

As paredes externas do ambiente foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos de 8 furos, revestidos com argamassa em ambas as faces (Figura 4.4).

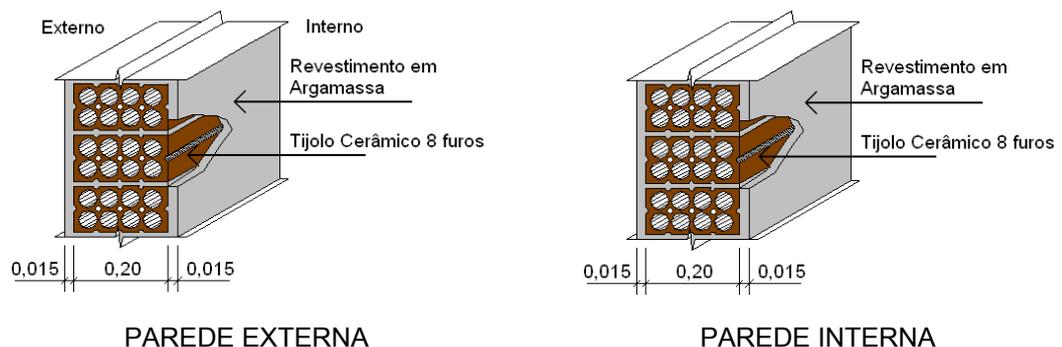


Figura 4.4: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 1.

A cobertura dessa edificação é constituída por telhas de barro e forro de laje mista. O ambiente possui piso em taco de madeira sobre laje intermediária mista, janela de ferro pintada na cor escura e porta de madeira.

Na figura 4.5, observa-se um esboço da planta baixa do ambiente monitorado e a localização do sensor interno.

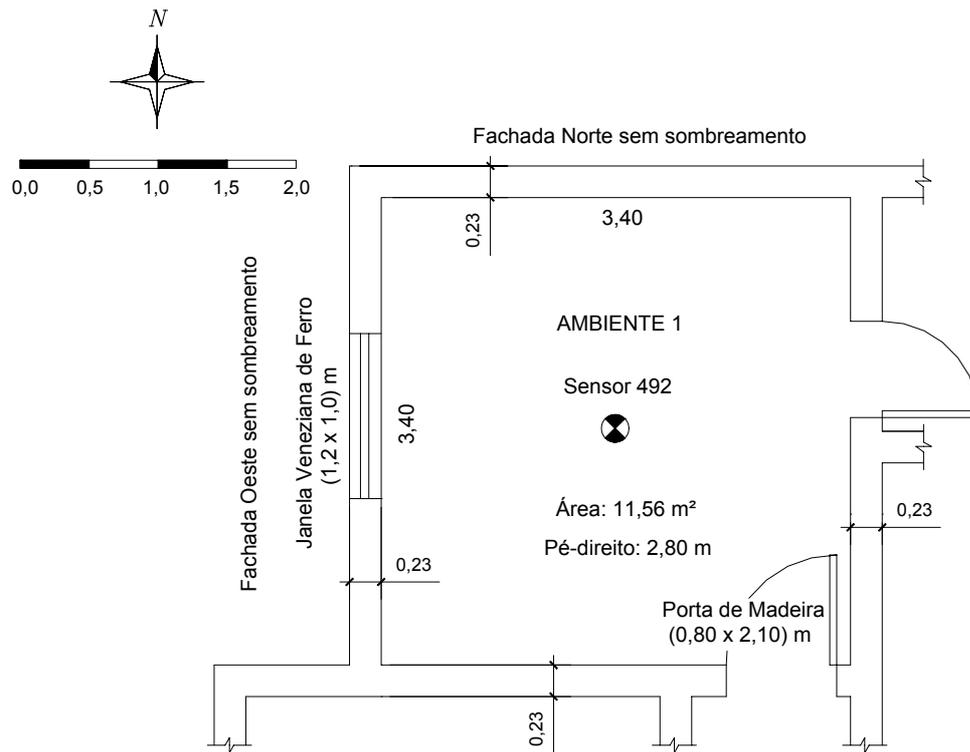


Figura 4.5: Planta baixa do ambiente monitorado – Edificação 1.

4.3.2 Edificação 2

Esta edificação térrea situa-se no bairro residencial Cidade Jardim, próxima à edificação 1. Nesta edificação, foram monitoradas as temperaturas internas de um dormitório que permaneceu fechado e sem ocupação durante o monitoramento (Figura 4.6). Este ambiente possui apenas uma fachada, com orientação Leste, totalmente sombreada pela laje de cobertura e por um toldo metálico.



Figura 4.6: Edificação 2, vista da fachada Leste do ambiente 2.

As paredes do dormitório foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos maciços assentados na maior dimensão (parede externa) e menor dimensão (parede interna), revestidos com argamassa em ambas as faces (Figura 4.7). O ambiente possui piso cerâmico sobre laje de concreto e cobertura ventilada de telha de barro sobre laje mista, janela com veneziana de ferro pintada na cor branca e porta de madeira.

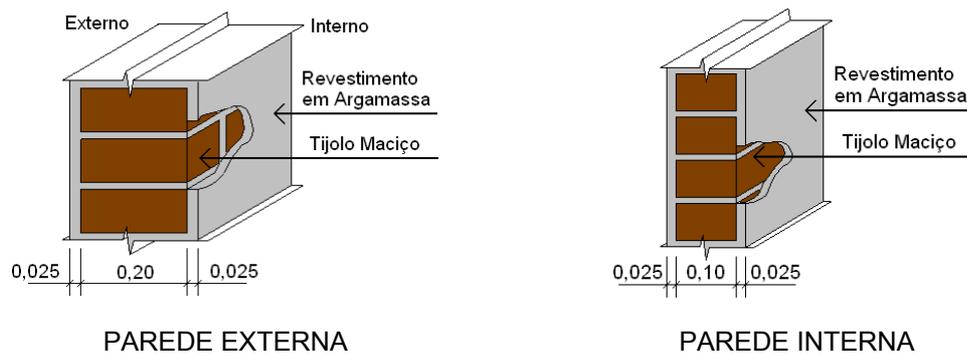


Figura 4.7: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 2.

Na figura 4.8, observa-se a planta baixa do ambiente monitorado, com a descrição de alguns detalhes construtivos.

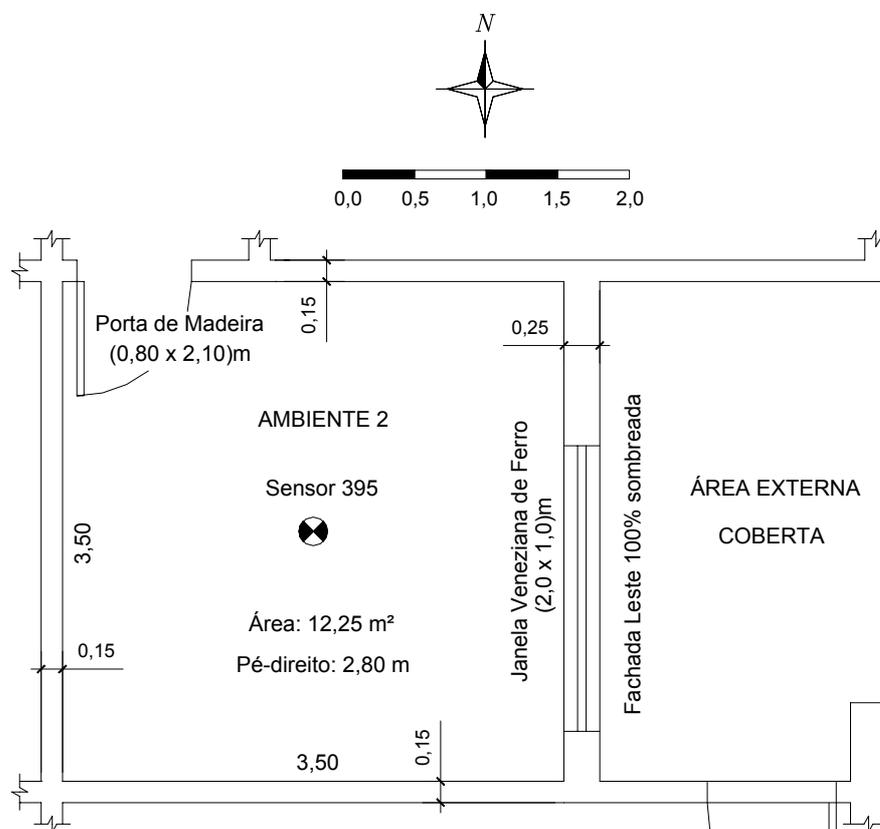


Figura 4.8: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 2.

4.3.3 Edificação 3

Esta edificação térrea situa-se no centro da cidade, próxima à região comercial e administrativa do município, onde predominam edificações de mais de 4 pavimentos. Nesta edificação (Figura 4.9), foram monitoradas as temperaturas internas de um dormitório que permaneceu fechado e sem ocupação durante o período de medições. O ambiente possui apenas uma fachada, com orientação Leste, totalmente sombreada por edificação vizinha.



Figura 4.9: Edificação 3, vista da fachada Sul.

Um esboço da planta baixa do ambiente monitorado é apresentado na figura 4.10, assim como a descrição de alguns detalhes construtivos e a localização do sensor interno.

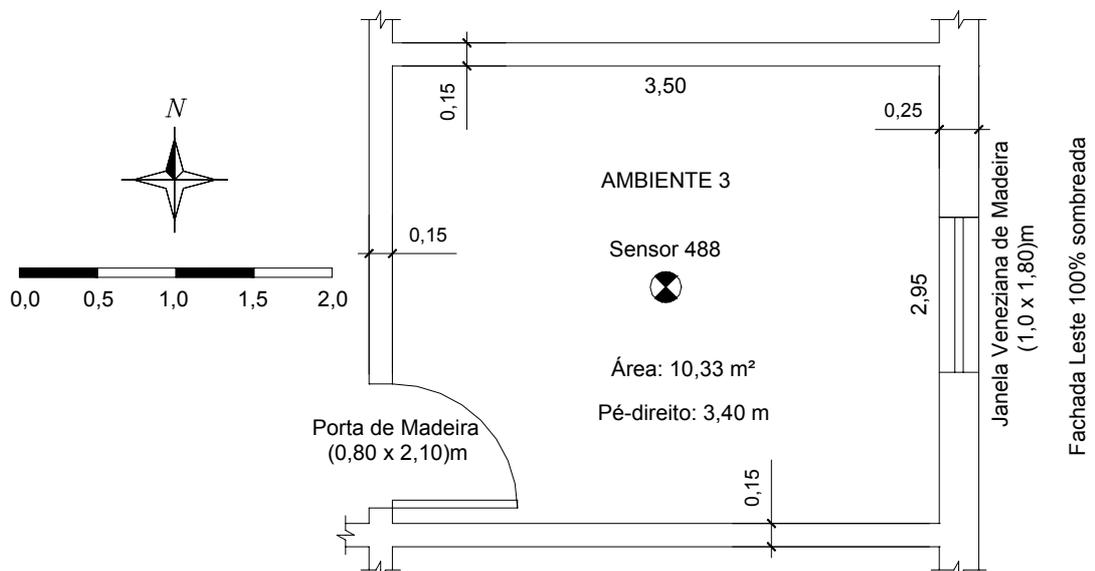


Figura 4.10: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 3.

As paredes externas do dormitório foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos maciços assentados na maior dimensão e revestidos com argamassa em ambas as faces (Figura 4.11). O ambiente possui piso de madeira elevado do solo cerca de 1,2 m, cobertura ventilada de telha de barro e forro de madeira, janela com veneziana de madeira e porta de madeira.

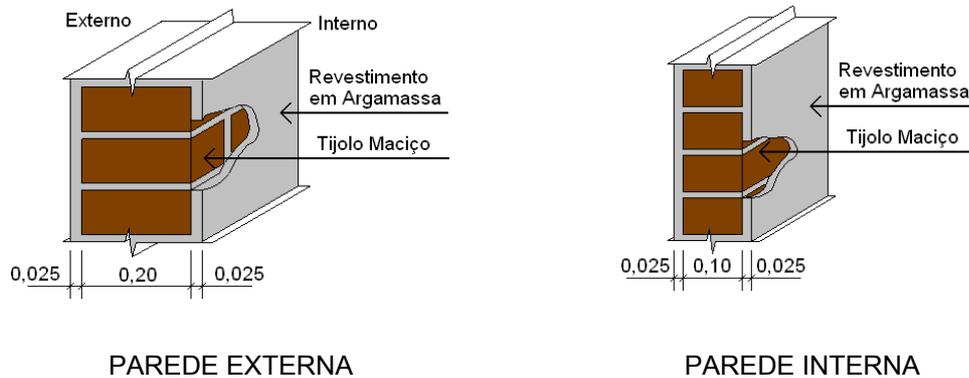


Figura 4.11: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna – Ambiente 3.

4.3.4 Edificação 4

Esta edificação também se situa na região central da cidade. Foram monitoradas as temperaturas internas de uma sala que permaneceu fechada e sem ocupação durante o período de medições. O ambiente possui apenas uma fachada (Figura 4.12), com orientação Oeste, parcialmente sombreada por edificação vizinha (incidência de radiação solar direta a partir das 15h, no mês das medições: outubro).



Figura 4.12: Edificação 4, vista da fachada Oeste do ambiente 4.

Na figura 4.13, segue a planta baixa do ambiente monitorado, com a localização do sensor interno e a descrição de alguns detalhes construtivos.

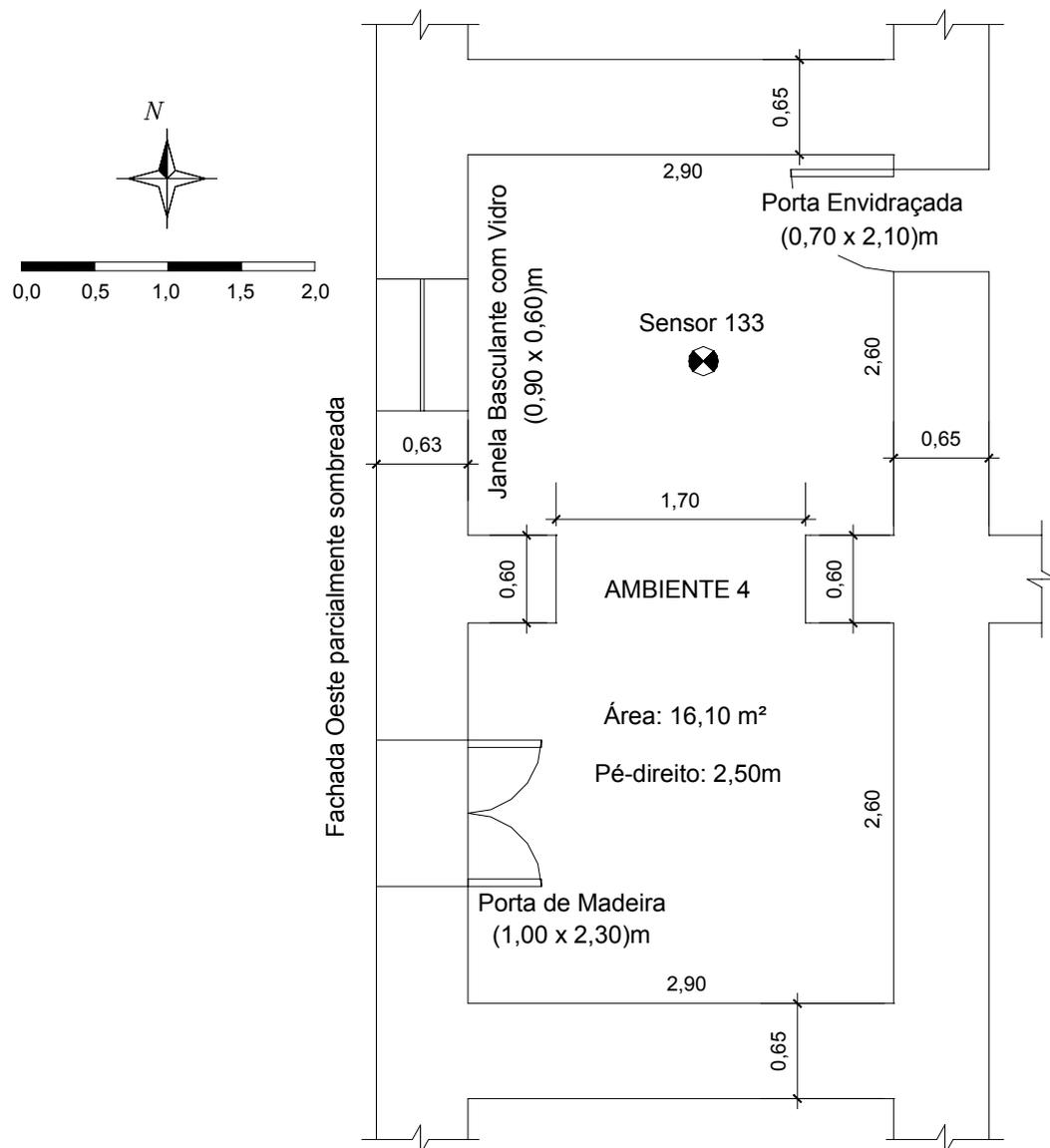


Figura 4.13: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 4.

O ambiente monitorado localiza-se no andar térreo de uma edificação de 2 pavimentos. As paredes foram construídas com alvenaria de pedra (arenito) e revestidas com argamassa em ambas as faces, com exceção da fachada externa que só possui revestimento interno (Figura 4.14). A cobertura deste ambiente é a laje de piso do pavimento superior, com forro de madeira. O piso é cimentado liso em contato com o solo, janela basculante e porta de madeira.

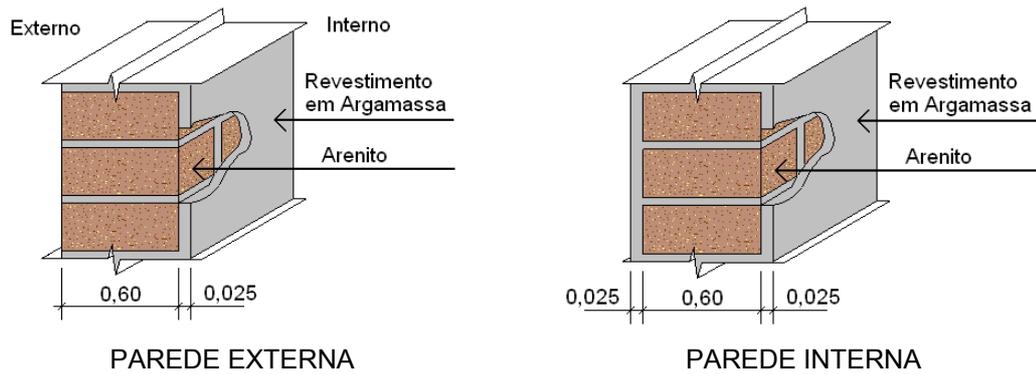


Figura 4.14: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Ambiente 4.

4.3.5 Edificação 5

Esta edificação térrea situa-se no bairro residencial Vila Elisabeth, onde predominam edificações de até 4 pavimentos. Nesta edificação (Figura 4.15), foram monitoradas as temperaturas internas de um dormitório, com ocupação apenas durante o período noturno. O ambiente possui 2 fachadas não sombreadas, com orientações Leste e Norte e uma fachada parcialmente sombreada por vegetação, com orientação Oeste.



Figura 4.15: Edificação 5, vista das fachadas Leste e Norte.

As paredes do ambiente foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos maciços assentados na menor dimensão e revestidos com argamassa em ambas as faces (ver detalhe na figura 4.16). O ambiente possui piso cerâmico sobre contrapiso de concreto, cobertura ventilada de telha de barro e forro de madeira acompanhando a inclinação do telhado, janela com veneziana de ferro na cor clara e porta interna de madeira.

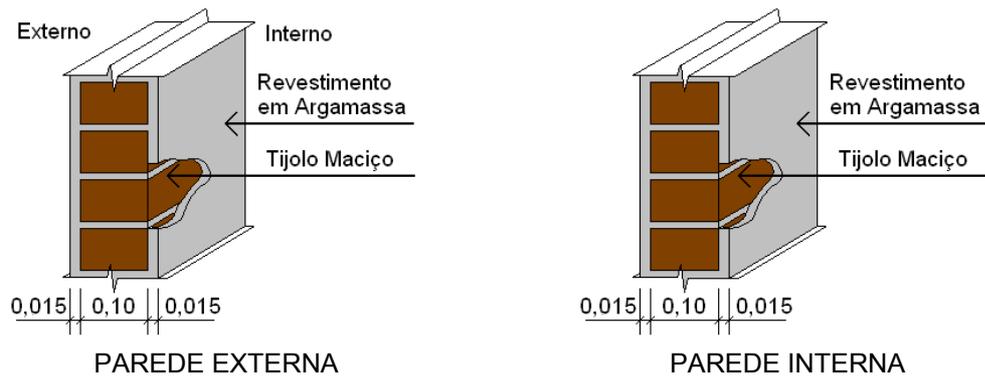


Figura 4.16: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 5.

Na figura 4.17, observa-se a planta baixa do ambiente monitorado, com a descrição de alguns detalhes construtivos.

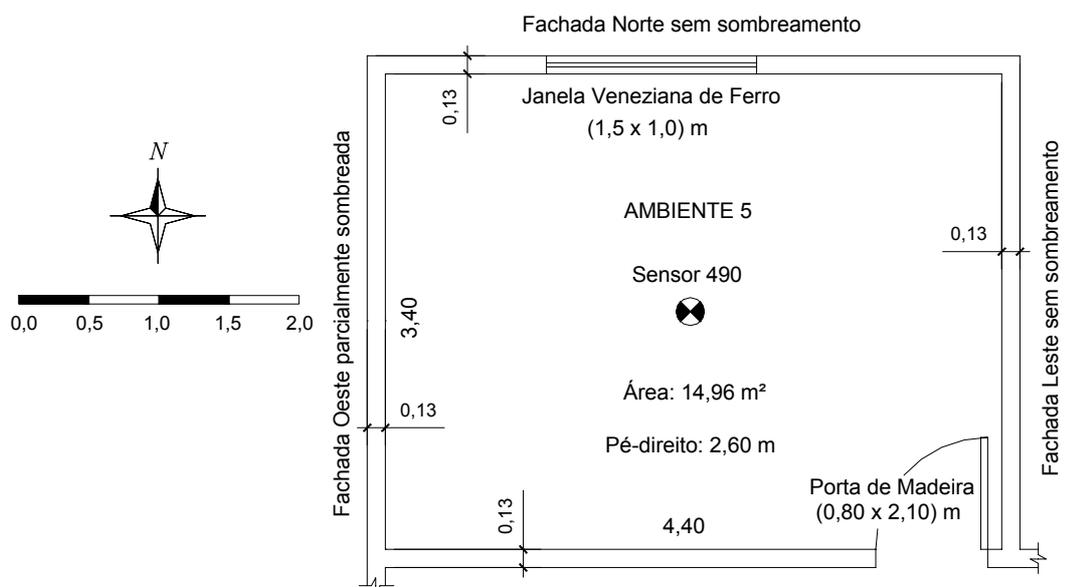


Figura 4.17: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 5.

4.3.6 Edificação 6

Esta edificação de dois pavimentos situa-se no centro da cidade, próxima à edificação 3 (Figura 4.18). Foram monitoradas as temperaturas internas de um dormitório localizado no 2º pavimento, o qual permaneceu fechado e sem ocupação durante o período de medições. O ambiente possui 3 fachadas com orientações Norte, Oeste e Sul, sem sombreamento. Na figura 4.19, é apresentado um esboço da planta baixa do ambiente monitorado.



Figura 4.18: Edificação 6, vista das fachadas Norte e Oeste.

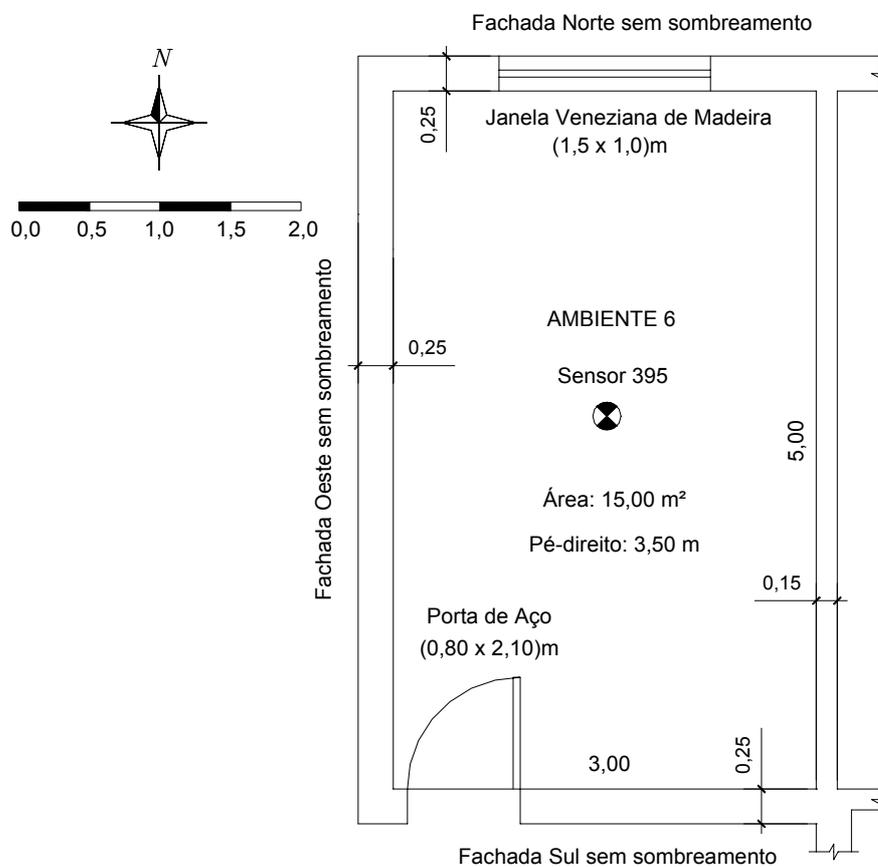


Figura 4.19: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 6.

As paredes do dormitório foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos maciços assentados na maior dimensão (paredes externas) e menor dimensão (parede interna), revestidos com argamassa em ambas as faces (Figura 4.20). O ambiente possui piso cerâmico sobre laje intermediária mista, cobertura ventilada de telha de barro e laje mista, janela com veneziana de madeira e porta de aço.

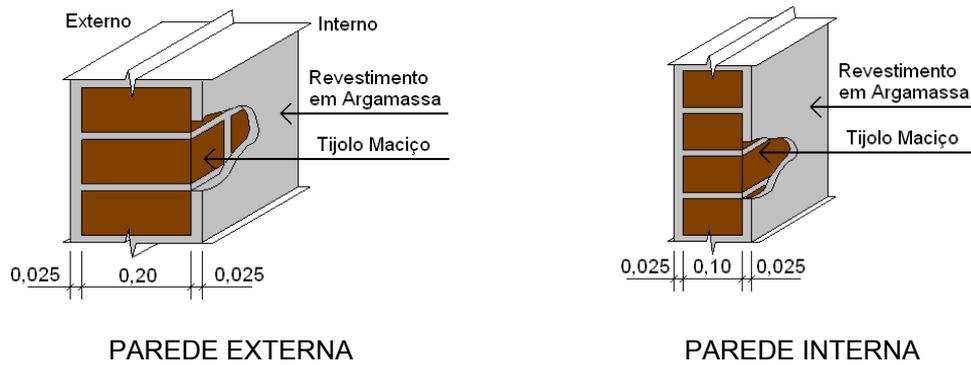


Figura 4.20: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 6

4.3.7 Edificação 7

Esta edificação situa-se no centro da cidade, próxima à edificação 4. Nesta edificação (Figura 4.21), foram monitoradas as temperaturas internas de um dormitório, o qual permaneceu fechado e sem ocupação durante o monitoramento. O ambiente possui 1 fachada com orientação Leste e sem sombreamento.



Figura 4.21: Edificação 7, vista das fachadas Leste e Norte.

As paredes do ambiente foram construídas com alvenaria de tijolos cerâmicos maciços assentados na maior direção e revestidos com argamassa em ambas as faces (ver detalhe na figura 4.22). O ambiente possui piso de madeira compensada intermediária, cobertura ventilada de telha de barro e forro de madeira, janela com veneziana de madeira e porta interna de madeira.

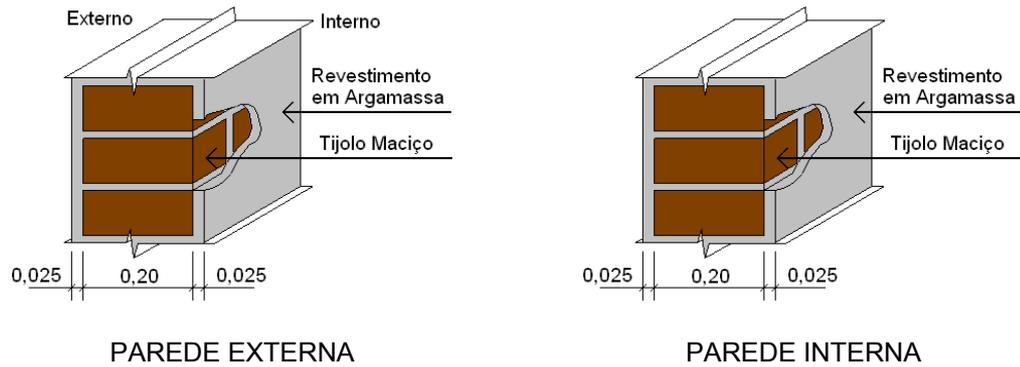


Figura 4.22: Detalhe construtivo das alvenarias externa e interna - Edificação 7.

Na figura 4.23, segue um esboço da planta baixa do ambiente monitorado, com a localização do sensor interno e a descrição de alguns detalhes construtivos.

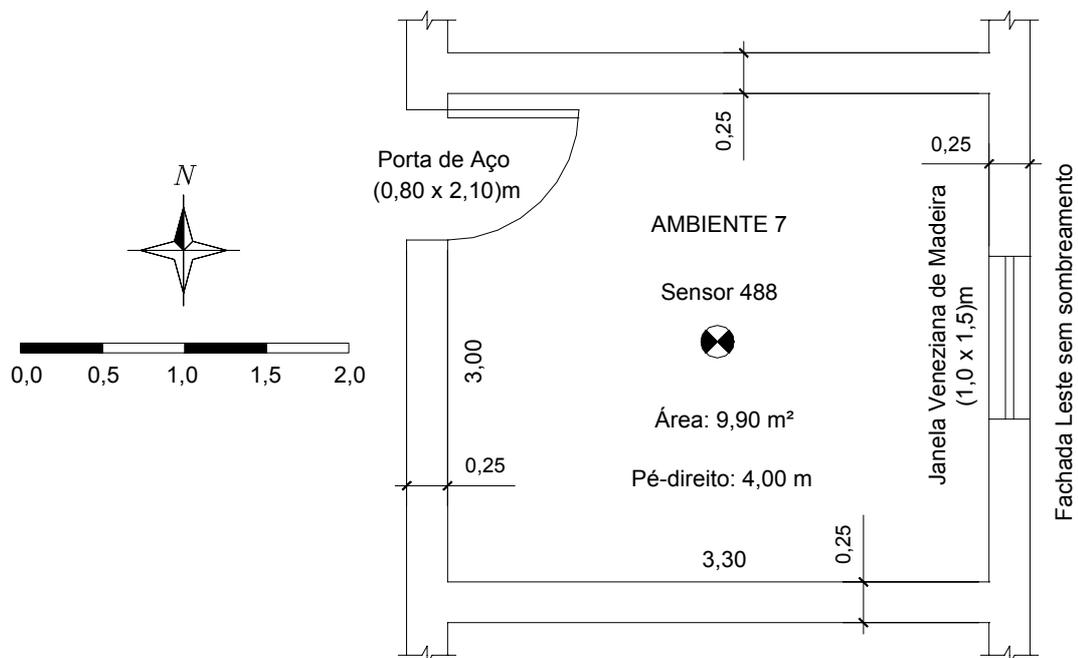


Figura 4.23: Planta baixa do ambiente monitorado - Edificação 7.

4.4 Caracterização dos Ambientes Monitorados

Os ambientes monitorados diferem entre si em vários aspectos. Essa diferenciação permite compreender o comportamento distinto de cada ambiente ou edificação frente às variações do clima externo e será utilizada na análise da inércia térmica das edificações.

Na tabela 4.5, para facilitar a comparação entre os ambientes analisados, estão reunidas algumas características dos diferentes sistemas construtivos dos quais as edificações são formadas. Alguns dados desta tabela serão utilizados para os cálculos do Fator de Resposta (*FR*), com o auxílio do software Arqitrop 5.0.

Tabela 4.5: Caracterização dos ambientes monitorados.

PROPRIEDADES	Amb.1	Amb.2	Amb.3	Amb.4	Amb.5	Amb.6	Amb.7
Orientação da(s) fachada(s)*	N/O	L	L	O	N/L/O	N/S/O	L
Pé-direito (m)	2,80	2,80	3,40	2,50	2,60	3,50	4,00
Área de piso (m ²)	11,56	12,25	10,33	16,10	14,96	15,00	9,90
Área opaca de fachada (m ²)	N: 9,52 O: 8,32	7,80	8,23	13,96	N: 9,94 L: 8,84 O: 8,84	N:9,00 S:8,82 O: 17,50	10,50
Área de esquadria na fachada (m ²)	N: 0,00 O: 1,20	2,00	1,80	0,54	N: 1,50 L: 0,00 O: 0,00	N: 1,50 S: 1,68 O: 0,00	1,50
Área de cobertura (m ²)	11,56	12,25	10,33	16,10	14,96	15,00	9,90
Piso em contato com o solo	Não	Sim	Não	Sim	Não	Não	Não
Volume do ambiente (m ³)	32,37	34,30	35,12	40,25	38,90	52,50	39,60
Espessura total da parede externa (m)	0,23	0,25	0,25	0,63	0,13	0,25	0,25
Espessura total da parede interna (m)	0,23	0,15	0,15	0,65	0,13	0,15	0,25
Transmitância térmica (U) da parede externa (W/m ² K)	0,9	2,0	2,0	2,1	3,3	2,0	2,0
"U" da parede interna (W/m ² K)	1,1	5,5	5,5	3,5	1,9	5,5	3,1
"U" da cobertura (W/m ² K)	1,2	1,2	1,6	1,7	1,6	1,2	1,6
"U" do piso (W/m ² K)**	1,3	0,16	1,4	0,44	1,0	1,5	1,4
Absortância da fachada à radiação solar***	N: 0,72 O: 0,54	-	0,18	0,36	N: 0,18 L: 0,18 O: 0,18	0,36	0,54
Absortância da cobertura	0,72	0,72	0,30	-	0,60	0,72	0,72
Amortecimento térmico da parede (%)****	0,89	0,43	0,43	0,06	0,76	0,43	0,43
Amortecimento térmico da cobertura (%)	0,65	0,65	0,99	0,36	0,99	0,65	0,99
Atraso térmico da parede (h)	3,3	7,4	7,4	15,1	3,8	7,4	7,4
Atraso térmico cobertura (h)	4,3	4,3	0,8	6,0	0,8	4,3	0,8

* L: 90°, S: 180°, O: 270° e N: 360°. Alguns ambientes possuem mais de uma fachada.

** A transmitância térmica de pisos em contato com o solo (ambientes 2 e 4) foi calculada através do modelo proposto por Szokolay (1990). Este cálculo considera a relação entre o comprimento e a largura do piso, a umidade do solo (o valor da condutividade do solo cresce em meses com mais chuva), etc.

*** Algumas edificações possuem fachadas com diferentes absortâncias devido à diferença de cor e sombreamento das superfícies de um mesmo ambiente. Para fachadas totalmente sombreadas, considerou-se absortância nula, para efeito de simulações.

**** Os cálculos de amortecimento e atraso térmicos foram feitos pelo Método da Admitância.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS DOS MONITORAMENTOS

"Uma coisa posso afirmar e provar com palavras e atos: é que nos tornamos melhores se cremos que é nosso dever seguir em busca da verdade desconhecida".

Sócrates

5. RESULTADOS DOS MONITORAMENTOS

5.1 Edificação 1

Os dados de temperatura de bulbo seco, registrados interna e externamente na edificação 1, entre 15 e 22 de setembro de 2002, são apresentados na figura 5.1.

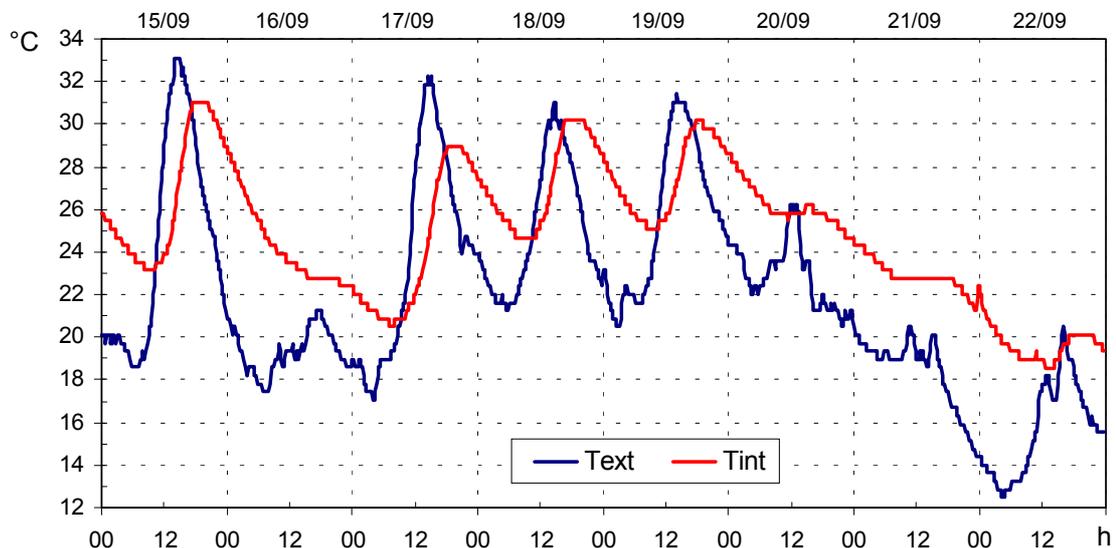


Figura 5.1: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 1.

A entrada de frentes-frias possibilita uma melhor análise da resposta da edificação, frente a mudanças bruscas de temperatura. Normalmente, as temperaturas máximas do ambiente monitorado permaneceram próximas às temperaturas máximas medidas no exterior da edificação 1, porém abaixo destas. Com a entrada de frentes-frias, os picos de temperatura máxima externa causaram reduções bruscas nos picos de temperatura máxima interna. Contudo, esta diminuição não foi suficiente, nestes dias, para a curva de variação da temperatura interna permanecer abaixo da externa. Isto se deve, principalmente, às orientações Norte e Oeste das fachadas do ambiente, que recebem grande parte da incidência de radiação solar de um dia, além da cor escura da superfície externa, de elevada absorvância. Estas características das fachadas desse ambiente são as principais responsáveis pela grande absorção de calor durante o dia.

Observando-se a figura 5.1, nota-se que nos dias 17, 18 e 19/09/2002, a curva de variação da temperatura externa apresentou um comportamento semelhante. Com base nestes dados, escolheu-se o dia 19/09 como o “dia de referência” da edificação 1 (Figura 5.2).

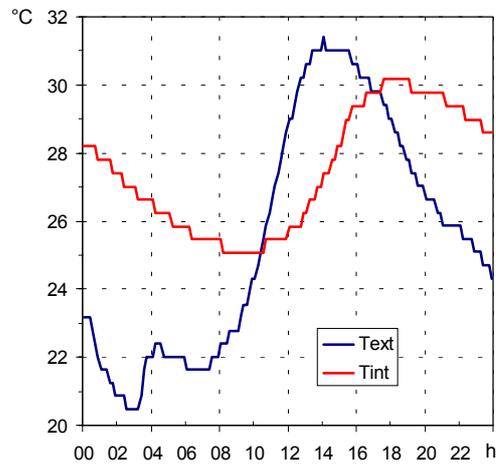


Figura 5.2: Dia de Referência – Edificação 1.

5.2 Edificação 2

Na figura 5.3, são apresentados os dados de temperatura de bulbo seco, registrados interna e externamente na edificação 2, durante o período de 15 a 22 de setembro de 2002.

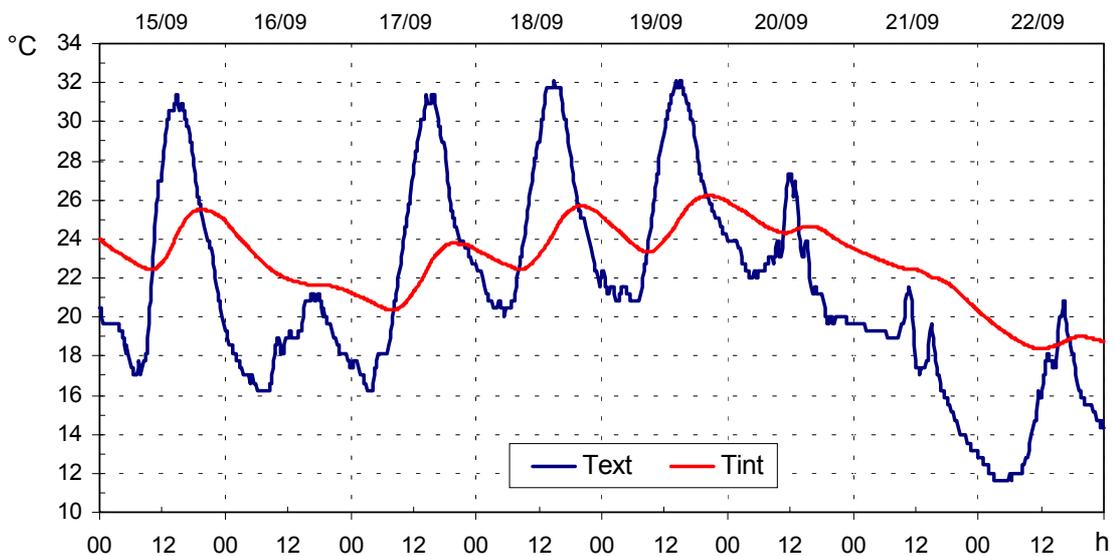


Figura 5.3: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 2.

A edificação 2 teve poucas trocas de calor por ventilação com o exterior e não recebe incidência de radiação solar direta na fachada, devido ao sombreamento. Com base nos dados obtidos por monitoramento, nota-se que as temperaturas internas permaneceram no intervalo de variação entre 18 e 26°C. No exterior da edificação, este intervalo esteve entre 12 e 32°C. Este comportamento reflete a capacidade de amortecimento térmico do ambiente, ou seja, a inércia térmica do ambiente analisado estabiliza as oscilações das temperaturas internas.

Assim como na edificação 1, os dados obtidos no dia 19/09 foram escolhidos para representar o “dia de referência” da edificação 2 (Figura 5.4).

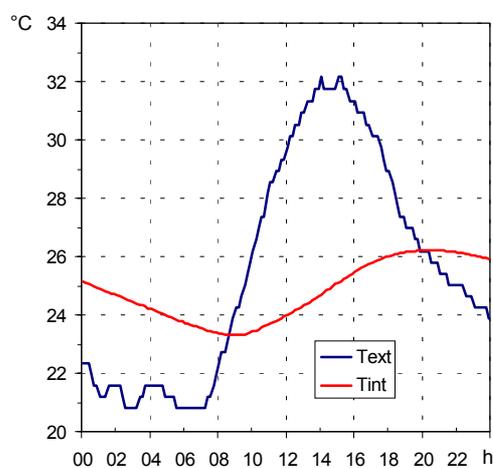


Figura 5.4: Dia de Referência – Edificação 2.

5.3 Edificação 3

A edificação 3 foi monitorada no 2º período de medições, entre 28 de setembro e 08 de outubro de 2002. Os dados de temperatura de bulbo seco, obtidos por monitoramento, são apresentados na figura 5.5.

No dia 01/10, houve a entrada de uma frente-fria na região de São Carlos, o que provocou variações bruscas da temperatura externa. Essa mudança de comportamento da curva de variação da TBS externa afetou diretamente as temperaturas internas deste dia. Os momentos de ocorrência das temperaturas máxima e mínima, no interior da edificação, foram alterados para 0h e 24h, respectivamente. Normalmente, a temperatura mínima interna ocorre logo após às 6h e a máxima, logo após às 14horas, dependendo do atraso térmico do respectivo sistema construtivo.

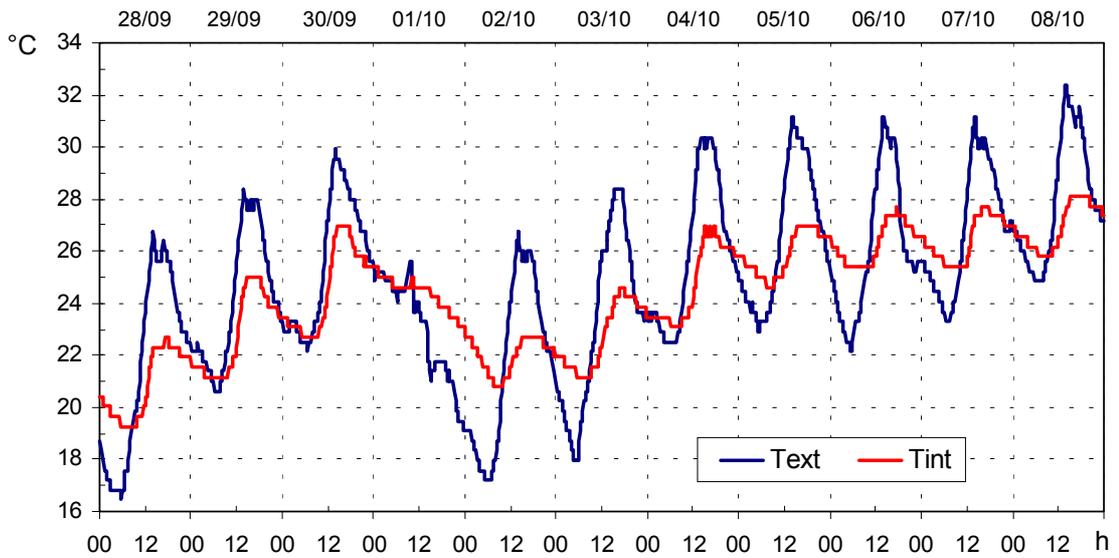


Figura 5.5: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 3.

Observando-se a figura 5.5, nota-se que nos dias 04, 05 e 06/10/2002, a curva de variação da temperatura interna apresentou um comportamento semelhante. Com base nestes dados, escolheu-se o dia 06/10 como o “dia de referência” da edificação 3 (Figura 5.6).

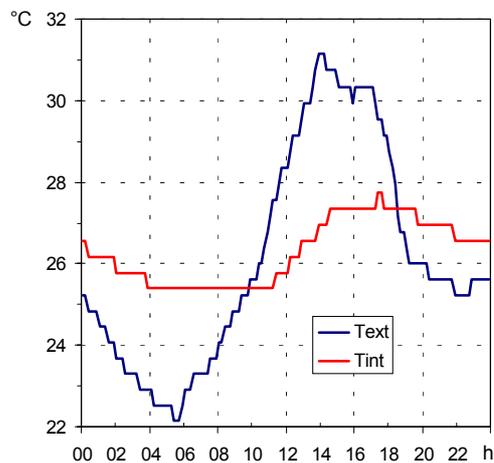


Figura 5.6: Dia de Referência – Edificação 3.

5.4 Edificação 4

Na figura 5.7, são apresentados os dados de temperatura de bulbo seco, registrados interna e externamente na edificação 4, durante o 2º período de medições.

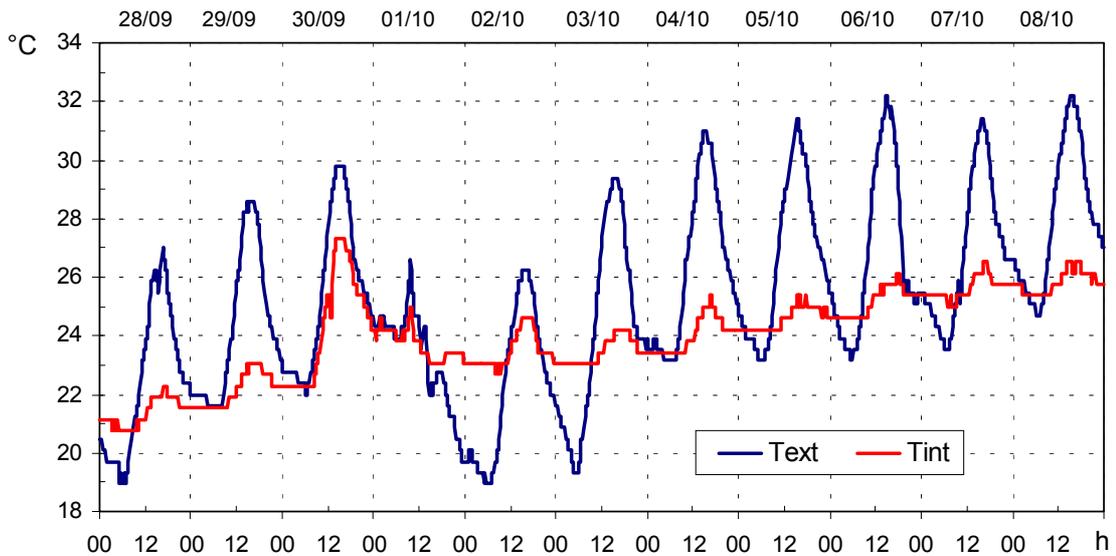


Figura 5.7: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 4.

De acordo com os dados obtidos no monitoramento da edificação 4, a curva de variação da temperatura interna apresentou maior oscilação no dia 30/09, quando comparada com os demais dias do período. Este comportamento foi resultado da ocupação do ambiente pelos moradores, que o mantiveram aberto durante o dia.

Normalmente, as temperaturas máximas internas foram inferiores às máximas temperaturas externas, cerca de 6 K de diferença. Também se pode notar que as temperaturas médias diárias, no interior do ambiente, permaneceram abaixo da média externa, o que não é usual de acontecer, devido aos ganhos internos de calor. Como a edificação foi construída em pedra, com paredes de grande espessura, pouco ventilada e sem incidência de radiação solar direta na maior parte do dia, a variação da temperatura interna recebe pouca influência da variação da temperatura externa. Neste caso, a capacidade de reduzir as oscilações da temperatura interna deve-se, principalmente, ao amortecimento térmico do ambiente.

Para a edificação 4, assim como na edificação 3, os dados obtidos no dia 06/10 foram escolhidos para representar o “dia de referência” dessa edificação (Figura 5.8).

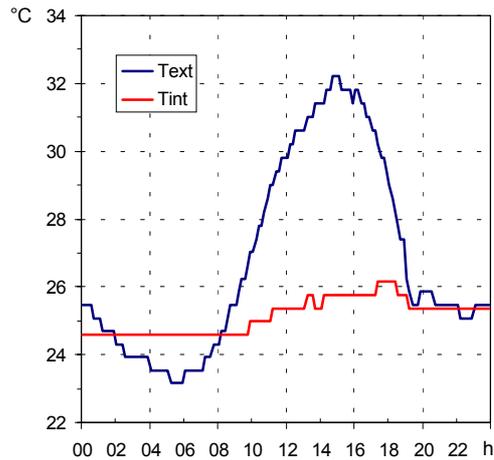


Figura 5.8: Dia de Referência – Edificação 4.

5.5 Edificação 5

A edificação 5 foi a única monitorada no 3º período de medições, entre 02 e 07 de novembro de 2002. Os dados de temperatura de bulbo seco, obtidos por monitoramento, são apresentados na figura 5.9.

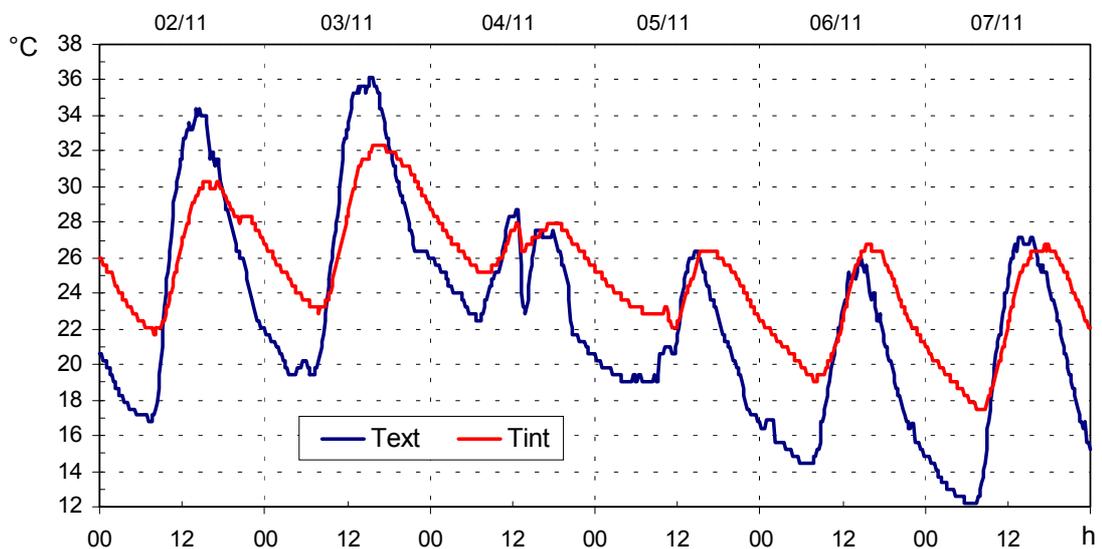


Figura 5.9: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 5.

Na edificação 5, as temperaturas externas permaneceram no intervalo entre 12 e 36°C, durante todo o período, e as temperaturas internas entre 18 e 32°C. A elevada oscilação das temperaturas internas é resultado, principalmente, do sistema construtivo empregado nessa edificação, de baixa resistência térmica, com duas fachadas totalmente expostas à radiação solar.

Nos dias 05, 06 e 07/11/2002, a curva de variação da temperatura interna apresentou comportamento semelhante. Com base nestes dados, escolheu-se o dia 07/11 como “dia de referência” da edificação 5 (Figura 5.10).

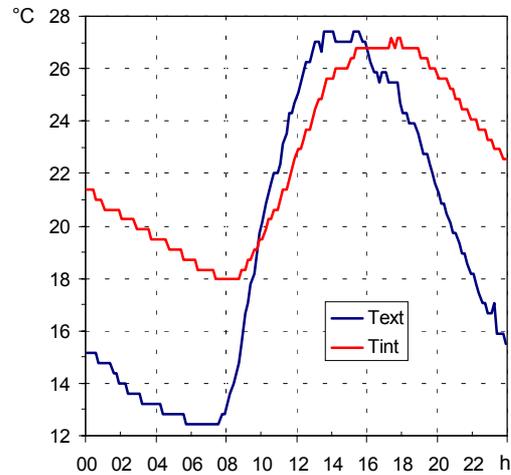


Figura 5.10: Dia de Referência – Edificação 5.

5.6 Edificação 6

A edificação 6 foi monitorada no 4º período de medições, entre 18 e 26 de março de 2003. Os dados de TBS, obtidos por monitoramento, são apresentados na figura 5.11.

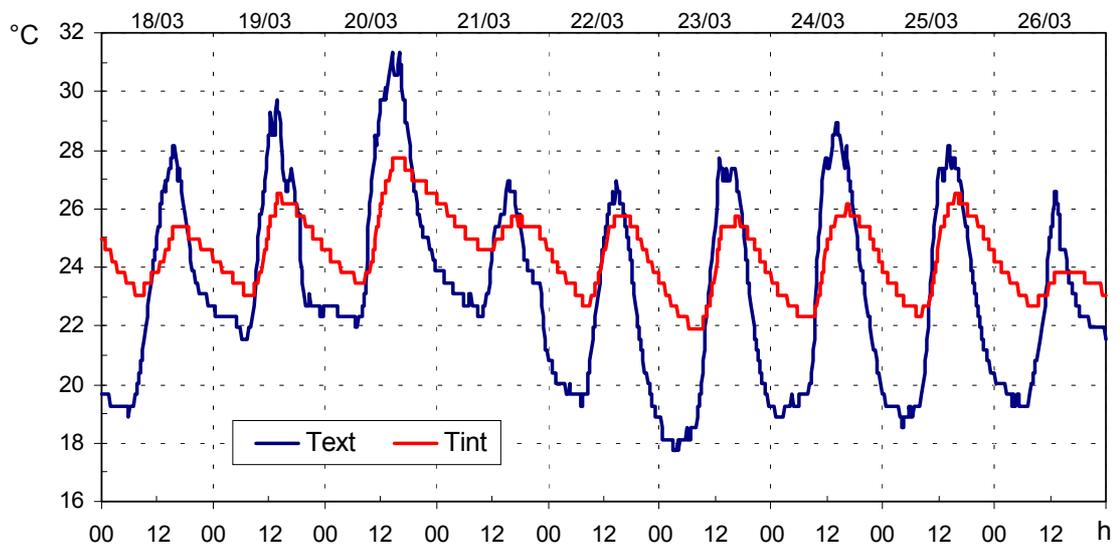


Figura 5.11: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 6.

Analisando-se a figura 5.11, pode-se notar que no dia 21/03 houve a entrada de frente-fria na região, o que provocou uma sensível redução da temperatura externa. As temperaturas internas, nesse dia, também foram influenciadas pela mudança de comportamento da curva das temperaturas externas. Como resultado, os momentos de ocorrência das temperaturas máxima e mínima internas foram alterados para 0h e 24h, respectivamente. Nos demais dias do período de medições, as temperaturas médias internas mantiveram-se acima das médias externas, com temperaturas máximas internas ocorrendo em torno das 16 horas e mínimas às 08 horas.

Com base nos dados obtidos por monitoramento, apresentados na figura 5.11, nota-se que nos dias 23, 24 e 25/03/2003, a curva de variação da TBS interna apresentou comportamento semelhante. Desta forma, escolheu-se o dia 25/03 como o “dia de referência” da edificação 6 (Figura 5.12).

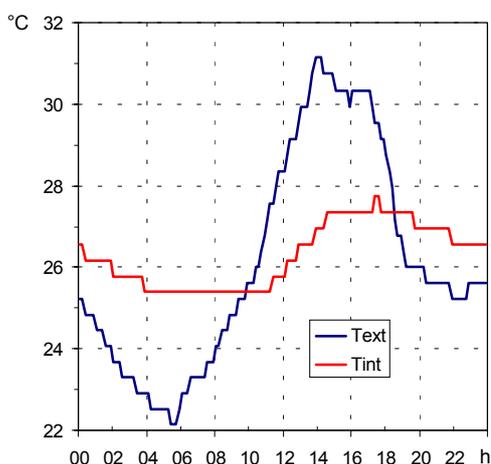


Figura 5.12: Dia de Referência – Edificação 6.

5.7 Edificação 7

Na figura 5.13, são apresentados os dados de temperatura de bulbo seco, registrados interna e externamente na edificação 7, durante o 4º período de medições.

Diferentemente das demais edificações monitoradas, na edificação 7 as temperaturas internas apresentaram uma variação muito pequena, em torno de 0,4 °C. No exterior, a amplitude térmica variou entre 8 e 11 K, com exceção dos dias 21 e 26/03, devido à entrada de frentes-frias, que reduziram esses valores para cerca de 6 K. A pequena variação da TBS interna, neste caso, representa a capacidade de amortecimento térmico do respectivo sistema construtivo.

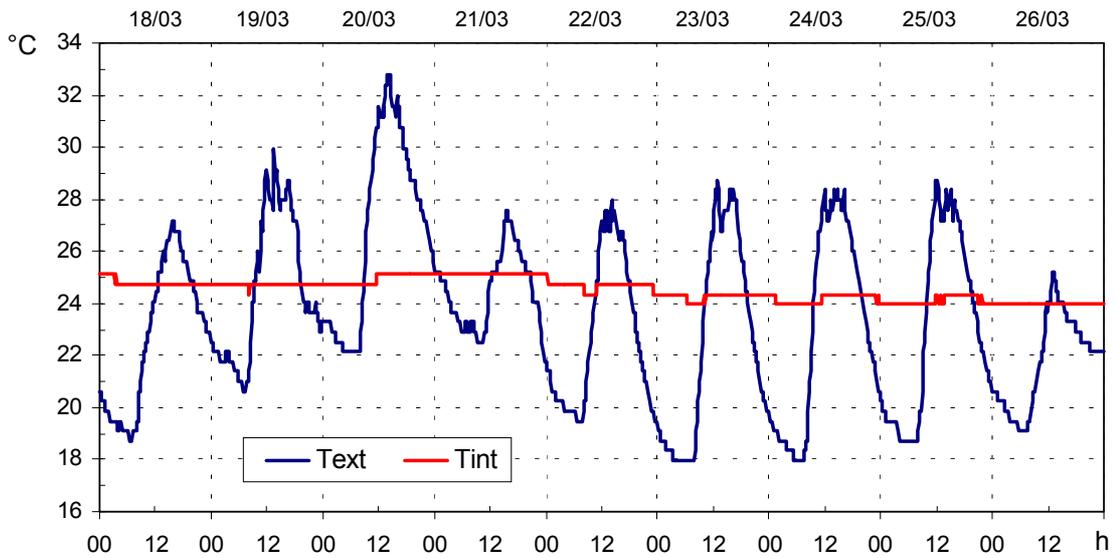


Figura 5.13: Curva de variação da TBS, externa e interna – Edificação 7.

Assim como na edificação 6, os dados obtidos no dia 25/03 foram escolhidos para representar o “dia de referência” da edificação 7 (Figura 5.14).

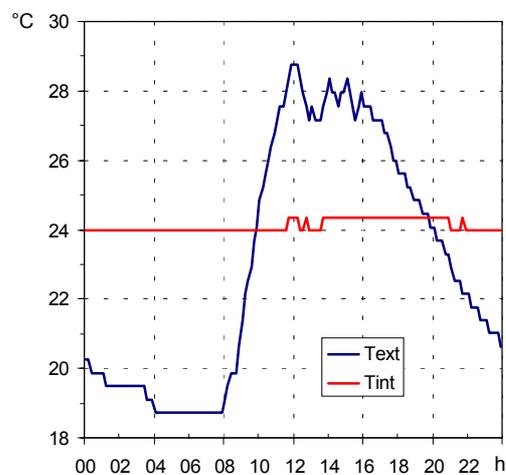


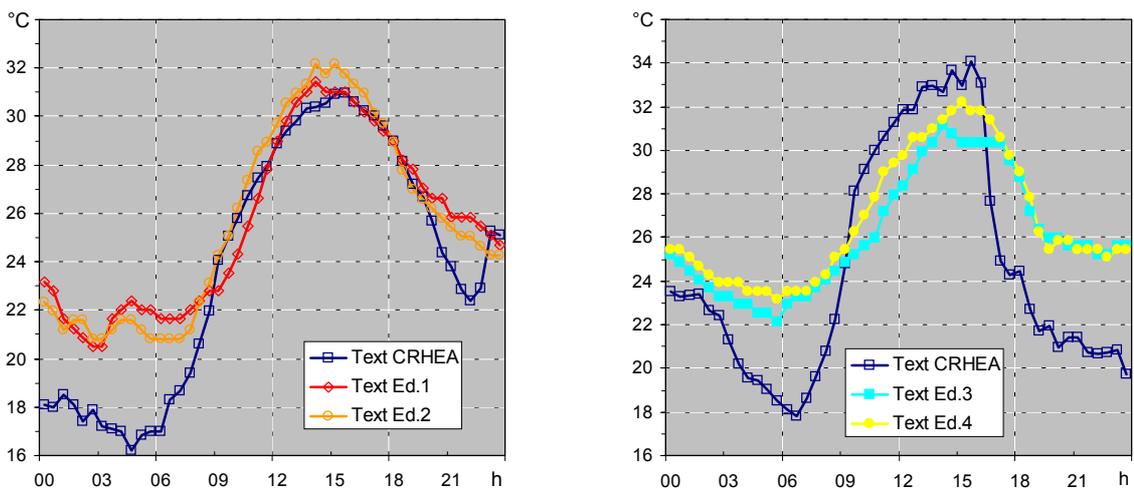
Figura 5.14: Dia de Referência – Edificação 7.

5.8 Diferenças Climáticas entre Microclimas

O monitoramento das edificações ocorreu em 4 diferentes períodos, como apresentado anteriormente. As diferenças registradas entre os climas externos, nos diferentes pontos monitorados, são parcialmente responsáveis pelas diferenças observadas entre as temperaturas nos ambientes internos das edificações, dificultando comparar-se os efeitos térmicos dos respectivos sistemas construtivos.

Entretanto, outras pesquisas já demonstraram que, mesmo quando os monitoramentos são simultâneos, este problema também acontece, pois as temperaturas externas variam significativamente entre diferentes locais de uma mesma cidade. Neste sentido, cabe mencionar, por exemplo, a investigação sobre Ilhas de Calor na cidade de São Paulo, onde Lombardo (1985) identificou diferenças térmicas simultâneas de até 10 °C.

Para comprovar as diferenças climáticas entre os diversos pontos monitorados na cidade, além dos dados de monitoramento das edificações, foram obtidos dados de TBS coletados na Estação Climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA), da Escola de Engenharia de São Carlos - USP. Esses dados, correspondentes aos períodos de medições, são apresentados a seguir, em conjunto com os dados coletados nas edificações. Para facilitar a observação, considerou-se apenas o dia escolhido como referência, em cada período (Figuras 5.15 e 5.16).



Dia de Referência - 1º Período: 19/09/2002

Dia de Referência - 2º Período: 06/10/2002

Figura 5.15: Diferenças entre microclimas – 1º e 2º Períodos de Medições

Nas edificações, a variação da temperatura externa apresentou um comportamento bastante semelhante à curva de distribuição da TBS obtida a partir das medições feitas na estação climatológica do CRHEA. No entanto, os valores de TBS coletados no CRHEA foram um pouco inferiores aos valores de TBS obtidos no exterior das edificações. Isto se deve, principalmente, à localização dessa estação climatológica em uma região com baixa densidade de ocupação, cujo clima difere daquele presente no perímetro urbano da cidade.

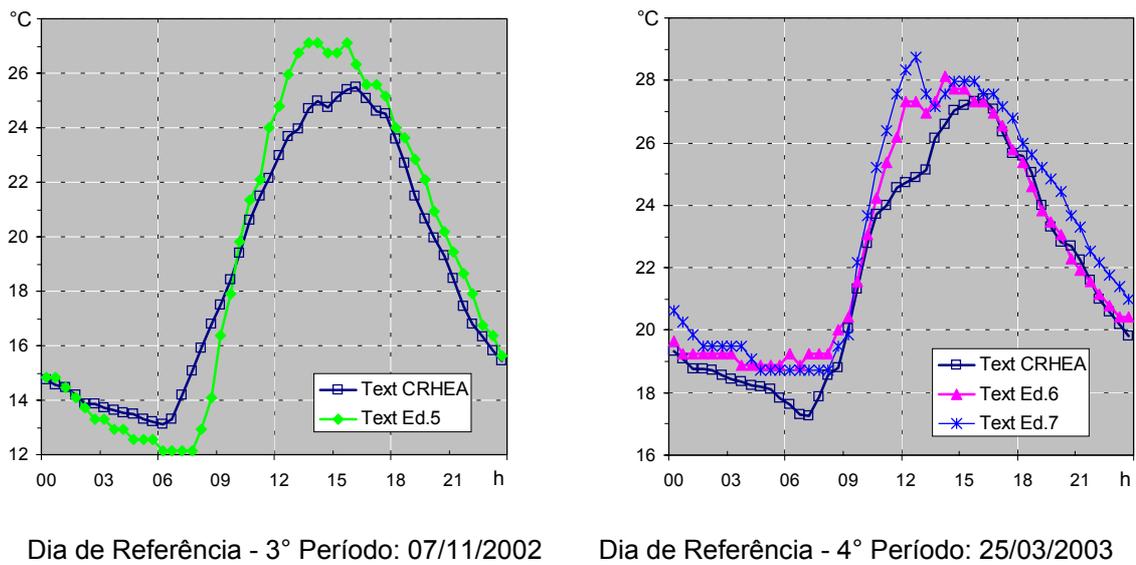


Figura 5.16: Diferenças entre microclimas – 3° e 4° Períodos de Medições.

Diferentemente dos demais períodos de medições, o dia de referência do 2° período apresentou temperatura máxima externa, coletada no CRHEA, superior às temperaturas medidas no exterior das edificações. Com relação às temperaturas mínimas, no 1° e 2° períodos ocorreram as maiores diferenças entre dados da estação climatológica e dados obtidos no exterior das edificações (cerca de 4 K). Outro comportamento distinto ocorreu na edificação 5, que apresentou temperatura mínima externa inferior à TBS mínima da estação climatológica.

Devido às diferenças observadas entre os climas externos, optou-se por considerar um clima único para todas as edificações. Este método, apresentado a seguir, constitui uma tentativa de solução para esse problema.

CAPÍTULO 6

ANÁLISES DA INÉRCIA TÉRMICA DAS EDIFICAÇÕES

"O que prevemos, raramente ocorre; o que menos esperamos, geralmente acontece".

Benjamin Disraeli

6. ANÁLISES DA INÉRCIA TÉRMICA DAS EDIFICAÇÕES

6.1 Análise em Meses de Inverno e Verão

Considerando-se os dados da estação climatológica do CRHEA para a cidade de São Carlos, no ano de 2002 (Tabela 6.1), foram determinados os meses mais representativos para períodos de Inverno e Verão.

Tabela 6.1: Dados da estação climatológica do CRHEA para o ano de 2002.

Mês	Temp. Média (°C)	Média Temp. Máximas (°C)	Média Temp. Mínimas (°C)	Temp. Máxima Absoluta (°C)	Temp. Mínima Absoluta (°C)	Chuva (mm)	Umidade Relativa (%)
Jan	22,82	28,49	18,80	32,85	13,47	412	89
Fev	22,16	27,50	18,33	31,76	14,06	274	91
Mar	23,74	30,38	18,97	33,24	16,52	108	86
Abr	23,09	30,37	17,03	31,86	13,78	9	81
Mai	19,38	26,16	14,37	30,51	7,67	58	86
Jun	18,75	27,04	12,51	30,05	9,07	0	81
Jul	16,85	24,87	10,45	30,80	2,39	20	80
Ago	20,56	27,98	14,87	31,33	11,33	93	75
Set	19,58	26,00	13,29	32,30	1,98	29	79
Out	24,80	32,68	18,05	36,84	13,79	67	69
Nov	23,05	29,04	18,15	33,99	11,99	175	83
Dez	23,70	29,66	19,23	32,82	15,82	133	88

Fonte: CRHEA (2003)

A partir do maior valor entre as médias mensais das temperaturas máximas, adotou-se o mês de outubro como o mais representativo do período de verão. No caso das médias mensais das temperaturas mínimas, o menor valor ocorreu no mês de julho, escolhendo-se este como o período mais representativo de inverno.

Na figura 6.1, são apresentados os dados de temperatura média, média de máximas e média de mínimas, mês a mês, a partir dos dados coletados na estação climatológica do CRHEA.

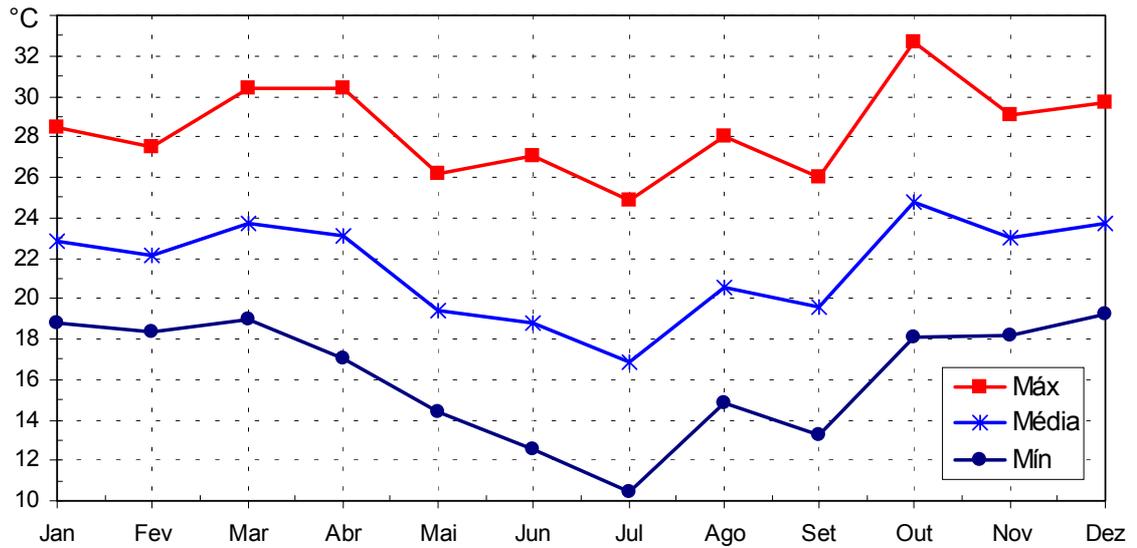


Figura 6.1: Temperaturas médias mensais – Estação Climatológica CRHEA.

6.1.1 Temperaturas Externas e Dia de Referência – Mês de Inverno

Para o mês de julho de 2002, são apresentados os dados de temperatura de bulbo seco (Figura 6.2), assim como as temperaturas máximas, médias e mínimas diárias desse mês (Figura 6.3), considerando-se os dados coletados na estação climatológica.

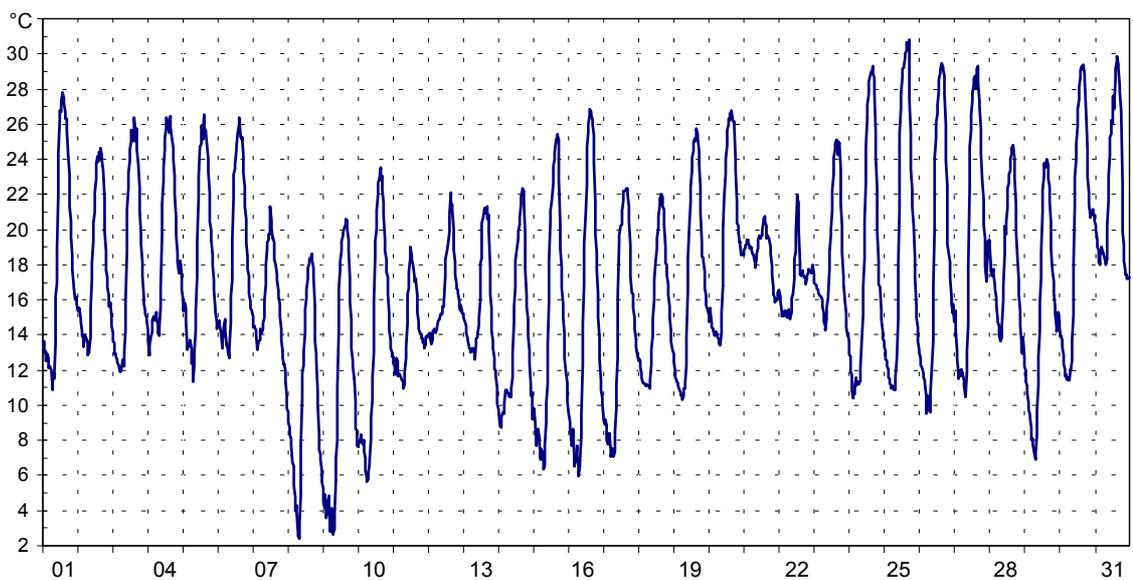


Figura 6.2: Temperaturas de bulbo seco para período de inverno – Julho/2002.

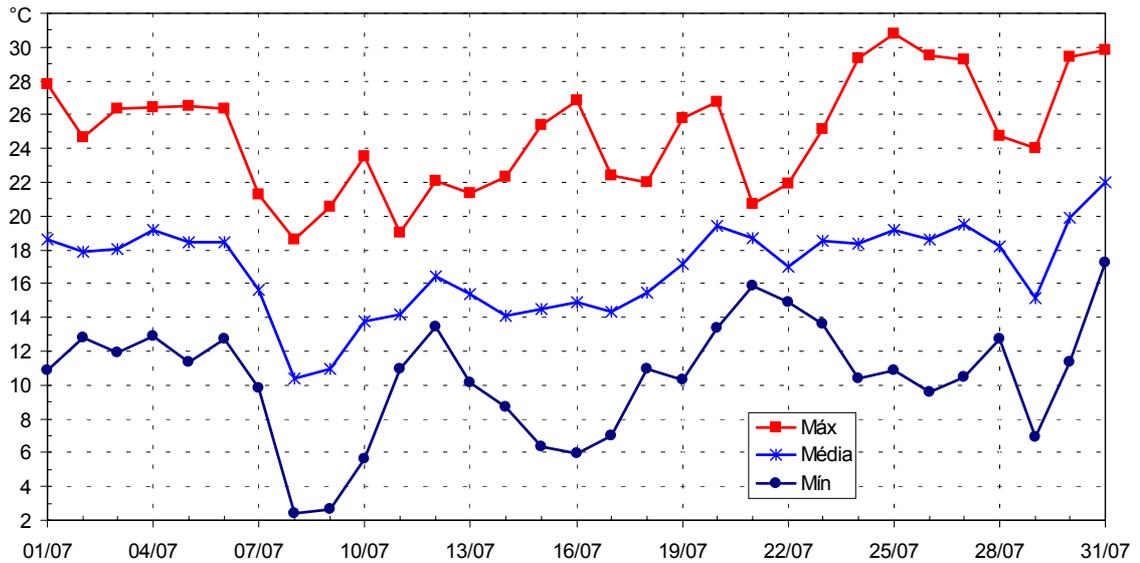


Figura 6.3: Temperaturas diárias, máximas, médias e mínimas – Período de Inverno.

Com base nestes dados, escolheu-se o dia 26/07/2002 como representativo do mês de inverno, por apresentar comportamento mais homogêneo e características semelhantes aos dias 24 e 25/07/2002, conforme recomendação do projeto de norma da ABNT (2002). Os dados de TBS, para esse dia (26/07/2002), são apresentados na figura 6.4. Para facilitar o cálculo de graus-hora de desconforto (item 61.4), as curvas dos dias de referência, para os períodos de inverno e verão, foram plotadas com seus valores registrados de hora em hora.

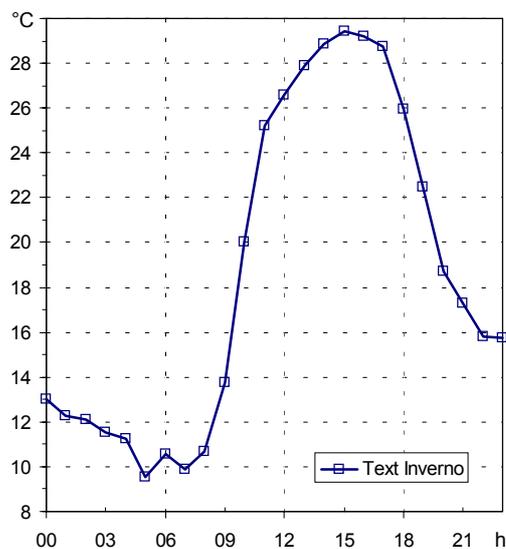


Figura 6.4: Dia de Referência (26/07/2002) – Período de Inverno.

6.1.2 Temperaturas Externas e Dia de Referência – Mês de Verão

Os dados de temperatura de bulbo seco, coletados na estação climatológica para o mês de outubro de 2002, assim como as temperaturas diárias máximas, médias e mínimas desse mês, são apresentados nas figuras 6.5 e 6.6.

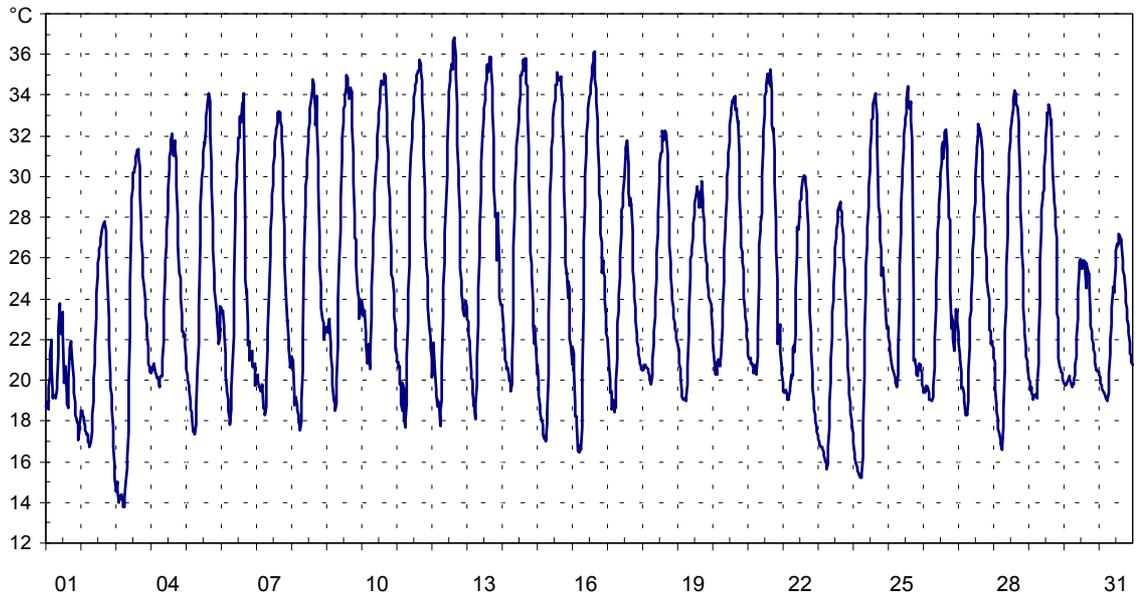


Figura 6.5: Temperaturas de bulbo seco para período de verão – Outubro/2002.

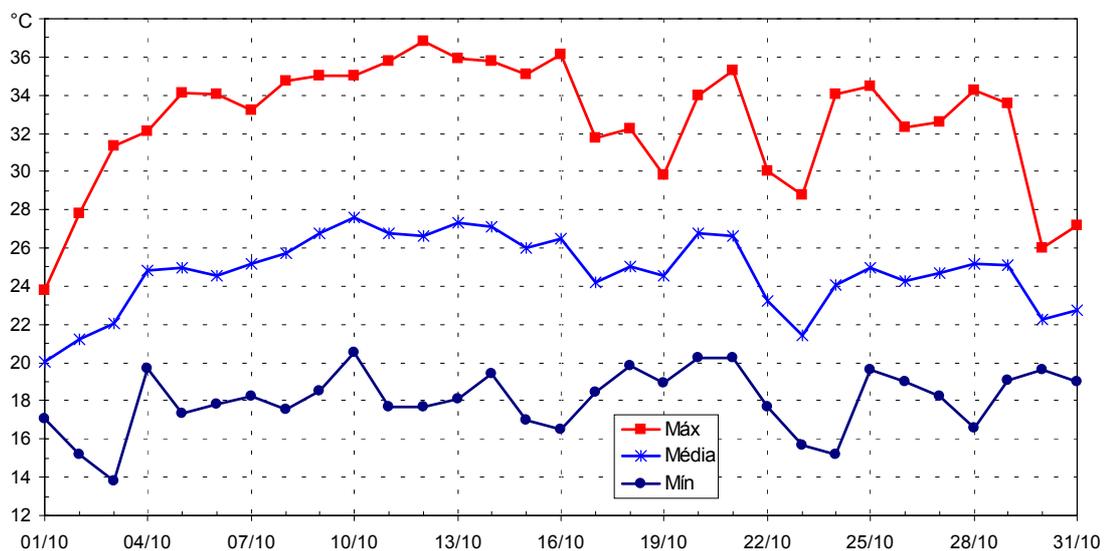


Figura 6.6: Temperaturas diárias, máximas, médias e mínimas – Período de Verão.

A partir desses dados, elegeu-se o dia 14/10/2002 como representativo do mês de verão. Este dia apresentou comportamento mais homogêneo e características semelhantes aos dias 11, 12 e 13/10/2002. Os dados de TBS, para este dia (14/10/2002), são apresentados na figura 6.7.

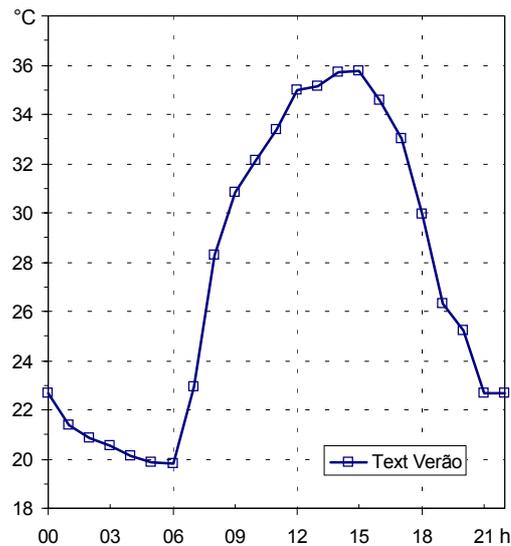


Figura 6.7: Dia de Referência (14/10/2002) – Período de Verão.

6.1.3 Ajuste das Curvas de Temperatura Interna aos Dias de Referência de Inverno e Verão

Para a análise do comportamento de cada edificação, frente a condições externas semelhantes, fez-se o ajuste das curvas internas dos “dias de referência”, conforme descrito no item 3.3.

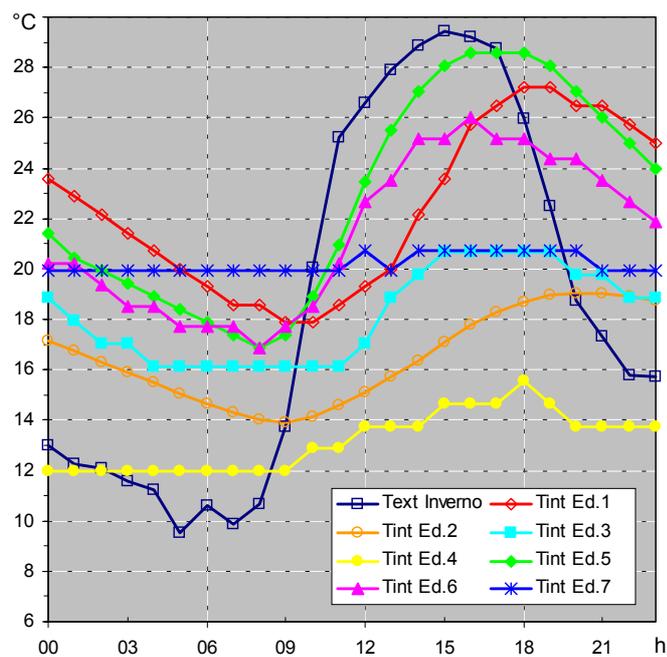
Inicialmente, determinou-se a relação observada, de hora em hora, entre as temperaturas interna e externa, para cada ambiente monitorado, por meio do cálculo do Fator de Variação da Temperatura Interna (Eq. 3.1). Considerando-se este parâmetro, para cada ambiente monitorado, fez-se um cálculo estimativo das temperaturas que ocorreriam internamente, se todas as edificações estivessem submetidas ao mesmo clima exterior (Eq. 3.2).

No apêndice A são apresentadas as tabelas para cálculo do Fator de Variação da Temperatura Interna (FTI_h), assim como a determinação das novas temperaturas internas, em cada edificação, para períodos de verão e inverno.

As novas temperaturas internas, no dia de referência de inverno, estão detalhadas na tabela 6.2 e as novas curvas de variação das temperaturas internas, quando submetidas ao clima externo do dia 26/07/2002, são apresentadas na figura 6.8.

Tabela 6.2: Dados de TBS internas estimadas - Período de Inverno.

Hora	Text Inverno	Tint Ed.1	Tint Ed.2	Tint Ed.3	Tint Ed.4	Tint Ed.5	Tint Ed.6	Tint Ed.7
00:00	13,00	23,58	17,15	18,85	12,00	21,44	20,19	19,96
01:00	12,27	22,87	16,73	17,95	12,00	20,43	20,19	19,96
02:00	12,10	22,14	16,29	17,05	12,00	19,92	19,36	19,96
03:00	11,56	21,43	15,87	17,05	12,00	19,40	18,54	19,96
04:00	11,25	20,72	15,50	16,15	12,00	18,90	18,54	19,96
05:00	9,55	20,01	15,03	16,15	12,00	18,39	17,72	19,96
06:00	10,58	19,30	14,64	16,15	12,00	17,89	17,72	19,96
07:00	9,89	18,59	14,31	16,15	12,00	17,38	17,72	19,96
08:00	10,69	18,59	14,01	16,15	12,00	16,88	16,88	19,96
09:00	13,74	17,90	13,92	16,15	12,00	17,38	17,72	19,96
10:00	20,03	17,90	14,13	16,15	12,89	18,90	18,54	19,96
11:00	25,20	18,59	14,61	16,15	12,89	20,93	20,19	19,96
12:00	26,59	19,30	15,11	17,05	13,76	23,47	22,69	20,71
13:00	27,91	20,01	15,71	18,85	13,76	25,50	23,51	19,96
14:00	28,88	22,14	16,34	19,75	13,76	27,05	25,18	20,71
15:00	29,44	23,58	17,06	20,65	14,65	28,08	25,18	20,71
16:00	29,21	25,75	17,75	20,65	14,65	28,60	26,02	20,71
17:00	28,74	26,47	18,29	20,65	14,65	28,60	25,18	20,71
18:00	25,98	27,20	18,68	20,65	15,55	28,60	25,18	20,71
19:00	22,47	27,20	18,94	20,65	14,65	28,08	24,34	20,71
20:00	18,74	26,47	19,03	19,75	13,76	27,05	24,34	20,71
21:00	17,31	26,47	19,03	19,75	13,76	26,02	23,51	19,96
22:00	15,81	25,75	18,89	18,85	13,76	25,00	22,69	19,96
23:00	15,75	25,02	18,73	18,85	13,76	23,98	21,85	19,96

**Figura 6.8:** Curvas de variação das temperaturas internas – Período de Inverno.

Para o cálculo do atraso térmico, considerou-se os momentos de ocorrência das temperaturas máximas e mínimas, externas e internas (Tabela 6.3).

Tabela 6.3: Atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas – Período de Inverno

	Hora de Mínimas	Atraso de Mínimas (h)	Hora de Máximas	Atraso de Máximas (h)
Exterior	05h	---	15h	---
Edificação 1	09h30min	4,5	18h30min	3,5
Edificação 2	09h	4,0	20h30min	5,5
Edificação 3	07h30min	2,5	17h	2,0
Edificação 4	04h30min	- 0,5	18h	3,0
Edificação 5	08h	3,0	17h	2,0
Edificação 6	08h	3,0	16h	1,0
Edificação 7	05h30min	0,5	16h	1,0

Com relação às temperaturas mínimas, a edificação 1 apresentou o maior atraso. Este comportamento deve-se à alta exposição deste ambiente à incidência de radiação solar direta, a qual eleva consideravelmente as temperaturas internas durante o dia. No período noturno, a edificação demora a perder o calor armazenado ao longo do dia, até que a temperatura externa volta a subir ao amanhecer e se transmite para o interior da edificação, aquecendo o ar interno novamente.

Para as temperaturas máximas, o maior atraso térmico ocorreu na edificação 2. Neste caso, a temperatura máxima interna manifesta-se com maior retardo, pois o ambiente analisado nesta edificação possui fachada totalmente sombreada. A cobertura é o único elemento do envelope que recebe radiação solar direta e, portanto, será o principal componente a transmitir as variações da temperatura externa. Por apresentar sistema construtivo de baixa transmitância térmica, o atraso na transmissão da onda de calor pela cobertura será maior.

A edificação 4 apresentou um comportamento diferente das demais edificações. Foi a única edificação que teve atraso térmico negativo (-30 min), no dia de referência de inverno. Este comportamento é difícil de ser compreendido. Analisando-se a curva de variação das temperaturas da edificação 4 (Figura 6.8), nota-se que a temperatura interna manteve-se constante entre 0h e 9h. No entanto, o sensor de TBS utilizado para monitorar as temperaturas não apresenta grande precisão, o que impede a percepção de variações mínimas na temperatura do ar.

Desta forma, considerou-se que a temperatura mínima ocorreu na metade do intervalo compreendido entre 0h e 9h (às 4h30min). A princípio, pode-se dizer que o sistema construtivo desta edificação impede a perda de calor durante a noite, uma vez que a temperatura interna permanece constante neste período e volta a subir somente após o aumento da temperatura externa. No entanto, o atraso de mínimas pode ser resultado de manifestações climáticas do dia anterior (atraso de 24 horas) ou de dias anteriores. Neste caso, uma análise mais aprofundada deveria ser feita, considerando-se os dados de dias anteriores também.

Analisando-se as variações de temperatura do ar, para o dia de referência de inverno, observa-se que as edificações 5, 1 e 6 apresentaram as maiores amplitudes térmicas (Figura 6.9). No caso específico da edificação 1, a elevada oscilação das temperaturas internas deve-se à cor das fachadas, de elevada absorvância.

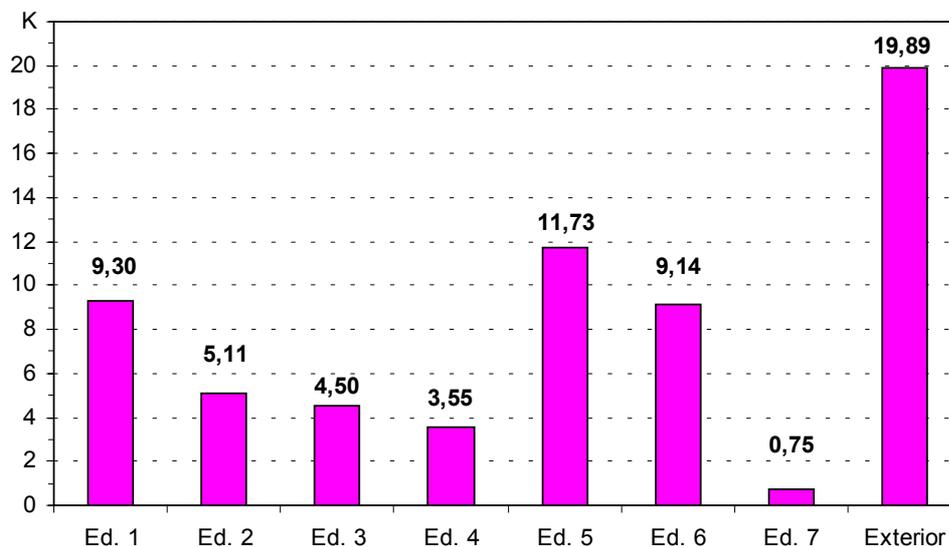


Figura 6.9: Amplitude Térmica – Período de Inverno.

A partir das amplitudes térmicas externa e interna, calculou-se os coeficientes de amortecimento térmico ($\mu = A_{Int}/A_{Ext}$), apresentados na figura 6.10. A edificação 7 apresentou o menor amortecimento térmico, o que representa que o ambiente monitorado nesta edificação possui a maior capacidade de amortecimento, entre todos os ambientes monitorados. Ou seja, a variação das temperaturas internas, nessa edificação, corresponde a apenas 3,79% da variação das temperaturas externas. No entanto, a edificação 5 foi a que apresentou o maior coeficiente de amortecimento. Portanto, o ambiente monitorado nesta edificação possui menor capacidade de amortecer as temperaturas internas. Neste caso, a variação das temperaturas internas corresponde a quase 60% da variação das temperaturas externas.

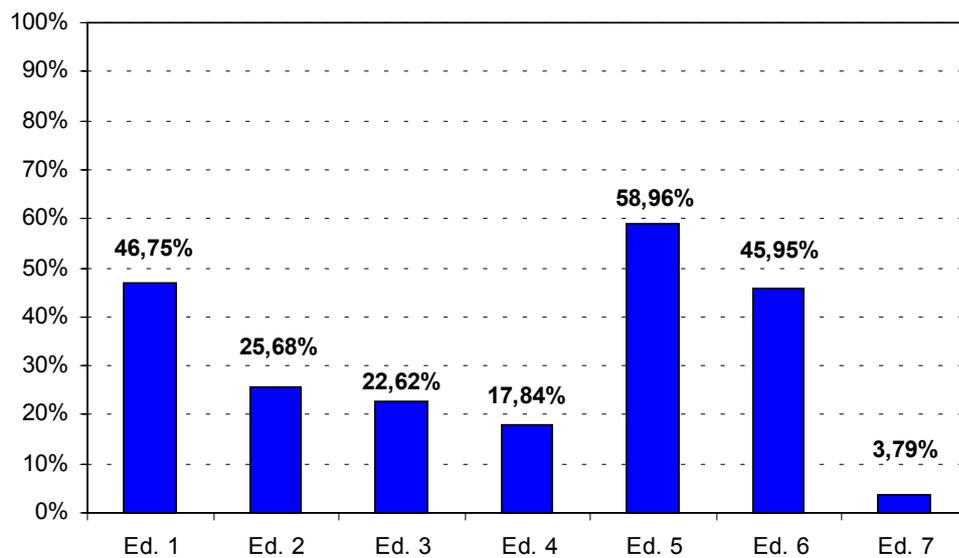


Figura 6.10: Coeficiente de Amortecimento Térmico – Período de Inverno.

É importante destacar que o coeficiente de amortecimento térmico será o mesmo, independente do período do ano, para as edificações analisadas. Isto se deve ao método adotado nesta pesquisa, o qual considera a capacidade de amortecimento térmico de cada sistema construtivo, para o cálculo do Fator de Variação da Temperatura Interna (FTI_h). Ou seja, partiu-se da hipótese que a variação da temperatura interna mantém uma relação constante com a variação da temperatura externa (coeficiente de amortecimento térmico constante). Deste modo, é possível analisar o comportamento térmico de determinado sistema construtivo, inserido em qualquer tipo de clima. As edificações analisadas nesta pesquisa poderiam, por exemplo, ser inseridas em um clima quente e seco e, com o ajuste das temperaturas internas, por meio do FTI_h , faz-se a análise do desempenho da edificação frente a condições típicas desse clima específico.

As novas temperaturas internas, para o dia de referência de verão, estão detalhadas na tabela 6.4. As respectivas curvas de variação das temperaturas internas, quando submetidas ao mesmo clima externo, representativo do período de verão, são apresentadas na figura 6.11.

Tabela 6.4: Dados de TBS internas estimadas - Período de Verão.

Hora	Text Verão	Tint Ed.1	Tint Ed.2	Tint Ed.3	Tint Ed.4	Tint Ed.5	Tint Ed.6	Tint Ed.7
00:00	22,69	31,08	25,91	27,28	21,77	29,36	28,36	28,17
01:00	21,36	30,51	25,57	26,55	21,77	28,54	28,36	28,17
02:00	20,86	29,92	25,22	25,83	21,77	28,14	27,68	28,17
03:00	20,52	29,35	24,88	25,83	21,77	27,72	27,03	28,17
04:00	20,13	28,78	24,58	25,11	21,77	27,31	27,03	28,17
05:00	19,87	28,21	24,20	25,11	21,77	26,91	26,37	28,17
06:00	19,80	27,64	23,89	25,11	21,77	26,50	26,37	28,17
07:00	22,95	27,07	23,62	25,11	21,77	26,10	26,37	28,17
08:00	28,27	27,07	23,38	25,11	21,77	25,69	25,69	28,17
09:00	30,81	26,51	23,31	25,11	21,77	26,10	26,37	28,17
10:00	32,13	26,51	23,48	25,11	22,49	27,31	27,03	28,17
11:00	33,36	27,07	23,86	25,11	22,49	28,95	28,36	28,17
12:00	35,01	27,64	24,27	25,83	23,19	30,99	30,36	28,78
13:00	35,16	28,21	24,75	27,28	23,19	32,63	31,02	28,17
14:00	35,74	29,92	25,26	28,00	23,19	33,87	32,37	28,78
15:00	35,79	31,08	25,84	28,72	23,90	34,70	32,37	28,78
16:00	34,57	32,82	26,39	28,72	23,90	35,12	33,04	28,78
17:00	32,99	33,41	26,83	28,72	23,90	35,12	32,37	28,78
18:00	29,97	33,99	27,14	28,72	24,62	35,12	32,37	28,78
19:00	26,31	33,99	27,35	28,72	23,90	34,70	31,69	28,78
20:00	25,20	33,41	27,42	28,00	23,19	33,87	31,69	28,78
21:00	22,69	33,41	27,42	28,00	23,19	33,04	31,02	28,17
22:00	22,66	32,82	27,31	27,28	23,19	32,22	30,36	28,17
23:00	20,26	32,24	27,18	27,28	23,19	31,40	29,69	28,17

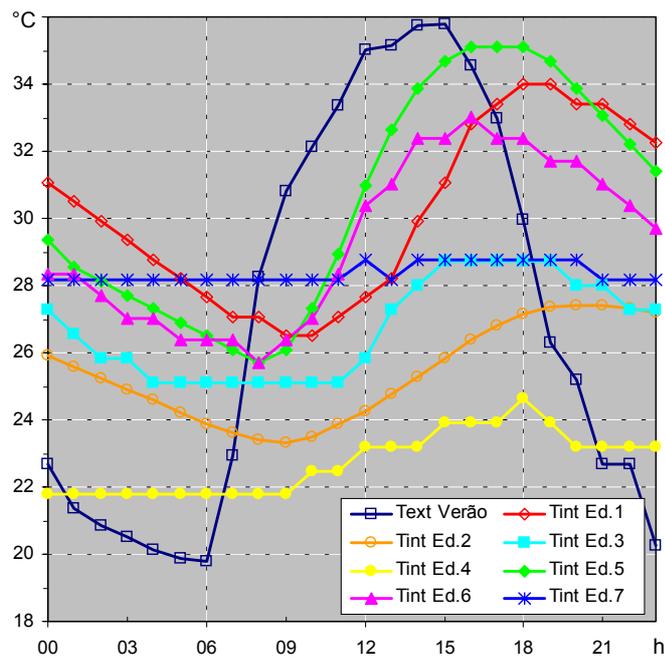


Figura 6.11: Curvas de variação das temperaturas internas – Período de Verão.

O atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas, para o dia de referência de verão, é apresentado na Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas – Período de Verão.

	Hora de Mínimas	Atraso de Mínimas (h)	Hora de Máximas	Atraso de Máximas (h)
Exterior	06h	---	15h	---
Edificação 1	09h30min	3,5	18h30min	3,5
Edificação 2	09h	3,0	20h30min	5,5
Edificação 3	07h30min	1,5	17h	2,5
Edificação 4	04h30min	- 1,5	18h	3,0
Edificação 5	08h	2,0	17h	2,0
Edificação 6	08h	2,0	16h	1,0
Edificação 7	05h30min	- 0,5	16h	1,0

Para o dia de referência de verão, o atraso de máximas foi o mesmo que no período de inverno para todas as edificações, com maior atraso na edificação 2.

Para o momento de ocorrência das temperaturas mínimas, a edificação 7 também apresentou atraso térmico negativo (-30min), além da edificação 4. Neste caso, adotou-se o mesmo método de determinação do horário de mínima, pois a curva de variação da temperatura interna manteve-se constante entre 0h e 11h, considerando-se a média desses horários (5h30min). Semelhantemente à edificação 4, o atraso de mínimas na edificação 7 pode ser resultado de manifestações do dia anterior. Para se obter melhores resultados, deve ser feita uma análise da variação das temperaturas interna e externa, incluindo dias anteriores ao considerado.

Para verão, a amplitude térmica apresentou-se inferior ao dia de referência de inverno (Figura 6.12). Contudo, as edificações 5, 1 e 6 permaneceram com o mesmo comportamento que em período de inverno, pois apresentaram as maiores oscilações de temperatura interna. Estas são edificações com fachadas mais expostas à incidência direta de radiação solar e, por esta razão, são mais suscetíveis às variações de temperatura do ar interno, devido ao elevado aquecimento do envelope dos ambientes.

Os coeficientes de amortecimento térmico para verão (Figura 6.13) são os mesmos obtidos para o dia de referência de inverno, devido ao método adotado nesta pesquisa.

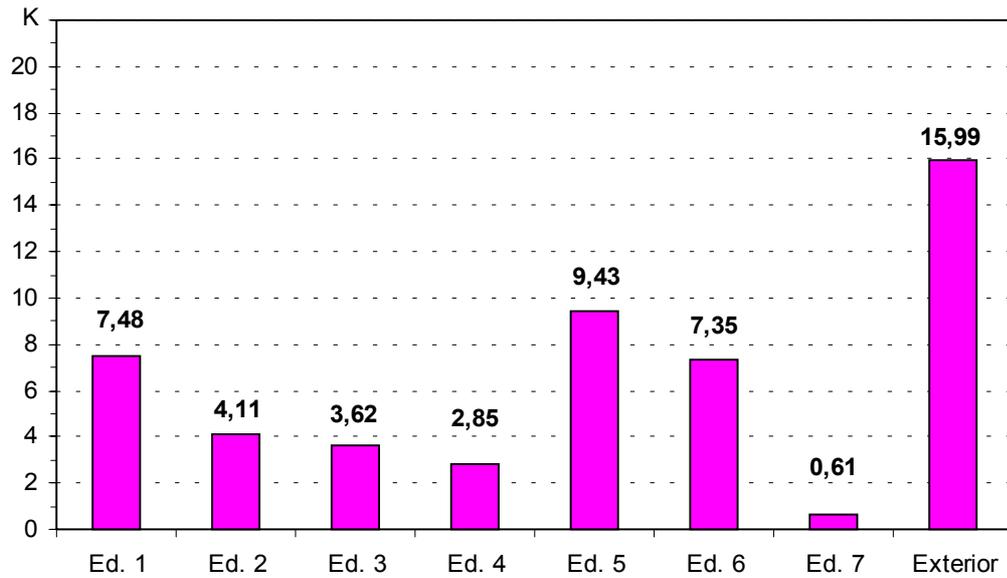


Figura 6.12: Amplitude Térmica – Período de Verão.

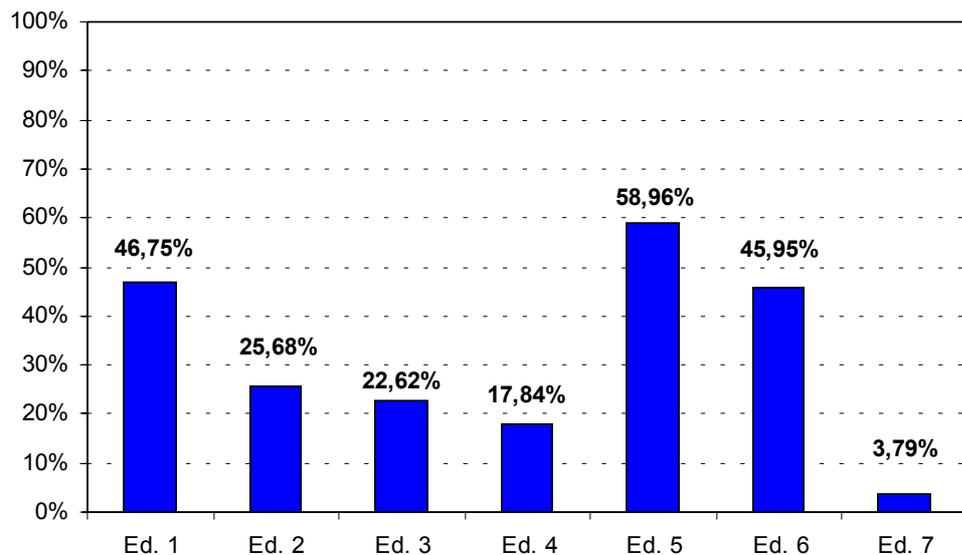


Figura 6.13: Coeficiente de Amortecimento Térmico – Período de Verão.

6.1.4 Graus-Hora de Desconforto para Inverno e Verão

Considerando-se as novas curvas de variação das temperaturas internas, para cada ambiente monitorado, determinou-se o somatório de graus-hora de desconforto por frio ou calor, acumulado ao longo dos dias de referência de inverno e verão. Para isso, considerou-se os limites de conforto indicados nas Planilhas de Mahoney, conforme descrito no item 3.4.

Para os meses de julho e outubro, em São Carlos, as Planilhas de Mahoney, apresentadas no Apêndice B e adaptadas ao clima externo da estação climatológica do CRHEA, indicam os seguintes intervalos confortáveis de temperatura (Tabela 6.6):

Tabela 6.6: Limites Confortáveis de Temperatura – Julho e Outubro de 2002.

PERÍODO	LIMITES CONFORTÁVEIS DE TEMPERATURA	
	Dia	Noite
Inverno (Julho)	$22^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Conf}} \leq 27^{\circ}\text{C}$	$17^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Conf}} \leq 21^{\circ}\text{C}$
Verão (Outubro)	$23^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Conf}} \leq 29^{\circ}\text{C}$	$17^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{Conf}} \leq 23^{\circ}\text{C}$

No método de Mahoney, há diferenças entre os intervalos confortáveis de temperatura para dia e noite. Para diferenciar estes períodos, considerou-se que o período noturno é aquele em que, normalmente, as pessoas estão dormindo e, portanto, são suscetíveis a temperaturas mais baixas. Desta forma, considerou-se *período diurno* entre 06h e 22h e *período noturno* entre 22h e 06h. Uma discussão sob este enfoque foi realizada por Roriz (2003).

Os gráficos a seguir apresentam os limites de conforto, em períodos de inverno e verão, para cada edificação. As hachuras, nestes gráficos, representam intervalos de conforto ou desconforto por frio ou calor, de acordo com as cores:

- Cinza: área dentro dos limites de conforto;
- Amarelo: desconforto por calor;
- Azul: desconforto por frio.

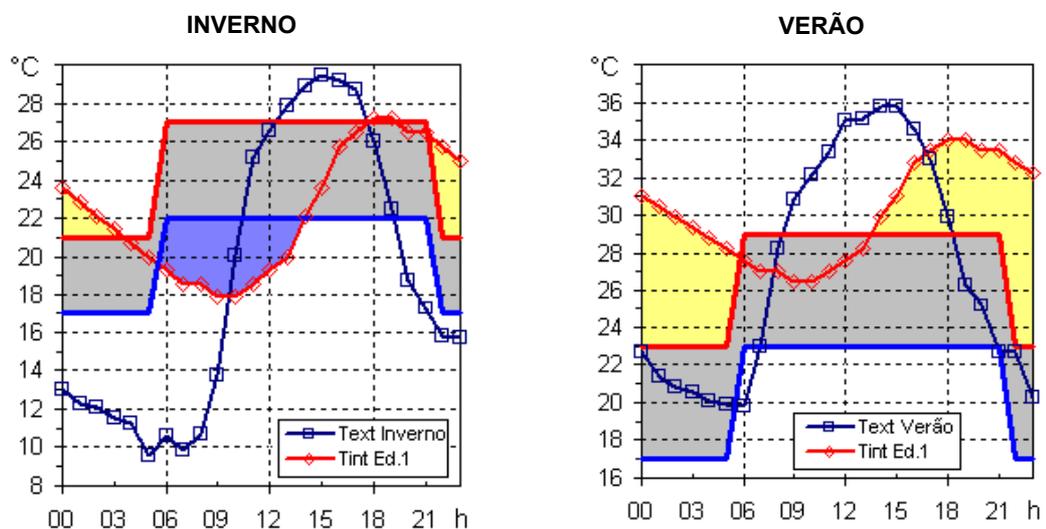


Figura 6.14: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 1.

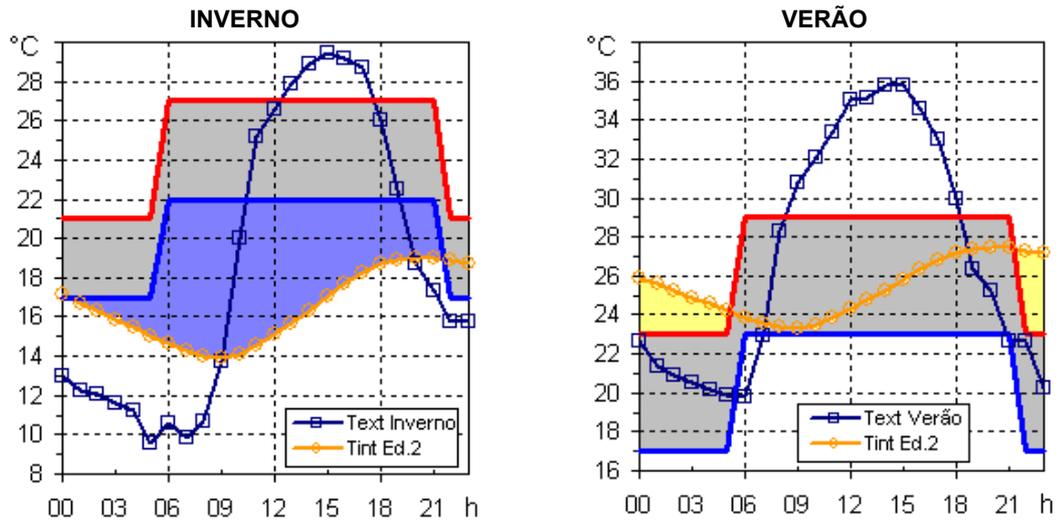


Figura 6.15: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 2.

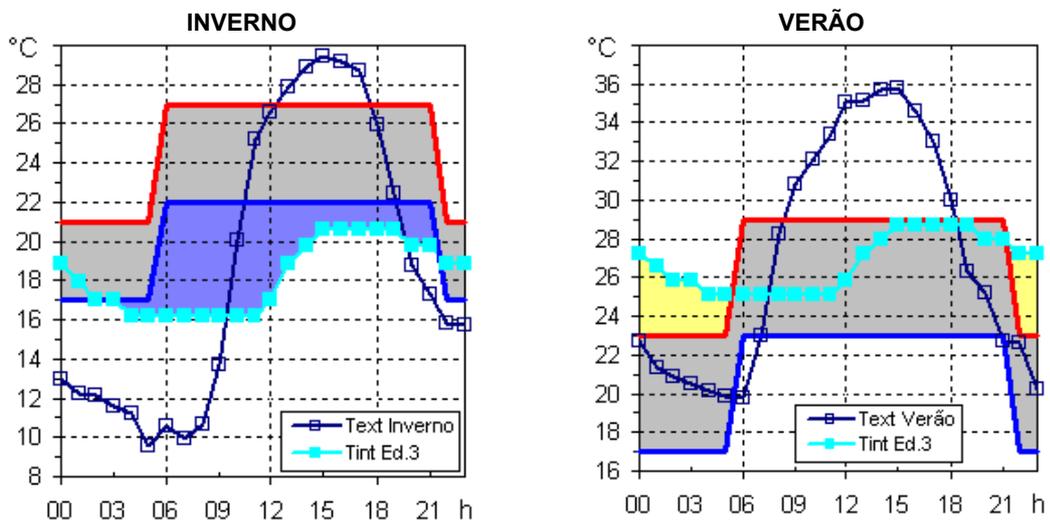


Figura 6.16: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 3.

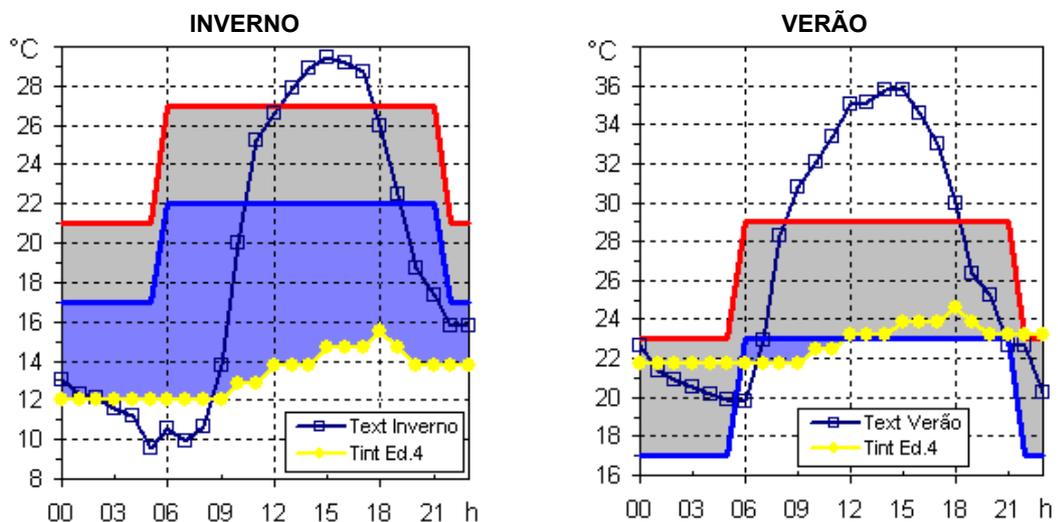


Figura 6.17: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 4.

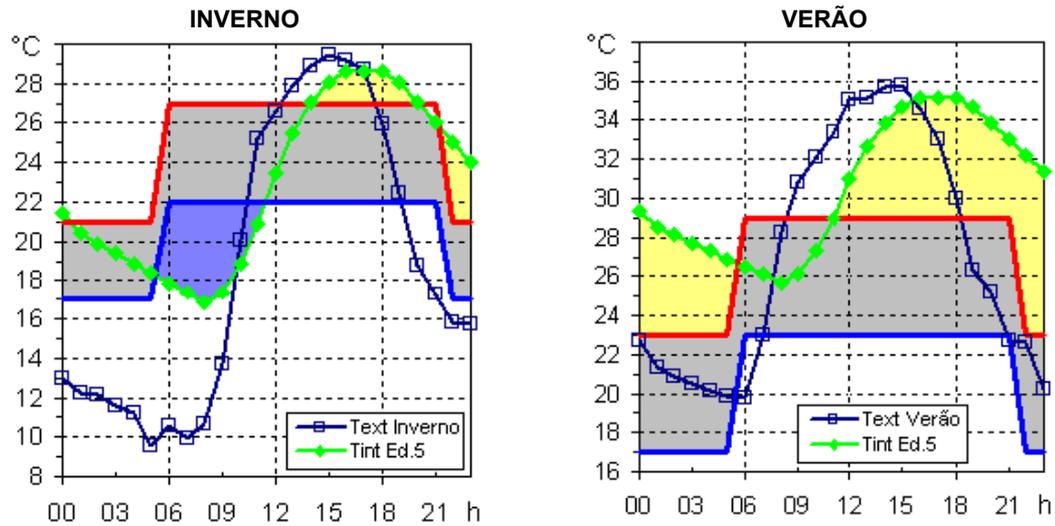


Figura 6.18: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 5.

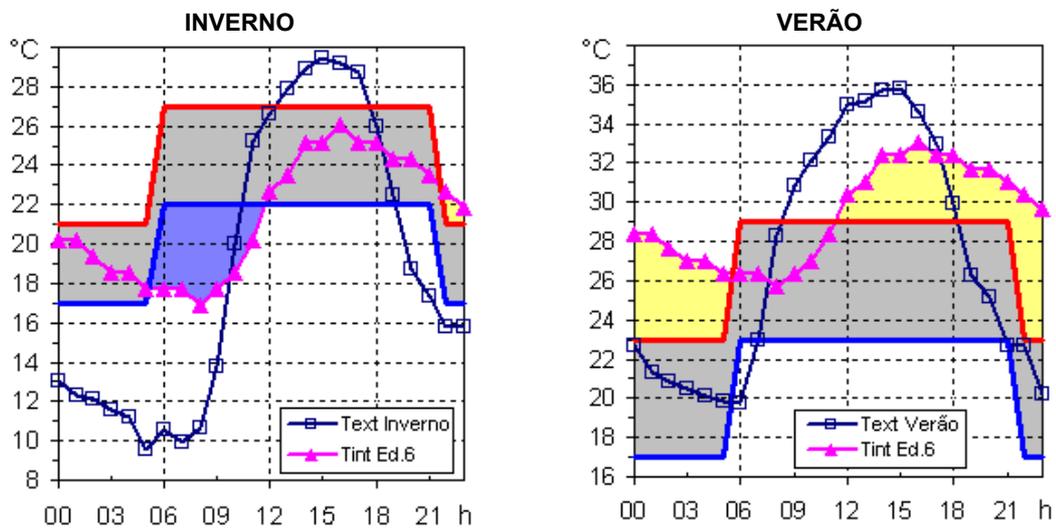


Figura 6.19: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 6.

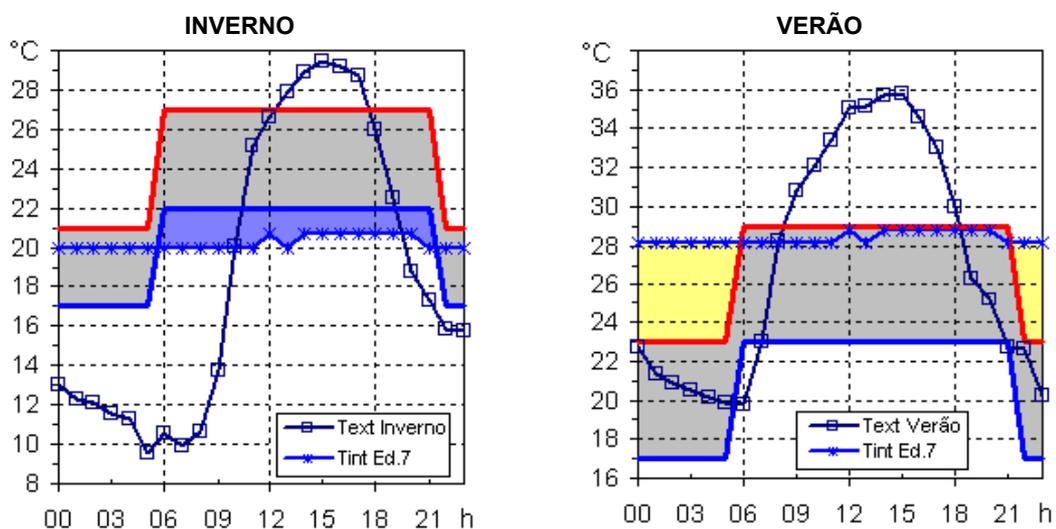


Figura 6.20: Estimativas de desconforto para inverno e verão – Edificação 7.

Com base nos limites confortáveis de temperatura apresentados na tabela 6.6, obteve-se os seguintes quantitativos de desconforto por calor ou frio, para meses de inverno e verão (Tabela 6.7):

Tabela 6.7: Graus-hora de desconforto diário, por frio ou calor, para verão e inverno.

	Dia de Referência de Inverno		Dia de Referência de Verão	
	Desconforto por Calor (Kh/dia)	Desconforto por Frio (Kh/dia)	Desconforto por Calor (Kh/dia)	Desconforto por Frio (Kh/dia)
Edificação 1	15,19	25,79	88,93	0,00
Edificação 2	0,00	96,01	20,86	0,00
Edificação 3	0,00	58,42	26,25	0,00
Edificação 4	0,00	171,73	0,37	5,95
Edificação 5	14,48	22,65	96,74	0,00
Edificação 6	2,54	23,22	69,16	0,00
Edificação 7	0,00	26,60	41,36	0,00

Para facilitar a análise entre os quantitativos de desconforto, estes dados foram reunidos em gráficos apresentados nas figuras 6.21 e 6.22, para períodos de inverno e verão, respectivamente.

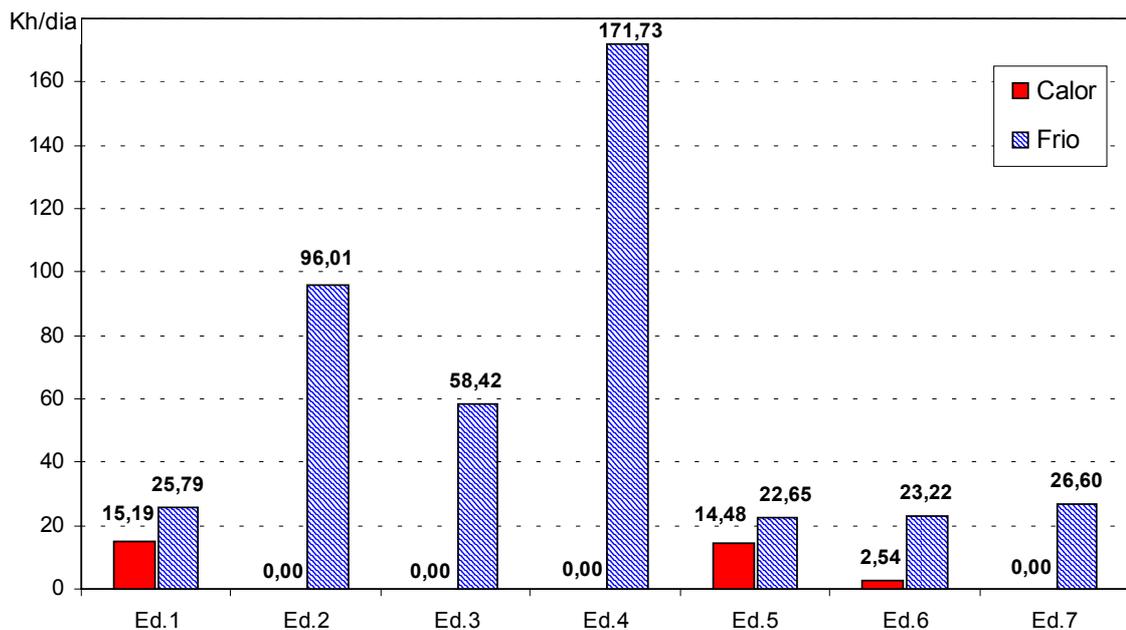


Figura 6.21: Graus-Hora de desconforto diário – Dia de Referência de Inverno.

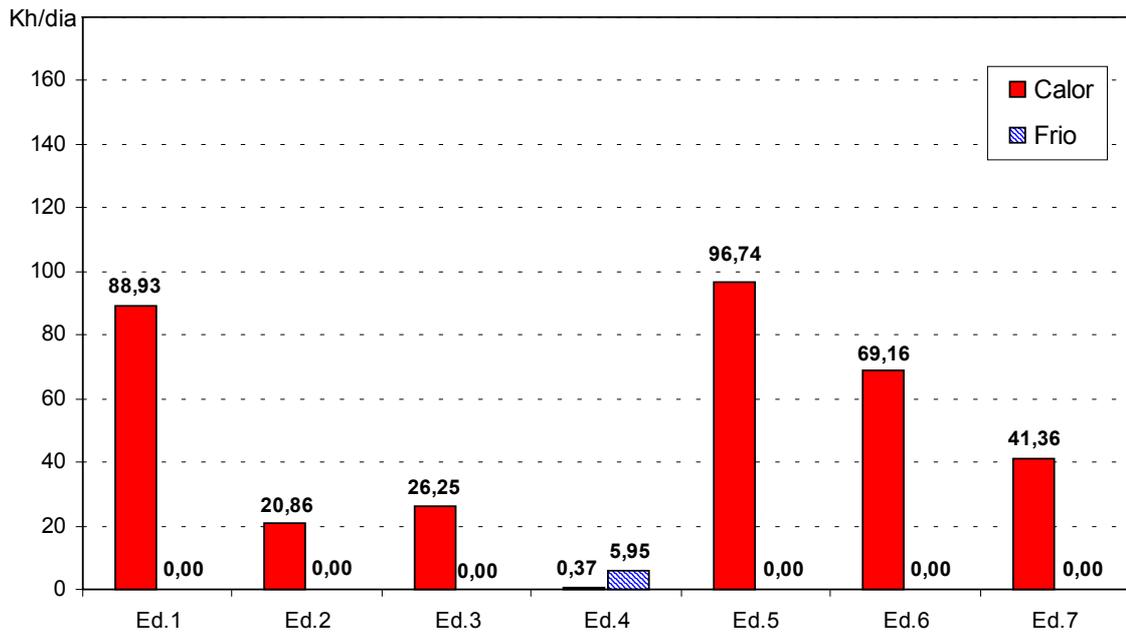


Figura 6.22: Graus-Hora de desconforto diário – Dia de Referência de Verão.

A partir dos quantitativos de desconforto obtidos para dias de referência de inverno e verão, algumas conclusões são apresentadas:

- As edificações 5 e 1 apresentaram os maiores valores de graus-hora de desconforto por calor, acumulados ao longo do dia referência de verão e a edificação 4 foi a mais confortável neste dia;
- A edificação 4 foi a única que apresentou desconforto por frio, para verão. No entanto, este desconforto foi quase desprezível, quando comparado com o desconforto por calor nas demais edificações;
- Para o dia de referência de inverno, a edificação 4 foi a mais desconfortável, com necessidade de aquecimento ao longo de todo o dia;
- As edificações 1, 5 e 6 foram as únicas que apresentaram desconforto por calor no inverno.

Os quantitativos de desconforto, obtidos neste item, foram utilizados para se estimar a necessidade de aquecimento ou refrigeração, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes.

6.1.5 Estimativas da Necessidade de Aquecimento e Refrigeração nos Ambientes – Inverno e Verão

Para cada edificação, estimou-se a quantidade de calor necessária a ser retirada (refrigeração) ou fornecida (aquecimento) para restabelecer o conforto térmico nos ambientes analisados. Para os dias de referência de inverno e verão, esta estimativa inicial foi função dos quantitativos de graus-hora de desconforto diários.

Aplicando-se a equação 3.7 para o dia de referência de inverno, resultam os valores indicados nas tabelas 6.8 e 6.9. Os cálculos de q_c e q_v estão detalhados no item 6.3.

Tabela 6.8: Estimativas da quantidade de calor diária a ser retirada, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Inverno.

	Desconforto por Calor (Kh/dia)	$q = q_c + q_v$ (W/K)	Calor a ser Retirado (Wh/dia)	Volume do Ambiente (m^3)	Calor a ser Retirado por m^3 (Wh/ m^3 dia)
Edificação 1	15,19	89,94	1366,12	32,37	42,20
Edificação 2	0,00	58,54	0,00	34,30	0,00
Edificação 3	0,00	96,70	0,00	35,12	0,00
Edificação 4	0,00	98,70	0,00	40,25	0,00
Edificação 5	14,48	173,70	2515,18	38,90	64,66
Edificação 6	2,54	179,13	454,99	52,50	8,67
Edificação 7	0,00	105,63	0,00	39,60	0,00

Tabela 6.9: Estimativas da quantidade de calor diária a ser fornecida, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Inverno.

	Desconforto por Frio (Kh/dia)	$q = q_c + q_v$ (W/K)	Calor a ser Fornecido (Wh/dia)	Volume do Ambiente (m^3)	Calor a ser Fornecido por m^3 (Wh/ m^3 dia)
Edificação 1	34,58	89,94	3109,96	32,37	96,08
Edificação 2	101,78	58,54	5958,00	34,30	173,70
Edificação 3	70,1	96,70	6778,62	35,12	193,01
Edificação 4	165,27	98,70	16311,49	40,25	405,25
Edificação 5	25,66	173,70	4457,15	38,90	114,58
Edificação 6	27,84	179,13	4986,95	52,50	94,99
Edificação 7	41,97	105,63	4433,29	39,60	111,95

As estimativas da necessidade de aquecimento ou refrigeração para inverno são apresentadas na figura 6.23:

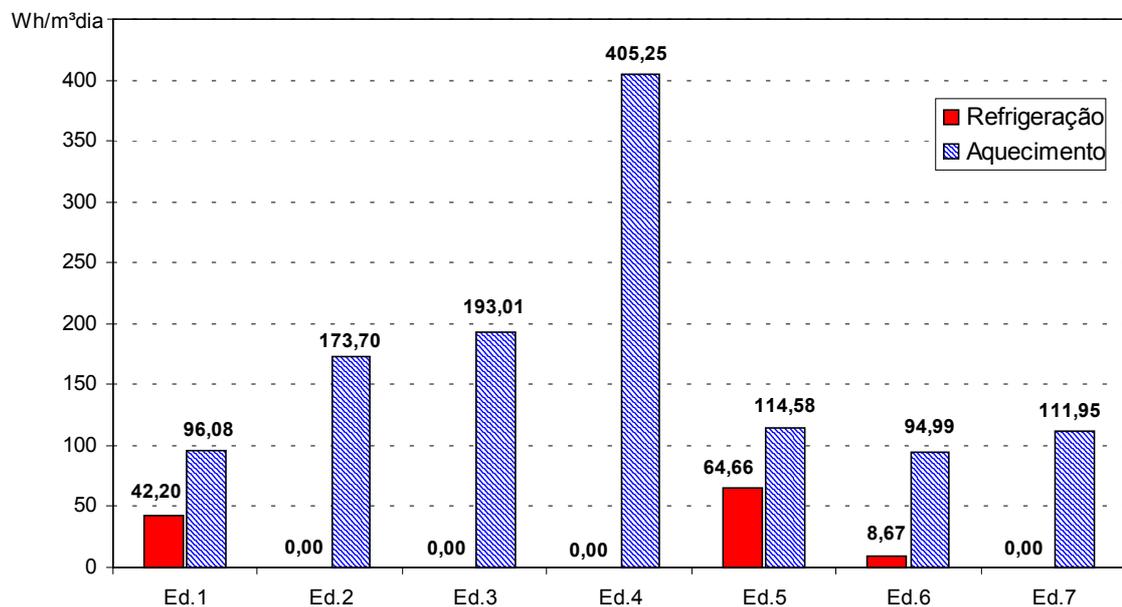


Figura 6.23: Estimativas da necessidade de Aquecimento e Refrigeração – Inverno.

Para um dia de inverno, a maior necessidade de aquecimento foi da edificação 4, seguida pela edificação 3. A edificação 6 apresentou a menor quantidade de calor necessária a ser fornecida ao ambiente para aquecimento, em torno de 95 Wh/m³dia. No caso específico da edificação 4, por apresentar sistema construtivo mais pesado que as demais edificações, com pequenas oscilações na temperatura interna, a quantidade de calor a ser acrescida ao ambiente deveria ser menor. No entanto, este ambiente apresentou temperaturas internas inferiores aos limites de conforto, no dia de referência de inverno (Figura 6.17). Este comportamento é resultado, principalmente, da falta de ocupação do ambiente e pouca incidência de radiação solar direta. A presença de pessoas e a utilização de equipamentos que produzem calor aumentam as temperaturas internas nas edificações e, para a edificação 4, poderiam dispensar a necessidade de aquecimento no inverno.

Mesmo no dia de referência de inverno, algumas edificações apresentaram desconforto por calor e, portanto, necessidade de refrigeração. A edificação 5 apresentou a maior quantidade de calor a ser retirada do ambiente, em torno de 65 Wh/m³dia, seguida pelas edificações 1 e 6. As demais edificações não apresentaram desconforto por calor nesse dia.

Para o dia de referência de verão, resultam os valores apresentados nas tabelas 6.10 e 6.11:

Tabela 6.10: Estimativas da quantidade de calor diária a ser retirada, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Verão.

	Desconforto por Calor (Kh/dia)	$q = qc + qv$ (W/K)	Calor a ser Retirado (Wh/dia)	Volume do Ambiente (m ³)	Calor a ser Retirado por m ³ (Wh/m ³ dia)
Edificação 1	88,93	89,94	7997,94	32,37	247,08
Edificação 2	20,86	58,54	1221,10	34,30	35,60
Edificação 3	26,25	96,70	2538,36	35,12	72,28
Edificação 4	0,37	98,70	36,52	40,25	0,91
Edificação 5	96,74	173,70	16803,78	38,90	431,97
Edificação 6	69,16	179,13	12388,56	52,50	235,97
Edificação 7	41,36	105,63	4368,86	39,60	110,32

Tabela 6.11: Estimativas da quantidade de calor diária a ser fornecida, para restabelecer o conforto térmico nos ambientes – Dia de Referência de Verão.

	Desconforto por Frio (Kh/dia)	$q = qc + qv$ (W/K)	Calor a ser Fornecido (Wh/dia)	Volume do Ambiente (m ³)	Calor a ser Fornecido por m ³ (Wh/m ³ dia)
Edificação 1	0,00	89,94	0,00	32,37	0,00
Edificação 2	0,00	58,54	0,00	34,30	0,00
Edificação 3	0,00	96,70	0,00	35,12	0,00
Edificação 4	5,95	98,70	287,24	40,25	14,59
Edificação 5	0,00	173,70	0,00	38,90	0,00
Edificação 6	0,00	179,13	0,00	52,50	0,00
Edificação 7	0,00	105,63	0,00	39,60	0,00

As estimativas da necessidade de aquecimento ou refrigeração, para verão, foram plotadas no gráfico da figura 6.24. Observa-se que a edificação 5 apresentou a maior necessidade de refrigeração, para o dia de referência de verão. Por apresentar cobertura de baixa resistência térmica, paredes delgadas e 2 fachadas totalmente expostas à radiação solar direta, esta edificação está sujeita a elevadas oscilações da temperatura interna, alcançando valores máximos próximos aos que ocorrem no exterior da edificação.

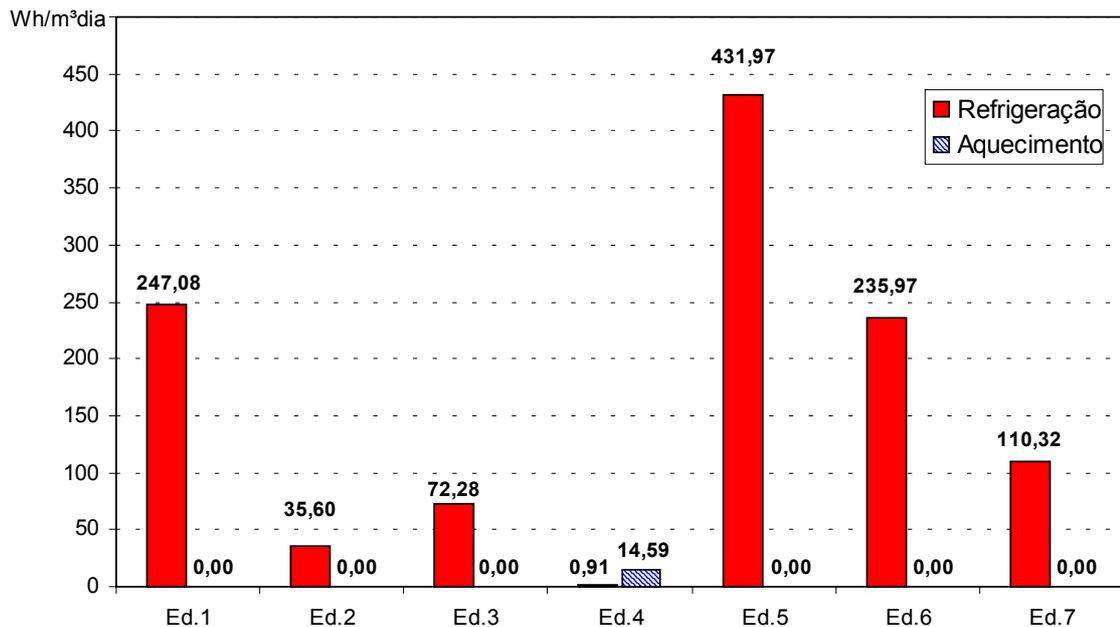


Figura 6.24: Estimativas da necessidade de Aquecimento e Refrigeração – Verão

A edificação 4 foi a única que apresentou desconforto por frio e, portanto, necessidade de aquecimento, para o dia típico de verão. No entanto, foi a edificação com menor consumo de energia para refrigeração. Como descrito anteriormente, a ocupação deste ambiente diminuiria a necessidade de aquecimento também no verão.

Analisando-se as médias mensais de temperatura, para a cidade de São Carlos, a partir dos dados da estação climatológica do CRHEA (item 6.1), verifica-se que as características representativas de inverno e verão não se repetem diversas vezes ao ano. Desta forma, a análise da necessidade de aquecimento e refrigeração, apenas para esses dois períodos, pode “mascarar” a necessidade anual de cada edificação. Portanto, optou-se por estimar a necessidade *anual* de aquecimento e refrigeração, apresentada a seguir.

6.2 Análise Anual

Para os demais meses do ano, o método adotado foi o mesmo que para os meses representativos de verão e inverno:

1) A partir dos dados de TBS coletados na estação climatológica do CRHEA, em 2002, escolheu-se um dia de referência para cada mês do ano (item 6.1.1);

2) As temperaturas internas de cada edificação foram ajustadas aos novos climas externos, representativos de cada mês (item 6.1.3);

3) Determinou-se a quantidade de graus-hora de desconforto por frio ou calor, para cada dia de referência, representativos de todos os meses do ano (item 6.1.4);

4) Para cada mês, calculou-se a quantidade de Graus-Dia de desconforto, inclusive para os meses representativos de verão e inverno;

5) Estimou-se a necessidade de aquecimento e refrigeração anual, para todas as edificações (item 6.1.5).

Entre as etapas descritas acima, apenas os dados obtidos nos itens 4 e 5 serão apresentados neste capítulo.

Na tabela 6.12, são apresentados os quantitativos de Graus-Dia de desconforto mensais, por calor e frio, para cada uma das edificações.

Tabela 6.12: Graus-dia de desconforto mensal e anual, por frio e calor, para os 12 meses do ano.

	Edificação 1		Edificação 2		Edificação 3		Edificação 4		Edificação 5		Edificação 6		Edificação 7	
	Calor	Frio	Calor	Frio	Calor	Frio	Calor	Frio	Calor	Frio	Calor	Frio	Calor	Frio
Janeiro [Kdia/mês]	79,39	0,00	26,28	0,21	31,28	0,00	1,80	9,36	83,54	0,00	58,00	0,00	45,30	0,00
Fevereiro	32,20	0,00	7,57	4,87	11,06	3,35	0,00	30,38	25,18	0,17	20,52	0,16	20,84	0,00
Março	101,44	0,00	29,38	0,20	35,30	0,00	2,02	10,87	109,32	0,00	79,00	0,00	51,91	0,00
Abril	66,07	0,00	11,45	14,05	17,12	2,18	0,00	41,54	68,10	0,00	39,95	0,00	33,25	0,00
Mai	39,58	5,32	1,47	47,12	2,32	21,61	0,00	94,90	35,79	8,24	14,56	8,08	14,83	0,00
Junho	17,16	21,56	0,00	78,36	0,00	47,79	0,00	136,54	8,48	19,17	3,44	19,69	0,00	20,47
Julho	19,63	33,31	0,00	124,01	0,00	75,46	0,00	221,82	18,70	29,25	3,28	30,00	0,00	34,35
Agosto	55,10	0,83	3,68	33,59	6,41	14,15	0,00	75,51	54,46	3,73	25,07	3,21	23,26	0,00
Setembro	56,68	0,19	4,69	29,05	8,31	11,52	0,00	68,08	56,36	2,37	27,54	1,87	25,31	0,00
Outubro	114,87	0,00	26,94	0,00	33,90	0,00	0,48	7,69	124,95	0,00	89,34	0,00	53,42	0,00
Novembro	84,01	0,00	21,57	4,60	27,37	0,00	0,18	22,53	89,19	0,00	59,52	0,00	43,63	0,00
Dezembro	96,52	0,00	36,69	0,00	41,51	0,00	11,76	0,55	103,24	0,00	78,58	0,00	55,02	0,00
ANUAL [Kdia/ano]	762,65	61,22	169,73	336,06	214,59	176,06	16,24	719,76	777,31	62,93	498,80	63,02	366,78	54,82
CALOR + FRIO ANUAL [Kdia/ano]	823,87		505,79		390,65		736,00		840,24		561,82		421,60	

Nas figuras 6.25 e 6.26 são apresentados os quantitativos de desconforto por frio e calor, em graus-dia mensais, para cada edificação.

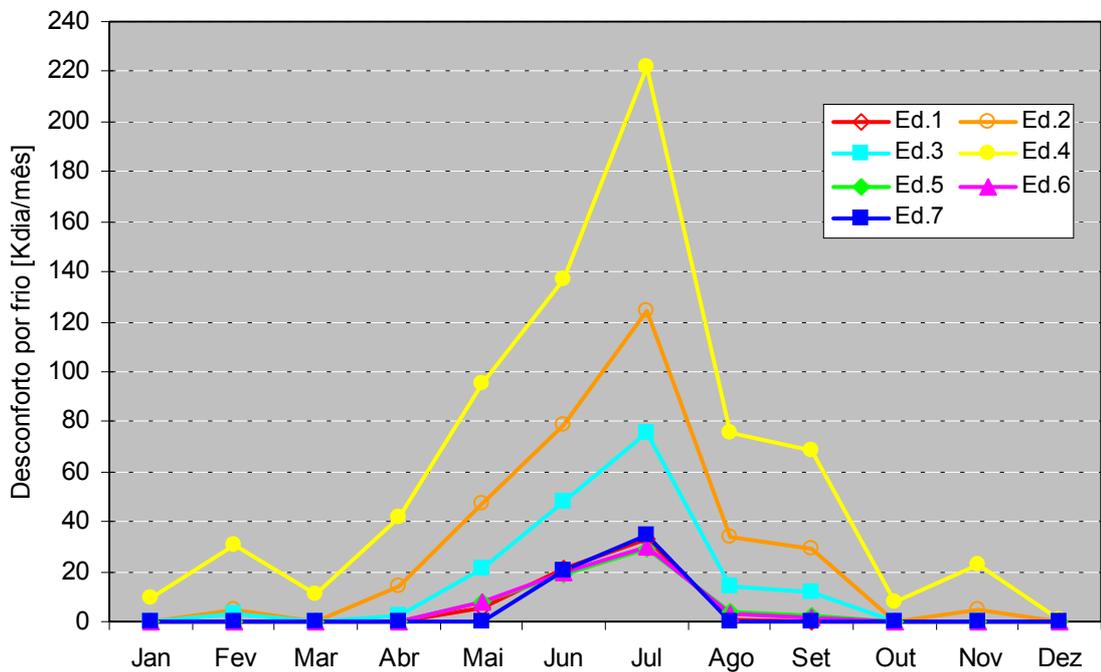


Figura 6.25: Graus-Dia de desconforto mensal por frio.

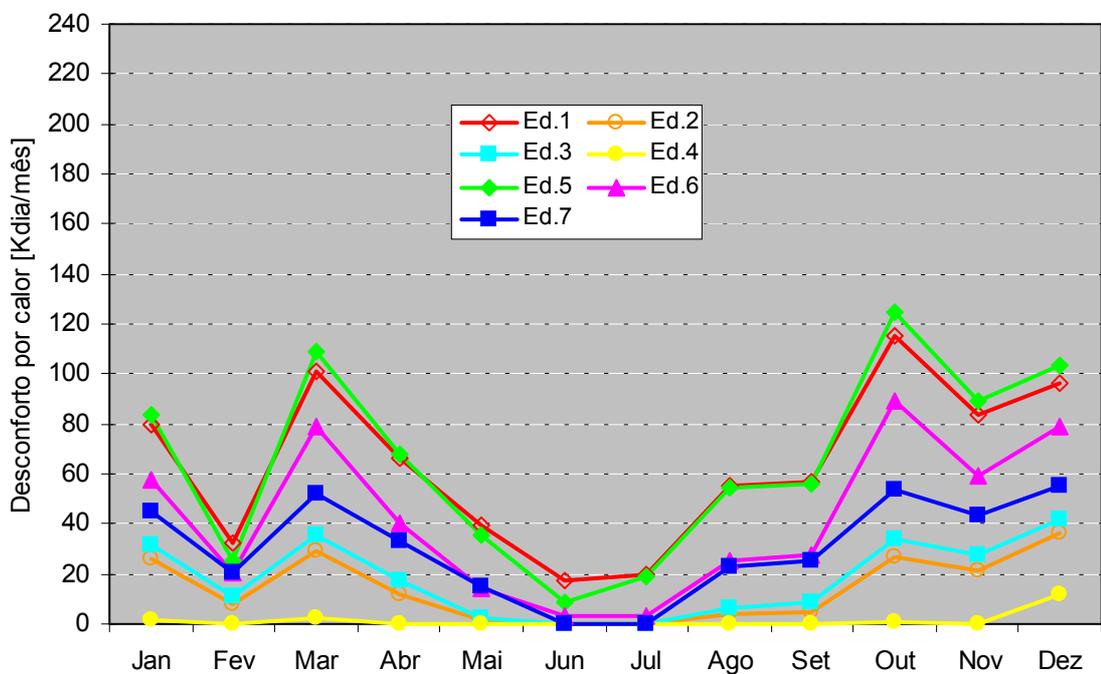
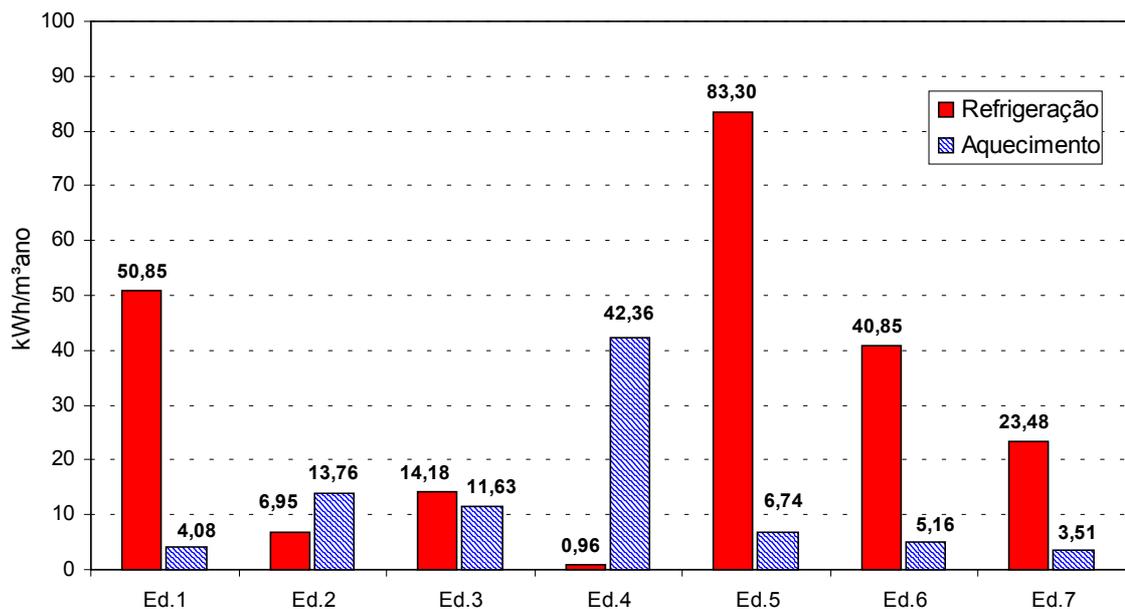


Figura 6.26: Graus-Dia de desconforto mensal por calor.

As estimativas anuais de necessidade de aquecimento e refrigeração estão reunidas na tabela 6.13 e nas figuras 6.27 e 6.28.

Tabela 6.13: Estimativas da necessidade anual de refrigeração e aquecimento para restabelecer o conforto térmico nos ambientes.

	Desconforto por Calor Anual (Kdia/ano)	Refrigeração Calor a ser Retirado por m ³ (kWh/m ³ ano)	Desconforto por Frio Anual (Kdia/ano)	Aquecimento Calor a ser Fornecido por m ³ (kWh/m ³ ano)	Aquecimento + Refrigeração Anual [kWh/m ³ ano]
Edificação 1	762,65	50,85	61,22	4,08	54,94
Edificação 2	169,73	6,95	336,06	13,76	20,72
Edificação 3	214,59	14,18	176,06	11,63	25,81
Edificação 4	16,24	0,96	719,76	42,36	43,32
Edificação 5	777,31	83,30	62,93	6,74	90,05
Edificação 6	498,80	40,85	63,02	5,16	46,01
Edificação 7	366,78	23,48	54,82	3,51	26,99

**Figura 6.27:** Estimativas da necessidade anual de refrigeração e aquecimento.

Com base nestes quantitativos, observa-se que a edificação 5 apresentou maior necessidade anual de energia para restabelecer o conforto no ambiente analisado. Nesta edificação, prevalece a necessidade de refrigeração, apesar de também requerer aquecimento em meses mais frios.

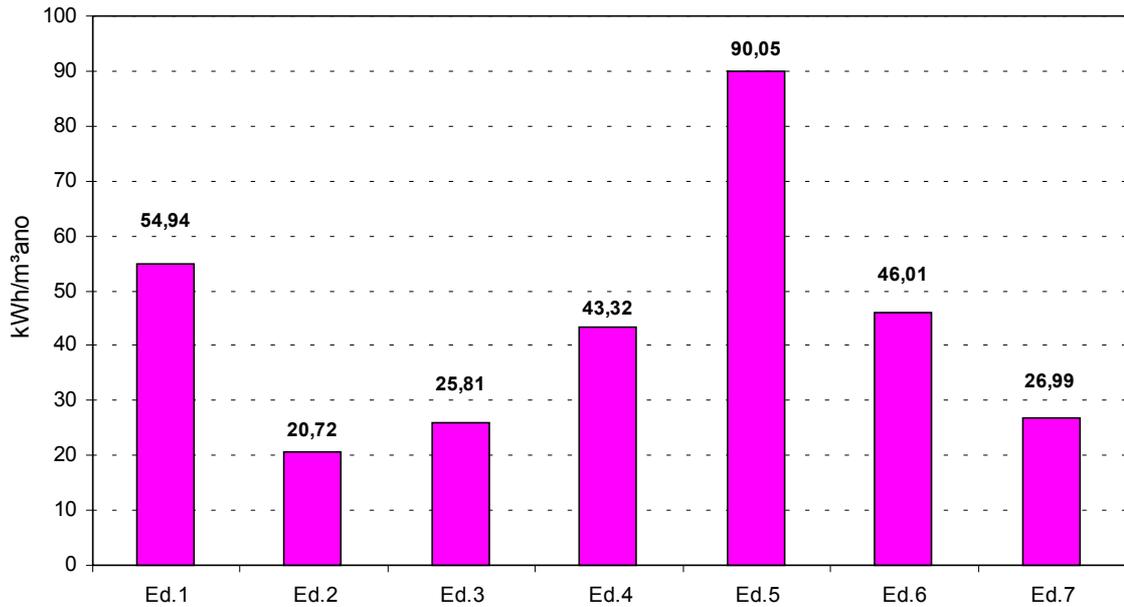


Figura 6.28: Quantidade anual de calor a ser retirado e fornecido aos ambientes .

As edificações 1 e 6 apresentaram elevados desconfortos por calor, ao longo de todo o ano. A edificação 2 foi a mais confortável, com pouca necessidade anual de refrigeração e aquecimento (em torno de 20 kWh/m³ano), seguida pelas edificações 3 e 7.

A edificação 4 apresentou a menor necessidade de refrigeração anual, entre todas as edificações analisadas. No entanto, sua necessidade de aquecimento foi a mais elevada em todos os meses do ano, o que aumentou a quantidade de energia anual necessária para restabelecer o conforto no ambiente analisado.

6.3 Classificação da Inércia Térmica das Edificações

Para classificar a inércia térmica das edificações, fez-se o cálculo do Fator de Resposta de cada ambiente monitorado, com base nos dados dos respectivos sistemas construtivos. Estas informações foram inseridas no programa computacional Arquitrop 5.0 e estão reunidas nas tabelas 6.15 a 6.21. A descrição dos símbolos e unidades de cada parâmetro está detalhada na Tabela 6.14.

Tabela 6.14: Legenda dos dados necessários ao cálculo do Fator de Resposta.

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDADE
<i>Ori</i>	Orientação	Graus (°)
m^2	Área	m^2
<i>U</i>	Transmitância Térmica	$W/(m^2K)$
$A \times U$	Produto $A \times U$	W/K
<i>F_s</i>	Fator de Calor Solar	-
<i>R_{se}</i>	Resistência Superficial Externa	$(m^2K)/W$
<i>Abs</i>	Absortância Superficial Externa	-
<i>F_s'</i>	Fator de Calor Solar Corrigido	-
<i>R_{trd}</i>	Retardamento ou Atraso Térmico	Horas (h)
<i>Amrt</i>	Amortecimento Térmico	-
<i>Y</i>	Admitância	$W/(m^2K)$
$A \times Y$	Produto $A \times Y$	W/K
<i>Imed</i>	Irradiância Solar (média sobre 24h)	W/m^2
<i>Q_s</i>	Carga Térmica Solar	W
<i>N</i>	Número de trocas de ar (renovações) por hora	1/h
<i>V</i>	Volume do Ambiente	m^3

Fonte: Adaptado de Szokolay (1987)

O número de trocas de ar por hora foi estimado a partir das recomendações descritas por Szokolay (1987).

Tabela 6.15: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 1.

Ambiente 1	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Taco sobre Laje Mista	--	11,56	1,3	15,03	--	0,05	--	--	4,5	0,62	1,7	19,65	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico 8 furos RVD 23	270	8,32	0,9	7,49	--	0,05	0,54	--	3,3	0,89	2,5	20,80	24,7	5,4
Vidro	Vidro	270	1,20	5,5	6,60	0,5	0,05	--	0,46	0,1	1,00	5,5	6,60	24,7	14,8
Fachada 2	Tijolo Cerâmico 8 furos RVD 23	360	9,52	0,9	8,57	--	0,05	0,72	--	3,3	0,89	2,5	23,80	38,4	12,9
Cobertura	Telha de Barro sobre Laje Mista	--	11,56	1,2	13,87	--	0,05	0,72	--	4,3	0,65	2,8	32,37	195,4	106,1
Parede Interna	Tijolo Cerâmico 8 furos RVD 23	--	19,04	1,1	20,94	--	0,12	--	--	1,7	0,97	2,0	38,08	--	--
N = 5		q_v = 53,41 W/m²K		q_c = Σ(A x U) = 36,53 W/m²K				q_a = Σ(A x Y) = 141,30 W/m²K							
V = 32,37 m³		Fator de Resposta (FR) = 2,16													

Tabela 6.16: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 2.

Ambiente 2	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Piso Cerâmico sobre Concreto	--	12,25	0,16	1,96	--	--	--	--	--	--	6,0	73,50	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	90	7,80	2,00	15,60	--	0,05	--	--	7,4	0,43	4,6	35,88	27,0	--
Elemento	Veneziana Metálica e Vidro	90	2,00	2,80	5,60	--	0,05	0,18	--	0,2	1,00	2,8	5,60	27,0	1,5
Cobertura	Telha de Barro sobre Laje Mista	--	12,25	1,20	14,70	--	0,05	0,72	--	4,3	0,65	2,8	34,30	195,4	112,4
Parede Interna	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 15	--	29,40	5,50	161,70	--	0,12	--	--	1,6	0,96	2,4	70,56	--	--
N = 2		q_v = 22,64 W/m²K		q_c = Σ(A x U) = 35,90 W/m²K				q_a = Σ(A x Y) = 219,84 W/m²K							
V = 34,30 m³		Fator de Resposta (FR) = 4,14													

Tabela 6.17: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 3.

Ambiente 3	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Madeira sobre Forro de Madeira	--	10,33	1,40	14,46	--	0,05	--	--	1,6	0,95	0,5	5,17	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	90	8,23	2,00	16,46	--	0,05	0,18	--	7,4	0,43	4,6	37,86	23,8	3,0
Elemento	Madeira	90	1,80	3,20	5,76	--	0,05	0,5	--	0,5	1,00	3,3	5,94	23,8	3,8
Cobertura	Telha de Barro e Forro Madeira	--	10,33	1,60	16,53	--	0,05	0,3	--	0,8	0,99	1,7	17,56	243,7	64,4
Parede Interna	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 15	--	33,83	5,50	186,07	--	0,12	--	--	1,6	0,96	2,4	81,19	--	--
N = 5		q_v = 57,95 W/m²K		q_c = ∑(A x U) = 38,75 W/m²K				q_a = ∑(A x Y) = 147,72 W/m²K							
V = 35,12 m³		Fator de Resposta (FR) = 2,13													

Tabela 6.18: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 4.

Ambiente 4	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Cimento Liso sobre Concreto		16,10	0,44	7,08	--	--	--	--	--	--	6,00	96,60	--	--
Fachada 1	Alvenaria de Pedra RVI 63	270	13,96	2,10	29,32	--	0,05	0,36	--	15,1	0,06	5,50	76,78	25,1	6,3
Vidro	Vidro	270	0,54	5,50	2,97	0,50	0,05	--	0,38	0,1	1,00	5,50	2,97	25,1	7,5
Cobertura	Laje Concreto e Forro Madeira		16,10	1,70	27,37	--	0,05	--	--	6,0	0,36	0,90	14,49	--	--
Parede Interna	Alvenaria de Pedra RVD 65		27,50	3,50	96,25	--	0,12	--	--	12,7	0,17	14,50	398,75	--	--
N = 5		q_v = 66,41 W/m²K		q_c = ∑(A x U) = 32,29 W/m²K				q_a = ∑(A x Y) = 589,59 W/m²K							
V = 40,25 m³		Fator de Resposta (FR) = 6,65													

Tabela 6.19: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 5.

Ambiente 5	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Piso Cerâmico sobre Concreto	--	14,96	1,00	14,96	--	--	--	--	--	--	6,0	89,76	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 13	360	9,94	2,80	27,83	--	0,05	0,18	--	3,8	0,76	4,3	42,74	21,3	6,4
Vidro	Vidro	360	1,50	5,50	8,25	0,50	0,05	--	0,46	0,1	1,00	5,5	8,25	21,3	6,4
Fachada 2	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 13	90	8,84	2,80	24,75	--	0,05	0,18	--	3,8	0,76	4,3	38,01	37,0	8,9
Fachada 3	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 13	270	8,84	2,80	24,75	--	0,05	0,18	--	3,8	0,76	4,3	38,01	35,4	8,5
Cobertura	Telha de Barro e Forro Madeira	--	14,96	1,60	23,94	--	0,05	0,60	--	0,8	0,99	1,7	25,43	317,3	246,5
Parede Interna	Tijolo Cerâmico 8 furos RVD 13	--	11,44	1,90	21,74	--	0,12	--	--	0,6	1,00	1,1	12,58	--	--
N = 5		q_v = 64,18 W/m²K		q_c = ∑(A x U) = 109,52 W/m²K				q_a = ∑(A x Y) = 254,79 W/m²K							
V = 38,90 m³		Fator de Resposta (FR) = 1,84													

Tabela 6.20: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 6.

Ambiente 6	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Piso Cerâmico sobre Laje Mista	--	15,00	1,50	22,50	--	0,05	--	--	4,5	0,60	2,8	42,00	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	360	9,00	2,00	18,00	--	0,05	0,36	--	7,4	0,43	4,6	41,40	38,8	14,0
Elemento	Veneziana de Madeira e Vidro	360	1,68	2,30	3,86	--	0,05	0,50	--	0,4	1,00	2,4	4,03	38,8	3,2
Fachada 2	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	270	17,50	2,00	35,00	--	0,05	0,36	--	7,4	0,43	4,6	80,50	30,2	20,8
Fachada 3	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	180	8,82	2,00	17,64	--	0,05	0,36	--	7,4	0,43	4,6	40,57	10,6	4,4
Cobertura	Telha de Barro sobre Laje Mista	--	15,00	1,20	18,00	--	0,05	0,72	--	4,3	0,65	2,8	42,00	241,6	170,2
Parede Interna	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 15	--	17,50	5,50	96,25	--	0,12	--	--	1,6	0,96	2,4	42,00	--	--
N = 5		q_v = 86,63 W/m²K		q_c = ∑(A x U) = 92,50 W/m²K				q_a = ∑(A x Y) = 292,50 W/m²K							
V = 52,50 m³		Fator de Resposta (FR) = 2,12													

Tabela 6.21: Cálculo do Fator de Resposta para a Edificação 7.

Ambiente 7	Componente	Ori	m ²	U	A x U	Fs	Rse	Abs	Fs'	Rtrd	Amrt	Y	A x Y	Imed	Qs
Piso	Madeira sobre Forro de Madeira	--	9,90	1,40	13,86	--	0,05	--	--	1,6	0,95	0,5	4,95	--	--
Fachada 1	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	90	10,50	2,00	21,00	--	0,05	0,54	--	7,4	0,43	4,6	48,30	25,0	14,8
Elemento	Veneziana de Madeira e Vidro	90	1,50	2,30	3,45	--	0,05	0,50	--	0,4	1,00	2,4	3,60	25,0	3,2
Cobertura	Telha de Barro e Forro Madeira	--	9,90	1,60	15,84	--	0,05	0,72	--	0,8	0,99	1,7	16,83	241,6	151,3
Parede Interna	Tijolo Cerâmico Maciço RVD 25	--	38,40	3,10	119,04	--	0,12	--	--	4,8	0,74	6,4	245,76	--	--
N = 5		q_v = 65,34 W/m²K		q_c = ∑(A x U) = 40,29 W/m²K				q_a = ∑(A x Y) = 319,44W/m²K							
V = 39,60 m³		Fator de Resposta (FR) = 3,64													

A classificação da inércia térmica das edificações, conforme intervalos apresentados na tabela 3.2, está resumida a seguir:

Tabela 6.22: Classificação da inércia térmica das edificações a partir do Fator de Resposta.

EDIFICAÇÃO	FATOR DE RESPOSTA	CLASSIFICAÇÃO DA CONSTRUÇÃO	CLASSIFICAÇÃO DA INÉRCIA TÉRMICA
Edificação 1	2,16	Construção Leve	Inércia Baixa
Edificação 2	4,14	Construção Média	Inércia Média
Edificação 3	2,13	Construção Leve	Inércia Baixa
Edificação 4	6,65	Construção Pesada	Inércia Alta
Edificação 5	1,84	Construção Leve	Inércia Baixa
Edificação 6	2,12	Construção Leve	Inércia Baixa
Edificação 7	3,64	Construção Média	Inércia Média

6.4 Comportamento Térmico das Edificações

Tabela 6.23: Parâmetros de caracterização do comportamento térmico das edificações.

EDIFICAÇÃO	Coeficiente de Amortecimento Térmico [$\mu = A_{Int}/A_{Ext}$]	Refrigeração Calor a ser Retirado por m^3 (kWh/ m^3 ano)	Aquecimento Calor a ser Fornecido por m^3 (kWh/ m^3 ano)	Aquecimento + Refrigeração Anual [kWh/ m^3 ano]	Classificação da Inércia Térmica
Edificação 1	46,45%	50,85	4,08	54,94	Baixa
Edificação 2	25,68%	6,95	13,76	20,72	Média
Edificação 3	22,62%	14,18	11,63	25,81	Baixa
Edificação 4	17,48%	0,96	42,36	43,32	Alta
Edificação 5	58,96%	83,30	6,74	90,05	Baixa
Edificação 6	45,95%	40,85	5,16	46,01	Baixa
Edificação 7	3,79%	23,48	3,51	26,99	Média

A partir dos parâmetros de caracterização dos ambientes monitorados, apresentados na Tabela 6.23, algumas considerações podem ser feitas acerca do comportamento térmico de cada edificação:

- A edificação 4 é a de maior inércia térmica, de acordo com a classificação apresentada por Szokolay (1987). Esta edificação apresentou coeficiente de amortecimento térmico baixo, ou seja, ocorre pequena variação das temperaturas internas, com relação às externas. A necessidade de refrigeração anual é muito pequena (apenas 0,96 kWh/ m^3 ano). No entanto, o desconforto por frio em todos os meses foi bastante elevado, representando grande necessidade de aquecimento anual (42,36 kWh/ m^3 ano).
- A edificação 5 foi classificada como de baixa inércia térmica. Apresentou coeficiente de amortecimento térmico alto (58,96%), com elevadas oscilações de temperatura interna, em relação à externa. Foi a edificação que apresentou maior necessidade anual de refrigeração e aquecimento (90 kWh/ m^3 ano), sendo desconfortável tanto em períodos de verão quanto inverno.
- As edificações 1 e 6 foram classificadas como construções leves, de baixa inércia térmica. Apresentaram coeficiente de amortecimento térmico em torno de 46% e grande desconforto por calor, mesmo nos meses mais frios. Apresentaram pouca necessidade de aquecimento, quando comparadas com as demais edificações.

- Mesmo classificada como de baixa inércia térmica, a edificação 3 apresentou pequenas oscilações das temperaturas, com amortecimento térmico de 22,62%. A necessidade anual de refrigeração e aquecimento esteve entre as 3 menores (em torno de 25 kWh/m³ano).
- A edificação 2 foi classificada como de inércia média. Apresentou coeficiente de amortecimento térmico em torno de 26% e maior desconforto por frio (necessidade de aquecimento).
- Também classificada como de inércia média, a edificação 7 teve pequenas oscilações da temperatura interna, com coeficiente de amortecimento térmico de 3,79%. No entanto, apresentou elevado desconforto por calor, com necessidade anual de refrigeração de 26,99%.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES

"Você não pode provar uma definição. O que você pode fazer é mostrar que ela faz sentido".

Albert Einstein

7. CONCLUSÕES

De acordo com o projeto de norma da ABNT (2003c), a cidade de São Carlos está localizada na Zona Bioclimática 4. Entre as estratégias de condicionamento térmico passivo recomendadas para esta zona, está a utilização de paredes pesadas, de alta inércia térmica, tanto para resfriamento como aquecimento de edificações.

Na revisão bibliográfica, foram citados diversos estudos sobre o uso da inércia térmica como estratégia bioclimática. Estes estudos comprovaram a eficácia desta estratégia sobre as condições de conforto térmico em edificações e sobre a redução da necessidade de aquecimento e refrigeração artificial. Também se observou que os benefícios resultantes da utilização da inércia térmica dependem de diversos aspectos. Entre eles, destacam-se: o clima em que a edificação está inserida, a oscilação das temperaturas externas entre dia e noite, a configuração do material na parede (ordem das camadas), orientação de fachadas e taxa de ventilação dos ambientes.

Neste trabalho, investigou-se o uso de inércia térmica em edificações localizadas na cidade de São Carlos (SP), cujo clima pode ser caracterizado como semi-úmido, ou seja, apresenta verão quente e úmido e inverno frio e seco.

As temperaturas do ar, no interior e exterior de ambientes de sete edificações, foram monitoradas entre setembro de 2002 e março de 2003, em quatro diferentes períodos. Essas edificações foram escolhidas por apresentarem diferenças entre os respectivos sistemas construtivos.

As principais características das edificações analisadas estão reunidas na tabela 4.5, no capítulo 4. Algumas diferenças observadas entre as edificações dificultaram a análise das influências reais da inércia térmica. Entre essas diferenças, destacam-se as características relacionadas às fachadas: orientação, sombreamento, cor da superfície externa e área de aberturas.

Para se isolar a interferência de algumas variáveis que influenciam nas oscilações da temperatura interna (ocupação, taxa de ventilação e utilização de equipamentos que produzem calor), os ambientes permaneceram fechados e sem ocupação durante os períodos de medições e os sensores de temperatura do ar foram protegidos contra a influência de radiações térmicas.

O primeiro período de medições ocorreu entre 15 e 22 de setembro de 2002. Neste período, foram monitoradas as temperaturas internas e externas nas edificações 1 e 2. No segundo período de medições, entre 28 de setembro e 08 de outubro de 2002, monitorou-se as temperaturas nas edificações 3 e 4. No terceiro período, entre 02 e 07 de novembro de 2002, apenas na edificação 5. E por último, entre 18 e 26 de março de 2003, foram monitoradas as temperaturas do ar nas edificações 6 e 7.

Para a avaliação do desempenho térmico de edificações por meio de medição, o projeto de norma da ABNT (2002) recomenda que o dia tomado para análise deve ser um dia típico de projeto, de verão ou inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. Assim, para cada período de medições, escolheu-se um dia típico, chamado de “dia de referência”, a partir de uma seqüência de três dias de monitoramento com comportamento homogêneo.

Devido às diferenças registradas entre os climas externos de cada local monitorado, adotou-se um método que permite comparar o comportamento de cada ambiente monitorado, frente a condições semelhantes de clima externo. Para isso, considerando-se o dia de referência de cada edificação, obteve-se a relação entre as temperaturas interna e externa, de hora em hora. Esta relação é um indicador da capacidade de amortecimento térmico dos ambientes e foi utilizada no ajuste das temperaturas internas para diferentes climas externos.

Inicialmente, a análise foi feita para períodos de inverno e verão. Os meses representativos destes períodos foram determinados a partir de dados coletados na estação climatológica do CRHEA (2003), durante o ano de 2002. Para inverno, julho foi o mês representativo deste período e para verão, adotou-se o mês de Outubro. Para esses meses, também foram escolhidos dias de referência, utilizando-se o mesmo método adotado para cada edificação.

Após o ajuste das temperaturas internas de cada ambiente aos climas externos dos dias de referência de inverno e verão, analisou-se o comportamento térmico de cada edificação, quando submetidas ao clima externo dos referidos períodos. Foram determinados o atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas,

as amplitudes térmicas diárias e os respectivos coeficientes de amortecimento térmico. Considerando-se os limites de conforto indicados nas Planilhas de Mahoney, adaptadas ao clima de São Carlos no ano de 2002, calculou-se o desconforto por frio e calor, acumulados ao longo dos dias de referência, em cada edificação. Com base nestes dados, estimou-se a necessidade de aquecimento e refrigeração para restabelecer o conforto térmico nos ambientes, durante períodos de inverno e verão.

Para se evitar que essas estimativas sejam generalizadas para todos os meses do ano, estimou-se a necessidade anual de refrigeração e aquecimento, de acordo com os quantitativos de graus-dia mensais e anual. Esta análise foi adotada porque as características representativas de inverno e verão não se repetem ao longo de todo o ano. A análise apenas para esses meses pode “mascarar” o desconforto anual de cada edificação e as respectivas necessidades anuais de climatização. O método adotado para a análise anual foi o mesmo que para os meses representativos de verão e inverno.

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar, através de medições e análise de temperaturas internas e externas, o desempenho térmico de edificações que apresentassem diferentes sistemas construtivos, com diferentes inércias térmicas, localizadas na cidade de São Carlos. A classificação da inércia térmica foi feita através do cálculo do Fator de Resposta de cada ambiente analisado, conforme descrito no item 3.6.

As diversas formas de análise demonstraram que apenas a utilização da inércia térmica não é suficiente para oferecer condições de conforto térmico nos ambientes, quando submetidos ao clima da cidade de São Carlos.

A edificação 4, de alta inércia térmica, apresentou desconforto por calor muito pequeno ao longo de todo o ano, o que justifica mínima necessidade de refrigeração. No entanto, em períodos mais frios, a necessidade de aquecimento foi muito alta para restabelecer o conforto térmico no ambiente. A edificação 2, de média inércia térmica, também apresentou elevado desconforto por frio ao longo de quase todo o ano, com exceção dos meses de outubro e dezembro. E foi a segunda edificação com menor necessidade de refrigeração anual, depois da edificação 4. Para as duas edificações, o sombreamento das fachadas impede o aquecimento em meses mais frios. Neste caso, além do uso da inércia térmica, recomenda-se a utilização de aquecimento solar passivo e ventilação seletiva durante as horas mais quentes do dia, minimizando a necessidade de sistemas artificiais de aquecimento.

Na edificação 7, classificada como de média inércia térmica, o aquecimento solar passivo melhora o seu desempenho térmico. A fachada deste ambiente, de orientação leste, recebe incidência de radiação solar direta, pois não é sombreada. Desta forma, o desconforto por frio é minimizado durante todo o ano. Apesar do ambiente amortecer quase 96% da oscilação das temperaturas externas, o ambiente permanece com temperaturas elevadas durante a noite, devido ao ganho de calor diário. Para garantir o conforto em períodos mais quentes, a utilização da ventilação seletiva no período noturno minimizaria a necessidade de refrigeração artificial.

Pelos resultados obtidos para as edificações 1, 5 e 6, de baixa inércia térmica, percebe-se as desvantagens no uso de sistemas construtivos de pouca inércia térmica, tanto para período quente quanto para período frio. Estas edificações apresentaram os maiores desconfortos anuais, considerando-se necessidade total de refrigeração e aquecimento. Nos meses mais quentes, a necessidade de refrigeração, para essas edificações, ocorre tanto no período diurno quanto noturno. Nos meses mais frios, além da necessidade de aquecimento durante a manhã, pois perdem rapidamente o calor absorvido ao longo do dia, são desconfortáveis por calor à noite. Isto porque os respectivos sistemas construtivos absorvem rapidamente o calor transmitido pela incidência de radiação solar direta. Nestes casos, além das construções apresentarem baixa inércia térmica, as fachadas são totalmente expostas à incidência de radiação solar, sem nenhum tipo de sombreamento em meses mais quentes. O sombreamento das aberturas, combinado com a utilização de ventilação seletiva, pode minimizar a necessidade de aquecimento nestas edificações.

Com base nestas análises, algumas recomendações são feitas para projetos que adotem o uso de inércia térmica em edificações na cidade de São Carlos, ou em outras cidades que apresentem climas com características semelhantes ao estudado:

- Durante os meses mais frios, o uso de inércia térmica só apresentará bons resultados quando combinado com aquecimento solar passivo e ventilação seletiva. A ventilação deve ser feita permitindo as trocas de ar nas horas mais quentes do dia e evitando a perda de calor durante o período noturno. Estas estratégias minimizam o desconforto por frio e a necessidade de aquecimento artificial em épocas mais frias.

- Nos meses mais quentes, a elevada inércia térmica reduz as oscilações das temperaturas internas e diminui os valores de temperaturas máximas no interior dos ambientes. Para otimizar o desempenho térmico de edificações com alta inércia

térmica, o sombreamento de fachadas e aberturas, durante esses períodos, reduz os ganhos de calor interno. A ventilação seletiva também é fundamental nos meses de maior desconforto por calor. Durante o período noturno, quando as temperaturas externas são menores que as internas, a ventilação permite trocas de ar, reduzindo as temperaturas internas para valores mais próximos ao intervalo de conforto. Durante o dia, quando a temperatura externa é superior à interna, deve-se evitar as trocas de ar com o exterior, para que o ar interno não se aqueça rapidamente. Estas estratégias ajudam a minimizar o desconforto por calor e a necessidade de refrigeração artificial.

- Além das estratégias citadas anteriormente, o uso da inércia térmica deve considerar as variáveis associadas ao projeto da edificação, tais como orientação de fachadas, propriedades termofísicas dos materiais, ordem das camadas de fechamentos verticais e horizontais e cor de superfícies externas.

Algumas limitações durante a realização deste trabalho dificultaram a análise dos efeitos específicos da inércia térmica, devido à falta ou interferência de alguns parâmetros. Neste sentido, sugere-se para trabalhos futuros:

- Isolar as diversas variáveis que interferem nas variações das temperaturas internas, tais como: orientação, cor das superfícies externas, dimensão dos ambientes, sombreamento, taxa de ventilação e área de aberturas na fachada.

- Obter dados de ventilação dos ambientes, mesmo que permaneçam fechados durante os monitoramentos. A taxa de ventilação exerce grande influência sobre as oscilações das temperaturas internas e é fundamental para a classificação da inércia térmica de edificações, através do Fator de Resposta.

- Analisar o atraso térmico de temperaturas máximas e mínimas, considerando-se a variação das temperaturas do ar de dias anteriores ao analisado.

- Considerar flutuações horárias nos limites de conforto, supondo que as temperaturas de conforto acompanhem a oscilação horária da temperatura exterior.

Esta pesquisa procurou contribuir com as áreas de conforto térmico e eficiência energética de edificações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

"Livros não mudam o mundo, quem muda o mundo são as pessoas. Os livros só mudam as pessoas".

Mário Quintana

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUTSU, M.; VITTORINO, F. A tendência atual dos métodos de avaliação do desempenho térmico e energético de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador, 1997. 1 CD-ROM.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de norma 02:136.01-001**: desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos - Parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **Projeto de Norma 02:135.07-001**: desempenho térmico de edificações - Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003a.

_____. **Projeto de Norma 02:135.07-002**: desempenho térmico de edificações - Parte 2: métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2003b.

_____. **Projeto de Norma 02:135.07-003**: desempenho térmico de edificações - Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2003c.

BRASIL. Departamento Nacional de Meteorologia. Secretaria Nacional de Irrigação. Ministério de Agricultura e Reforma Agrária. **Normais Climatológicas (1961-1990)**, Brasília, DF, 1992.

CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ECOLOGIA APLICADA (CRHEA). **Dados climatológicos**: janeiro a dezembro de 2002. Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2003.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**: Conforto Ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

PEÑA GONZÁLEZ, A. M. La arquitectura bioclimática: Un nuevo paradigma? In: CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 1., 1998, Caracas, Venezuela. **Anais...** Caracas, 1998.

DORNELLES, K. A.; RORIZ, M. Inércia térmica, conforto e consumo de energia em edificações na cidade de São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2003.

ELETOBRÁS. **Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. 1999. Disponível em: <<http://www.eletobras.gov.br/procel>>. Acesso em: 30 ago. 2002

EVANS, J. M. From meteorological data to bioclimatic design – 30 years of the Mahoney Tables. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 16, 1999, Brisbane. **Anais...** Brisbane, 1999. 1 CD-ROM.

_____. Técnicas bioclimáticas de diseño: las 'Tablas de Mahoney' y los 'Triángulos de Confort'. CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 2., 2000, Maracaibo, Venezuela. **Anais...** Maracaibo, 2000.

EVANS, J. M.; SHILLER, S. **Diseño bioambiental y arquitectura solar**. Buenos Aires: EUDEBA, 1986.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 1995.

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

_____. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, p.11-23, 1992.

_____. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley & Sons, 1994.

_____. **Climate considerations in building and urban design**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1998.

GONZÁLEZ CRUZ, E. M. Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática. **Estudios de Arquitectura Bioclimática**, México, Anuário 2002, v.IV, p. 117-134, 2002.

IZARD, J. L. **Architectures d'été: construire pour le confort d'été**. Provence: Edisud, 1993.

IZARD, J. L.; GUYOT, A. **Arquitectura bioclimática**. México: Gustavo Gili, 1983.

KALOGIROU, S. A.; FLORIDES, G.; TASSOU, S. Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus. **Renewable Energy**, v.27, p.353-368, 2002.

KOENIGSBERGER, O. H.; MAHONEY, C.; EVANS, J. M. **Climate and house design of low-cost housing and community facilities**. New York: United Nations, 1971.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Manual of tropical housing and building**. London: Longmans, 1974. Part 1: Climatic Design.

KOENIGSBERGER, O. H. et al. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales**. Madrid: Paraninfo, 1977.

KOSNY, J. et al. **Thermal mass: energy savings potential in residential buildings**. Artigo publicado pelo Laboratório Nacional de Oak Ridge, 2001. Disponível em: <http://www.ornl.gov/roofs+walls/research/detailed_papers/thermal/banner.html>. Acesso em: 05 jul. 2002.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LAMBERTS, R.; GHISI, E; PAPST, A. L. **Desempenho térmico de edificações**. UFSC, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Núcleo de Pesquisa em Construção, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2000. Apostila. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/graduacao>>. Acesso em: 16 jun. 2002.

LAVIGNE, P. **Architecture climatique: une contribution au développement durable**. France: Bases et approche physique, Tome 1, 1994.

_____. Indicadores expressivos das aptidões naturais para o conforto térmico e conceitos necessários à concepção arquitetônica. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2001, São Pedro, SP, Brasil. **Anais...** São Pedro, 2001.

LOMBARDO, M. A. **Ilhas de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec – Lalekla, 1985.

NÓREN, A. et al. The effect of thermal inertia on energy requirement in a Swedish building: results obtained with three calculation models. **International Journal of Low Energy and Sustainable Building**, v.1, p. 1-16, 1999.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Thermal mass integrated into passive solar homes**. Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. Folheto Técnico, n.128, 2000. Disponível em: <<http://www.cenergia.org.pe/spain/pdfs/opet/ER128.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2002.

OLGYAY, V.; OLGAY, A. **Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism**. New Jersey: Princeton University Press, 1963.

PAPST, A. L. **Uso de inércia térmica no clima subtropical: estudo de caso em Florianópolis, SC**. 1999. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1999.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. Porto Alegre: Luzzatto, 1985.

RORIZ, M. **Conforto térmico**. São Carlos: UFSCar, Departamento de Engenharia Civil, 1995. Apostila.

_____. **Conforto térmico em edificações: um modelo matemático e uma aplicação**. 1996. 185f. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

_____. **Efeitos da inércia térmica sobre o consumo de energia e as temperaturas internas de edificações submetidas ao clima semi-úmido no interior do estado de São Paulo**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, 2001a. Relatório de Pesquisa.

_____. Consumo de energia no condicionamento térmico de edificações: um método de avaliação. ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2001, São Pedro, SP, Brasil. **Anais...** São Pedro, 2001b.

_____. Flutuações horárias dos limites de conforto térmico: uma hipótese de modelo adaptativo. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E

DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3., 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2003.

SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I. G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy. **Renewable Energy**, n.24, p.445-452, 2001.

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

SZOKOLAY, S. V. **Archipak – Version 3.2**: a suite of programs for the thermal design of buildings and solar systems. Architectural Science Unit, University of Queensland, St. Lucia, Australia, 1990.

WILSON, A. Thermal Mass and R-Value. **Environmental Building News**, v.7, n.4, 1998. Disponível em: <http://www.buildinggreen.com/features/tm/thermal.html>. Acesso em: 15 ago. 2002.

YÁÑEZ, G. **Energía solar, edificación y clima**. Madrid: Ministerio de Obras Publicas y Urbanismo, 1982. v.1.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TEMPERATURAS INTERNAS INVERNO E VERÃO

A.1 – PERÍODO DE INVERNO

A.2 – PERÍODO DE VERÃO

APÊNDICE B – PLANILHAS DE MAHONEY PARA SÃO CARLOS

Apêndice A – Temperaturas Internas – Inverno e Verão

A.1 – Período de Inverno

As temperaturas internas de cada edificação foram ajustadas ao clima externo do dia de referência de inverno, com base nos valores horários de FTI_h (Eq. 3.1) e calculadas a partir da equação 3.2.

EDIFICAÇÃO 1 - Inverno

Dia de Referência Ed.1 (19/09/2002)		Text de Inverno		Fator de Variação	Tint Ed.1
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI_h	
00:00	23,16	28,20	13,00	0,705397987	23,58
01:00	21,63	27,81	12,27	0,669716377	22,87
02:00	20,87	27,41	12,10	0,633119854	22,14
03:00	20,49	27,02	11,56	0,597438243	21,43
04:00	22,01	26,63	11,25	0,561756633	20,72
05:00	22,01	26,24	9,55	0,526075023	20,01
06:00	21,63	25,85	10,58	0,490393413	19,30
07:00	21,63	25,46	9,89	0,454711802	18,59
08:00	22,39	25,46	10,69	0,454711802	18,59
09:00	22,78	25,08	13,74	0,419945105	17,90
10:00	24,31	25,08	20,03	0,419945105	17,90
11:00	26,64	25,46	25,20	0,454711802	18,59
12:00	29,00	25,85	26,59	0,490393413	19,30
13:00	30,61	26,24	27,91	0,526075023	20,01
14:00	31,42	27,41	28,88	0,633119854	22,14
15:00	31,01	28,20	29,44	0,705397987	23,58
16:00	30,61	29,39	29,21	0,814272644	25,75
17:00	29,80	29,79	28,74	0,850869167	26,47
18:00	29,00	30,19	25,98	0,887465691	27,20
19:00	27,82	30,19	22,47	0,887465691	27,20
20:00	26,64	29,79	18,74	0,850869167	26,47
21:00	25,86	29,79	17,31	0,850869167	26,47
22:00	25,86	29,39	15,81	0,814272644	25,75
23:00	25,09	28,99	15,75	0,777676121	25,02
TBS mín.	20,49	25,08	9,55	---	17,90
TBS máx.	31,42	30,19	29,44	---	27,20
Amplitude	10,93	5,11	19,89	---	9,30

EDIFICAÇÃO 2 - Inverno

Dia de Referência Ed.2 (19/09/2002)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.2
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	22,34	25,15	13,00	0,382171227	17,15
01:00	21,20	24,91	12,27	0,360988526	16,73
02:00	21,58	24,66	12,10	0,338923213	16,29
03:00	20,82	24,42	11,56	0,317740512	15,87
04:00	21,58	24,21	11,25	0,299205649	15,50
05:00	21,20	23,94	9,55	0,275375110	15,03
06:00	20,82	23,72	10,58	0,255957635	14,64
07:00	20,82	23,53	9,89	0,239187996	14,31
08:00	22,34	23,36	10,69	0,224183583	14,01
09:00	24,26	23,31	13,74	0,219770521	13,92
10:00	26,19	23,43	20,03	0,230361871	14,13
11:00	28,54	23,70	25,20	0,254192410	14,61
12:00	29,73	23,99	26,59	0,279788173	15,11
13:00	30,94	24,33	27,91	0,309796999	15,71
14:00	32,15	24,69	28,88	0,341571050	16,34
15:00	32,15	25,10	29,44	0,377758164	17,06
16:00	31,34	25,49	29,21	0,412180053	17,75
17:00	30,13	25,80	28,74	0,439541041	18,29
18:00	28,94	26,02	25,98	0,458958517	18,68
19:00	26,97	26,17	22,47	0,472197705	18,94
20:00	26,19	26,22	18,74	0,476610768	19,03
21:00	25,42	26,22	17,31	0,476610768	19,03
22:00	25,03	26,14	15,81	0,469549868	18,89
23:00	24,26	26,05	15,75	0,461606355	18,73
TBS mín.	20,82	23,31	9,55	---	13,92
TBS máx.	32,15	26,22	29,44	---	19,03
Amplitude	11,33	2,91	19,89	---	5,11

EDIFICAÇÃO 3 - Inverno

Dia de Referência Ed.3 (03/10/2002)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.3
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	25,23	26,56	13,00	0,467517401	18,85
01:00	24,45	26,17	12,27	0,422273782	17,95
02:00	23,68	25,78	12,10	0,377030162	17,05
03:00	23,30	25,78	11,56	0,377030162	17,05
04:00	22,92	25,39	11,25	0,331786543	16,15
05:00	22,53	25,39	9,55	0,331786543	16,15
06:00	22,92	25,39	10,58	0,331786543	16,15
07:00	23,30	25,39	9,89	0,331786543	16,15
08:00	24,07	25,39	10,69	0,331786543	16,15
09:00	24,84	25,39	13,74	0,331786543	16,15
10:00	25,61	25,39	20,03	0,331786543	16,15
11:00	27,17	25,39	25,20	0,331786543	16,15
12:00	28,35	25,78	26,59	0,377030162	17,05
13:00	29,94	26,56	27,91	0,467517401	18,85
14:00	31,15	26,95	28,88	0,512761021	19,75
15:00	30,34	27,34	29,44	0,558004640	20,65
16:00	30,34	27,34	29,21	0,558004640	20,65
17:00	30,34	27,34	28,74	0,558004640	20,65
18:00	28,75	27,34	25,98	0,558004640	20,65
19:00	26,39	27,34	22,47	0,558004640	20,65
20:00	26,00	26,95	18,74	0,512761021	19,75
21:00	25,61	26,95	17,31	0,512761021	19,75
22:00	25,23	26,56	15,81	0,467517401	18,85
23:00	25,61	26,56	15,75	0,467517401	18,85
TBS mín.	22,53	25,39	9,55	---	16,15
TBS máx.	31,15	27,34	29,44	---	20,65
Amplitude	8,62	1,95	19,89	---	4,50

EDIFICAÇÃO 4 - Inverno

Dia de Referência Ed.4 (06/10/2002)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.4
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	25,46	24,60	13,00	0,123130035	12,00
01:00	25,08	24,60	12,27	0,123130035	12,00
02:00	24,30	24,60	12,10	0,123130035	12,00
03:00	23,92	24,60	11,56	0,123130035	12,00
04:00	23,53	24,60	11,25	0,123130035	12,00
05:00	23,53	24,60	9,55	0,123130035	12,00
06:00	23,53	24,60	10,58	0,123130035	12,00
07:00	23,53	24,60	9,89	0,123130035	12,00
08:00	24,30	24,60	10,69	0,123130035	12,00
09:00	25,46	24,60	13,74	0,123130035	12,00
10:00	27,02	24,99	20,03	0,168009206	12,89
11:00	28,99	24,99	25,20	0,168009206	12,89
12:00	29,79	25,37	26,59	0,211737629	13,76
13:00	30,60	25,37	27,91	0,211737629	13,76
14:00	31,41	25,37	28,88	0,211737629	13,76
15:00	32,22	25,76	29,44	0,256616801	14,65
16:00	31,81	25,76	29,21	0,256616801	14,65
17:00	30,60	25,76	28,74	0,256616801	14,65
18:00	28,99	26,15	25,98	0,301495972	15,55
19:00	26,24	25,76	22,47	0,256616801	14,65
20:00	25,85	25,37	18,74	0,211737629	13,76
21:00	25,46	25,37	17,31	0,211737629	13,76
22:00	25,46	25,37	15,81	0,211737629	13,76
23:00	25,46	25,37	15,75	0,211737629	13,76
TBS mín.	23,53	24,60	9,55	---	12,00
TBS máx.	32,22	26,15	29,44	---	15,55
Amplitude	8,69	1,55	19,89	---	3,55

EDIFICAÇÃO 5 - Inverno

Dia de Referência Ed.5 (07/11/2002)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.5
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	15,14	21,39	13,00	0,597593583	21,44
01:00	14,76	20,63	12,27	0,546791444	20,43
02:00	13,99	20,25	12,10	0,521390374	19,92
03:00	13,61	19,86	11,56	0,495320856	19,40
04:00	13,22	19,48	11,25	0,469919786	18,90
05:00	12,84	19,10	9,55	0,444518717	18,39
06:00	12,45	18,72	10,58	0,419117647	17,89
07:00	12,45	18,34	9,89	0,393716578	17,38
08:00	13,22	17,96	10,69	0,368315508	16,88
09:00	16,67	18,34	13,74	0,393716578	17,38
10:00	20,10	19,48	20,03	0,469919786	18,90
11:00	22,38	21,01	25,20	0,572192513	20,93
12:00	25,08	22,92	26,59	0,699866310	23,47
13:00	27,02	24,45	27,91	0,802139037	25,50
14:00	27,41	25,61	28,88	0,879679144	27,05
15:00	27,02	26,39	29,44	0,931818182	28,08
16:00	26,63	26,78	29,21	0,957887701	28,60
17:00	25,85	26,78	28,74	0,957887701	28,60
18:00	24,30	26,78	25,98	0,957887701	28,60
19:00	23,15	26,39	22,47	0,931818182	28,08
20:00	21,24	25,61	18,74	0,879679144	27,05
21:00	19,71	24,84	17,31	0,828208556	26,02
22:00	18,19	24,07	15,81	0,776737968	25,00
23:00	16,67	23,30	15,75	0,725267380	23,98
TBS mín.	12,45	17,96	9,55	---	16,88
TBS máx.	27,41	26,78	29,44	---	28,60
Amplitude	14,96	8,82	19,89	---	11,73

EDIFICAÇÃO 6 - Inverno

Dia de Referência Ed.6 (25/03/2003)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.6
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	19,64	23,83	13,00	0,535135135	20,19
01:00	19,26	23,83	12,27	0,535135135	20,19
02:00	19,26	23,44	12,10	0,492972973	19,36
03:00	19,26	23,06	11,56	0,451891892	18,54
04:00	18,88	23,06	11,25	0,451891892	18,54
05:00	18,88	22,68	9,55	0,410810811	17,72
06:00	19,26	22,68	10,58	0,410810811	17,72
07:00	19,26	22,68	9,89	0,410810811	17,72
08:00	19,26	22,29	10,69	0,368648649	16,88
09:00	20,41	22,68	13,74	0,410810811	17,72
10:00	23,08	23,06	20,03	0,451891892	18,54
11:00	25,39	23,83	25,20	0,535135135	20,19
12:00	27,34	24,99	26,59	0,660540541	22,69
13:00	26,95	25,37	27,91	0,701621622	23,51
14:00	28,13	26,15	28,88	0,785945946	25,18
15:00	27,74	26,15	29,44	0,785945946	25,18
16:00	27,34	26,54	29,21	0,828108108	26,02
17:00	26,56	26,15	28,74	0,785945946	25,18
18:00	25,39	26,15	25,98	0,785945946	25,18
19:00	23,85	25,76	22,47	0,743783784	24,34
20:00	23,08	25,76	18,74	0,743783784	24,34
21:00	21,93	25,37	17,31	0,701621622	23,51
22:00	21,17	24,99	15,81	0,660540541	22,69
23:00	20,41	24,60	15,75	0,618378378	21,85
TBS mín.	18,88	22,29	9,55	---	16,88
TBS máx.	28,13	26,54	29,44	---	26,02
Amplitude	9,25	4,25	19,89	---	9,14

EDIFICAÇÃO 7 - Inverno

Dia de Referência Ed.7 (25/03/2003)			Text de Inverno	Fator de Variação	Tint Ed.7
Hora	Text	Tint	26/7/2002	FTI _h	
00:00	20,25	23,97	13,00	0,523429711	19,96
01:00	19,86	23,97	12,27	0,523429711	19,96
02:00	19,48	23,97	12,10	0,523429711	19,96
03:00	19,48	23,97	11,56	0,523429711	19,96
04:00	18,72	23,97	11,25	0,523429711	19,96
05:00	18,72	23,97	9,55	0,523429711	19,96
06:00	18,72	23,97	10,58	0,523429711	19,96
07:00	18,72	23,97	9,89	0,523429711	19,96
08:00	19,10	23,97	10,69	0,523429711	19,96
09:00	21,39	23,97	13,74	0,523429711	19,96
10:00	24,84	23,97	20,03	0,523429711	19,96
11:00	27,17	23,97	25,20	0,523429711	19,96
12:00	28,75	24,35	26,59	0,561316052	20,71
13:00	27,56	23,97	27,91	0,523429711	19,96
14:00	28,35	24,35	28,88	0,561316052	20,71
15:00	28,35	24,35	29,44	0,561316052	20,71
16:00	27,56	24,35	29,21	0,561316052	20,71
17:00	27,17	24,35	28,74	0,561316052	20,71
18:00	25,61	24,35	25,98	0,561316052	20,71
19:00	24,84	24,35	22,47	0,561316052	20,71
20:00	24,07	24,35	18,74	0,561316052	20,71
21:00	22,92	23,97	17,31	0,523429711	19,96
22:00	22,15	23,97	15,81	0,523429711	19,96
23:00	21,39	23,97	15,75	0,523429711	19,96
TBS mín.	18,72	23,97	9,55	---	19,96
TBS máx.	28,75	24,35	29,44	---	20,71
Amplitude	10,03	0,38	19,89	---	0,75

A.2 – Período de Verão

As temperaturas internas de cada edificação foram ajustadas ao clima externo do dia de referência de verão, com base nos valores horários de FTI_h (Eq. 3.1) e calculadas a partir da equação 3.2.

EDIFICAÇÃO 1 - Verão

Dia de Referência Ed.1 (19/09/2002)		Text de Verão 14/10/2002		Fator de Variação FTI_h	Tint Ed.1
Hora	Text	Tint			
00:00	23,16	28,20	22,69	0,705397987	31,08
01:00	21,63	27,81	21,36	0,669716377	30,51
02:00	20,87	27,41	20,86	0,633119854	29,92
03:00	20,49	27,02	20,52	0,597438243	29,35
04:00	22,01	26,63	20,13	0,561756633	28,78
05:00	22,01	26,24	19,87	0,526075023	28,21
06:00	21,63	25,85	19,80	0,490393413	27,64
07:00	21,63	25,46	22,95	0,454711802	27,07
08:00	22,39	25,46	28,27	0,454711802	27,07
09:00	22,78	25,08	30,81	0,419945105	26,51
10:00	24,31	25,08	32,13	0,419945105	26,51
11:00	26,64	25,46	33,36	0,454711802	27,07
12:00	29,00	25,85	35,01	0,490393413	27,64
13:00	30,61	26,24	35,16	0,526075023	28,21
14:00	31,42	27,41	35,74	0,633119854	29,92
15:00	31,01	28,20	35,79	0,705397987	31,08
16:00	30,61	29,39	34,57	0,814272644	32,82
17:00	29,80	29,79	32,99	0,850869167	33,41
18:00	29,00	30,19	29,97	0,887465691	33,99
19:00	27,82	30,19	26,31	0,887465691	33,99
20:00	26,64	29,79	25,20	0,850869167	33,41
21:00	25,86	29,79	22,69	0,850869167	33,41
22:00	25,86	29,39	22,66	0,814272644	32,82
23:00	25,09	28,99	20,26	0,777676121	32,24
TBS mín.	20,49	25,08	19,80	---	26,51
TBS máx.	31,42	30,19	35,79	---	33,99
Amplitude	10,93	5,11	15,99	---	7,48

EDIFICAÇÃO 2 - Verão

Dia de Referência Ed.2 (19/09/2002)		Text de Verão		Fator de Variação	Tint Ed.2
Hora	14/10/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	22,34	25,15	22,69	0,382171227	25,91
01:00	21,20	24,91	21,36	0,360988526	25,57
02:00	21,58	24,66	20,86	0,338923213	25,22
03:00	20,82	24,42	20,52	0,317740512	24,88
04:00	21,58	24,21	20,13	0,299205649	24,58
05:00	21,20	23,94	19,87	0,275375110	24,20
06:00	20,82	23,72	19,80	0,255957635	23,89
07:00	20,82	23,53	22,95	0,239187996	23,62
08:00	22,34	23,36	28,27	0,224183583	23,38
09:00	24,26	23,31	30,81	0,219770521	23,31
10:00	26,19	23,43	32,13	0,230361871	23,48
11:00	28,54	23,70	33,36	0,254192410	23,86
12:00	29,73	23,99	35,01	0,279788173	24,27
13:00	30,94	24,33	35,16	0,309796999	24,75
14:00	32,15	24,69	35,74	0,341571050	25,26
15:00	32,15	25,10	35,79	0,377758164	25,84
16:00	31,34	25,49	34,57	0,412180053	26,39
17:00	30,13	25,80	32,99	0,439541041	26,83
18:00	28,94	26,02	29,97	0,458958517	27,14
19:00	26,97	26,17	26,31	0,472197705	27,35
20:00	26,19	26,22	25,20	0,476610768	27,42
21:00	25,42	26,22	22,69	0,476610768	27,42
22:00	25,03	26,14	22,66	0,469549868	27,31
23:00	24,26	26,05	20,26	0,461606355	27,18
TBS mín.	20,82	23,31	19,80	---	23,31
TBS máx.	32,15	26,22	35,79	---	27,42
Amplitude	11,33	2,91	15,99	---	4,11

EDIFICAÇÃO 3 - Verão

Dia de Referência Ed.3 (03/10/2002)		Text de Verão		Fator de Variação	Tint Ed.3
Hora	14/10/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	25,23	26,56	22,69	0,467517401	27,28
01:00	24,45	26,17	21,36	0,422273782	26,55
02:00	23,68	25,78	20,86	0,377030162	25,83
03:00	23,30	25,78	20,52	0,377030162	25,83
04:00	22,92	25,39	20,13	0,331786543	25,11
05:00	22,53	25,39	19,87	0,331786543	25,11
06:00	22,92	25,39	19,80	0,331786543	25,11
07:00	23,30	25,39	22,95	0,331786543	25,11
08:00	24,07	25,39	28,27	0,331786543	25,11
09:00	24,84	25,39	30,81	0,331786543	25,11
10:00	25,61	25,39	32,13	0,331786543	25,11
11:00	27,17	25,39	33,36	0,331786543	25,11
12:00	28,35	25,78	35,01	0,377030162	25,83
13:00	29,94	26,56	35,16	0,467517401	27,28
14:00	31,15	26,95	35,74	0,512761021	28,00
15:00	30,34	27,34	35,79	0,558004640	28,72
16:00	30,34	27,34	34,57	0,558004640	28,72
17:00	30,34	27,34	32,99	0,558004640	28,72
18:00	28,75	27,34	29,97	0,558004640	28,72
19:00	26,39	27,34	26,31	0,558004640	28,72
20:00	26,00	26,95	25,20	0,512761021	28,00
21:00	25,61	26,95	22,69	0,512761021	28,00
22:00	25,23	26,56	22,66	0,467517401	27,28
23:00	25,61	26,56	20,26	0,467517401	27,28
TBS mín.	22,53	25,39	19,80	---	25,11
TBS máx.	31,15	27,34	35,79	---	28,72
Amplitude	8,62	1,95	15,99	---	3,62

EDIFICAÇÃO 4 - Verão

Dia de Referência Ed.4 (06/10/2002)		Text de Verão		Fator de Variação	Tint Ed.4
Hora	26/7/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	25,46	24,60	22,69	0,123130035	21,77
01:00	25,08	24,60	21,36	0,123130035	21,77
02:00	24,30	24,60	20,86	0,123130035	21,77
03:00	23,92	24,60	20,52	0,123130035	21,77
04:00	23,53	24,60	20,13	0,123130035	21,77
05:00	23,53	24,60	19,87	0,123130035	21,77
06:00	23,53	24,60	19,80	0,123130035	21,77
07:00	23,53	24,60	22,95	0,123130035	21,77
08:00	24,30	24,60	28,27	0,123130035	21,77
09:00	25,46	24,60	30,81	0,123130035	21,77
10:00	27,02	24,99	32,13	0,168009206	22,49
11:00	28,99	24,99	33,36	0,168009206	22,49
12:00	29,79	25,37	35,01	0,211737629	23,19
13:00	30,60	25,37	35,16	0,211737629	23,19
14:00	31,41	25,37	35,74	0,211737629	23,19
15:00	32,22	25,76	35,79	0,256616801	23,90
16:00	31,81	25,76	34,57	0,256616801	23,90
17:00	30,60	25,76	32,99	0,256616801	23,90
18:00	28,99	26,15	29,97	0,301495972	24,62
19:00	26,24	25,76	26,31	0,256616801	23,90
20:00	25,85	25,37	25,20	0,211737629	23,19
21:00	25,46	25,37	22,69	0,211737629	23,19
22:00	25,46	25,37	22,66	0,211737629	23,19
23:00	25,46	25,37	20,26	0,211737629	23,19
TBS mín.	23,53	24,60	19,80	---	12,00
TBS máx.	32,22	26,15	35,79	---	15,55
Amplitude	8,69	1,55	15,99	---	3,55

EDIFICAÇÃO 5 - Verão

Dia de Referência Ed.5 (07/11/2002)		Text de Verão		Fator de Variação	Tint Ed.5
Hora	26/7/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	15,14	21,39	22,69	0,597593583	29,36
01:00	14,76	20,63	21,36	0,546791444	28,54
02:00	13,99	20,25	20,86	0,521390374	28,14
03:00	13,61	19,86	20,52	0,495320856	27,72
04:00	13,22	19,48	20,13	0,469919786	27,31
05:00	12,84	19,10	19,87	0,444518717	26,91
06:00	12,45	18,72	19,80	0,419117647	26,50
07:00	12,45	18,34	22,95	0,393716578	26,10
08:00	13,22	17,96	28,27	0,368315508	25,69
09:00	16,67	18,34	30,81	0,393716578	26,10
10:00	20,10	19,48	32,13	0,469919786	27,31
11:00	22,38	21,01	33,36	0,572192513	28,95
12:00	25,08	22,92	35,01	0,699866310	30,99
13:00	27,02	24,45	35,16	0,802139037	32,63
14:00	27,41	25,61	35,74	0,879679144	33,87
15:00	27,02	26,39	35,79	0,931818182	34,70
16:00	26,63	26,78	34,57	0,957887701	35,12
17:00	25,85	26,78	32,99	0,957887701	35,12
18:00	24,30	26,78	29,97	0,957887701	35,12
19:00	23,15	26,39	26,31	0,931818182	34,70
20:00	21,24	25,61	25,20	0,879679144	33,87
21:00	19,71	24,84	22,69	0,828208556	33,04
22:00	18,19	24,07	22,66	0,776737968	32,22
23:00	16,67	23,30	20,26	0,725267380	31,40
TBS mín.	12,45	17,96	19,80	---	25,69
TBS máx.	27,41	26,78	35,79	---	35,12
Amplitude	14,96	8,82	15,99	---	9,43

EDIFICAÇÃO 6 - Verão

Dia de Referência Ed.6 (25/03/2003)			Text de Verão	Fator de Variação	Tint Ed.6
Hora	26/7/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	19,64	23,83	22,69	0,535135135	28,36
01:00	19,26	23,83	21,36	0,535135135	28,36
02:00	19,26	23,44	20,86	0,492972973	27,68
03:00	19,26	23,06	20,52	0,451891892	27,03
04:00	18,88	23,06	20,13	0,451891892	27,03
05:00	18,88	22,68	19,87	0,410810811	26,37
06:00	19,26	22,68	19,80	0,410810811	26,37
07:00	19,26	22,68	22,95	0,410810811	26,37
08:00	19,26	22,29	28,27	0,368648649	25,69
09:00	20,41	22,68	30,81	0,410810811	26,37
10:00	23,08	23,06	32,13	0,451891892	27,03
11:00	25,39	23,83	33,36	0,535135135	28,36
12:00	27,34	24,99	35,01	0,660540541	30,36
13:00	26,95	25,37	35,16	0,701621622	31,02
14:00	28,13	26,15	35,74	0,785945946	32,37
15:00	27,74	26,15	35,79	0,785945946	32,37
16:00	27,34	26,54	34,57	0,828108108	33,04
17:00	26,56	26,15	32,99	0,785945946	32,37
18:00	25,39	26,15	29,97	0,785945946	32,37
19:00	23,85	25,76	26,31	0,743783784	31,69
20:00	23,08	25,76	25,20	0,743783784	31,69
21:00	21,93	25,37	22,69	0,701621622	31,02
22:00	21,17	24,99	22,66	0,660540541	30,36
23:00	20,41	24,60	20,26	0,618378378	29,69
TBS mín.	18,88	22,29	19,80	---	25,69
TBS máx.	28,13	26,54	35,79	---	33,04
Amplitude	9,25	4,25	15,99	---	7,35

EDIFICAÇÃO 7 - Verão

Dia de Referência Ed.7 (25/03/2003)			Text de Verão	Fator de Variação	Tint Ed.7
Hora	26/7/2002	Tint	14/10/2002	FTI _h	
00:00	20,25	23,97	22,69	0,523429711	28,17
01:00	19,86	23,97	21,36	0,523429711	28,17
02:00	19,48	23,97	20,86	0,523429711	28,17
03:00	19,48	23,97	20,52	0,523429711	28,17
04:00	18,72	23,97	20,13	0,523429711	28,17
05:00	18,72	23,97	19,87	0,523429711	28,17
06:00	18,72	23,97	19,80	0,523429711	28,17
07:00	18,72	23,97	22,95	0,523429711	28,17
08:00	19,10	23,97	28,27	0,523429711	28,17
09:00	21,39	23,97	30,81	0,523429711	28,17
10:00	24,84	23,97	32,13	0,523429711	28,17
11:00	27,17	23,97	33,36	0,523429711	28,17
12:00	28,75	24,35	35,01	0,561316052	28,78
13:00	27,56	23,97	35,16	0,523429711	28,17
14:00	28,35	24,35	35,74	0,561316052	28,78
15:00	28,35	24,35	35,79	0,561316052	28,78
16:00	27,56	24,35	34,57	0,561316052	28,78
17:00	27,17	24,35	32,99	0,561316052	28,78
18:00	25,61	24,35	29,97	0,561316052	28,78
19:00	24,84	24,35	26,31	0,561316052	28,78
20:00	24,07	24,35	25,20	0,561316052	28,78
21:00	22,92	23,97	22,69	0,523429711	28,17
22:00	22,15	23,97	22,66	0,523429711	28,17
23:00	21,39	23,97	20,26	0,523429711	28,17
TBS mín.	18,72	23,97	19,80	---	28,17
TBS máx.	28,75	24,35	35,79	---	28,78
Amplitude	10,03	0,38	15,99	---	0,61

Apêndice B – Planilhas de Mahoney para São Carlos

PLANILHAS DE MAHONEY (Adaptadas aos dados do CRHEA para 2002)												
Localidade: São Carlos - SP				Lat.: 22° 01'				Long.: 47° 53'			Alt.: 856m	

1. Normais	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Temp. Méd. Máx	28,5	27,5	30,5	30,5	26,0	27,0	25,0	28,0	26,0	32,5	29,0	29,5
Temp. Méd. Mín	19,0	18,5	19,0	17,0	14,5	12,5	10,5	15,0	13,5	18,0	18,0	19,0
Amplitude Média	9,5	9,0	11,5	13,5	11,5	14,5	14,6	13,0	12,5	14,5	11,0	10,5
UR (%)	89	91	86	81	86	81	80	75	79	69	83	88
Pluviosidade	412	274	108	9	58	0	20	93	29	67	175	133

Máxima: Temp Méd. Máx	32,5
Mínima: Temp. Méd. Mín	10,5
Temperatura Média Anual	21,5
Amplitude Média Anual	22,0

$$\text{Temperatura Média Anual} = (\text{Máx.} + \text{Mín.}) / 2$$

$$\text{Amplitude Média Anual} = (\text{Máx.} - \text{Mín.})$$

2. Diagnóstico	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Grupo Umidade	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	4	4
Lim. Sup. Dia	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	27,0	29,0	27,0	27,0
Temp. Méd. Max	28,5	27,5	30,5	30,5	26,0	27,0	25,0	28,0	26,0	32,5	29,0	29,5
Lim. Inf. Dia	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	22,0	23,0	22,0	22,0
Lim. Sup. Noite	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	23,0	21,0	21,0
Temp. Méd. Mín	19,0	18,5	19,0	17,0	14,5	12,5	10,5	15,0	13,5	18,0	18,0	19,0
Lim. Inf. Noite	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Diagn. Diurno	Q	Q	Q	Q	C	C	C	Q	C	Q	Q	Q
Diag. Noturno	C	C	C	C	F	F	F	F	F	C	C	C

3. Indicadores	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
UMIDADE	U1	X	X	X	X			X			X	X
	U2					X	X		X			
	U3	X	X									
ARIDEZ	A1									X		
	A2											
	A3											

4. PARÂMETROS DO MÉTODO

GRUPOS DE UMIDADE RELATIVA	Limites Confortáveis de Temperatura					
	TMA > 20		15 ≥ TMA ≥ 20		TMA < 15	
	D	N	DIA	NOITE	D	N
GRUPO 1 UR < 30%	26	17	23	14	21	12
	34	25	32	23	30	21
GRUPO 2 30% ≤ UR < 50%	25	17	22	14	20	12
	31	24	30	22	27	20
GRUPO 3 50% ≤ UR < 70%	23	17	21	14	19	12
	29	23	28	21	26	19
GRUPO 4 UR ≥ 70%	22	17	20	14	18	12
	27	21	25	20	24	18

Indicadores do Rigor Climático					
Q = Quente, F = Frio, C = Confortável					
Indic.	DIA	NOITE	CHUVA	UR	AMPL.
U1	Q			4	
	Q			2 ou 3	< 10
U2	C			4	
U3			> 200		
A1				< 4	≥ 10
A2		Q		< 3	
	Q	C		< 3	> 10
A3	F				

TOTAIS DOS INDICADORES						5. RECOMENDAÇÕES PARA PROJETO ARQUITETÔNICO
U1	U2	U3	A1	A2	A3	
7	4	2	1	0	0	

A - IMPLANTAÇÃO

			0-10			1	Edifícios alongados, com fachadas maiores voltadas para Norte e Sul, para reduzir a exposição ao Sol.
			11-12		5-12		
					0-4	2	Edifícios compactos, com pátio interno.

B – ESPAÇAMENTOS ENTRE AS EDIFICAÇÕES

11-12						3	Aumentar distâncias entre edificações para melhor ventilação.
2-10						4	Como 3, mas com possibilidade de controlar ventilação.
0-1						5	Aproximar as edificações para aumentar a inércia.

C – VENTILAÇÃO

3-12						6	Para obter uma ventilação cruzada permanente, as habitações devem ser dispostas em fila simples ao longo do edifício.
			0-5				
1-2			6-12			7	Fila dupla de habitações ao longo do edifício, com dispositivos que permitam controlar a ventilação.
0	0-4					8	Ventilação mínima, apenas para a renovação do ar.

D – TAMANHO DAS ABERTURAS

			0-1		0	9	40 a 80% das fachadas Norte e Sul (ao nível do corpo das pessoas).
					1-12		
			2-5			10	25 a 40% das fachadas Norte e Sul e/ou Leste e Oeste quando o período frio for predominante.
			6-10			11	15 a 25% das fachadas.
			11-12		0-3	12	10 a 20% das fachadas, com controle de radiação solar.
					4-12	13	25 a 40% das fachadas, permitindo Sol no período frio.

E – POSIÇÃO DAS ABERTURAS

3-12						14	Nas fachadas Norte e Sul, permitindo ventilação ao nível dos corpos dos ocupantes.
			0-5				
1-2			6-12			15	Como 14, mas com aberturas nas paredes internas.
0							

F – PROTEÇÃO DAS ABERTURAS

					0-2	16	Evitar radiação solar direta nos interiores da edificação.
			2-12			17	Proteger da chuva, permitindo ventilação.

G – PAREDES E PISOS

			0-2			18	Leves, refletoras. $U \leq 2,8 \text{ W/m}^2\text{C}$, Atraso $\leq 3 \text{ h}$, FS $\leq 4\%$
			3-12			19	Pesadas. $U \leq 2,0 \text{ W/m}^2\text{C}$, Atraso $\geq 8 \text{ h}$, FS $\leq 4\%$

H – COBERTURAS

10-12						20	Leves, refletoras. $U \leq 1,1 \text{ W/m}^2\text{C}$, Atraso $\leq 3 \text{ h}$, FS $\leq 4\%$
			0-5			21	Leves, isolantes. $U \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{C}$, Atraso $\leq 3 \text{ h}$, FS $\leq 4\%$
			6-12			22	Pesadas. $U \leq 0,85 \text{ W/m}^2\text{C}$, Atraso $\geq 8 \text{ h}$, FS $\leq 4\%$

I – EXTERIOR DA EDIFICAÇÃO

				1-12		23	Prever espaço ao ar livre para dormir.
			1-12			24	Proteger contra as chuvas.

ANEXO

ANEXO A – PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE ALGUNS MATERIAIS

Anexo A – Propriedades Termofísicas de Alguns Materiais

Tabela A.1: Características físicas e térmicas de alguns materiais.

MATERIAL	λ	ρ	c	Difusividade (a)	Efusividade (b)
	W/m.K	kg/m ³	J/kg.K	(x10 ⁻⁶) m ² /s	(W/m ² .K) ^{1/2}
Poliuretano	0,026	30	1400	0,619	33,05
Ar	0,026	1,223	1063	19,999	5,81
Poliestireno	0,035	50	1675	0,418	54,14
Espuma fenólica	0,038	30	1400	0,905	39,95
Lã de vidro	0,041	200	656	0,313	73,34
Cortiça	0,085	540	2000	0,079	302,99
Argamassa de cimento	0,090	1920	669	0,070	340,00
Madeira de construção	0,130	630	1360	0,152	333,74
Madeira de pinho	0,148	640	2512	0,092	487,79
Madeira densa	0,200	700	1250	0,229	418,33
Concreto celular	0,220	600	880	0,417	340,82
Terra com palha	0,300	400	900	0,833	328,63
Concreto celular	0,330	800	880	0,469	482,00
Gesso	0,488	1440	837	0,405	766,93
Argamassa de cimento e areia	0,530	1570	1000	0,338	912,20
Água	0,582	1000	4187	0,139	1561,04
Tijolos de argila	0,814	1800	921	0,491	1161,66
Terra de parede portante	0,850	2000	900	0,472	1236,93
Vidro plano	1,160	2490	830	0,561	1548,34
Argila	1,279	1460	879	0,997	1281,17
Pedra arenosa	1,300	2000	712	0,913	1360,59
Concreto denso	1,750	2300	920	0,827	1924,32
Pedra	1,861	2250	712	1,162	1726,65
Mármore	2,900	2590	800	1,400	2451,29
Granito	3,500	2500	754	1,857	2568,56
Aço	50	7800	512	12,520	14130,82
Alumínio	160	2800	896	63,776	20035,17
Cobre	389	8900	385	113,527	36509,02

Fonte: Adaptado de GONZÁLEZ (2002).