

INÉRCIA TÉRMICA, CONFORTO E CONSUMO DE ENERGIA EM EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS, SP

Kelen Almeida Dornelles (1); Maurício Roriz (2)

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos
Rodovia Washington Luís, Km 235 - CEP 13.565-905 - São Carlos, SP – Brasil

E-mail: (1) kelend@terra.com.br (2) m.roriz@zaz.com.br

RESUMO

Este artigo apresenta os primeiros resultados de uma pesquisa que busca identificar os efeitos da inércia térmica sobre o desempenho térmico e a eficiência energética de edificações na cidade de São Carlos, interior do estado de São Paulo. São destacados principalmente os procedimentos metodológicos que vêm sendo propostos e avaliados durante o desenvolvimento da pesquisa. Estes primeiros resultados sugerem que, para o clima semi-úmido típico de vasta extensão do território brasileiro, sistemas construtivos com mais inércia térmica proporcionam ambientes mais confortáveis e edificações energeticamente mais eficientes.

ABSTRACT

This paper presents the first results of a research that looks for to identify the effects of thermal inertia on the thermal performance and energy efficiency of buildings in São Carlos city, São Paulo. Methodological procedures that have being proposed and evaluated during the research development are outstanding in this paper. These first results suggest that, for the semi-humid climate, typical of vast extension of Brazil, constructive systems with high thermal inertia provide more comfortable environments and buildings energetically more efficient.

1. INTRODUÇÃO

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) das temperaturas internas e defasagem (atraso) das mesmas em relação às temperaturas externas. A inércia térmica também 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. “Historicamente, a literatura especializada sempre recomendou o aproveitamento desta propriedade nas edificações localizadas em regiões secas e desérticas, onde a inércia proporciona resultados significativos diante das acentuadas oscilações térmicas típicas destas regiões. Estudos recentes têm demonstrado que, dependendo do clima, o efeito da inércia pode ser negativo, neutro ou positivo sobre o desempenho térmico e o consumo energético das edificações” (RORIZ, 2001).

Os construtores da antiguidade, sem o saber, freqüentemente adotavam soluções bioclimáticas. Enquanto a estabilidade estrutural dependia de grandes massas de materiais, estas proporcionavam, como subprodutos, altos índices de isolamento térmico e inércia. Algumas recentes inovações tecnológicas determinaram a aparição de materiais construtivos monofuncionais, ou seja: cumprem suas funções estruturais, sendo muitas vezes lamentáveis seus desempenhos térmico e acústico, ou funcionam apenas como isolantes térmicos, possuindo uma resistência mecânica desprezível (GÁLVEZ, 2002).

Givoni (1998) destaca a importância dos materiais de construção na relação entre as temperaturas internas de edificações e o clima exterior (temperatura e radiação solar). No caso de edificações aquecidas ou resfriadas por sistema mecânico, os materiais do envelope influenciam acentuadamente no total da energia necessária para manter as temperaturas internas dentro dos limites de conforto.

Norén *et al.* (1999) calcularam a necessidade anual de energia para aquecer três edificações suecas, com diferentes inércias. Concluíram que a edificação de maior inércia tem menor necessidade de energia e que bastam pequenas mudanças na inércia para produzirem grande diferença no consumo de energia.

A inércia térmica tem efeito positivo tanto no verão como no inverno (SANTAMOURIS, 1996 *apud* PAPST, 1999). No inverno, o ganho solar diurno é armazenado na envolvente e transferido para o interior da edificação no período noturno, quando é necessário o aquecimento. No verão, o calor é armazenado na construção, reduzindo o pico 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 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.

Tabela 1 - Propriedades Térmicas de Alguns Materiais.

Material	Condutividade λ [W/m.K]	Dens. Apar. ρ [kg/m ³]	C. Especif. c [J/kg.K]	Difusividade a (x10 ⁶) [m ² /s]	Efusividade b [W/m ² K] ^{1/2}
Ar seco	0.026	1.223	1063	19.999	6
Poliuretano expand.	0.030	30	1400	0.714	35
Poliestireno expand.	0.035	50	1675	0.418	54
Lã de vidro	0.041	200	656	0.313	73
Pinho	0.148	640	2512	0.092	488
Madeira densa	0.200	700	1250	0.229	418
Cerâmica	0.240	1000	960	0.250	480
Adobe	0.300	400	900	0.833	329
Concreto celular	0.330	800	880	0.469	482
Água	0.582	1000	4187	0.139	1561
Argila (tijolo)	0.814	1800	921	0.491	1162
Concreto comum	1.520	2400	1005	0.630	1915
Granito	3.500	2500	754	1.857	2569
Aço	50.000	7800	512	12.520	14131
Alumínio	160.000	2800	896	63.776	20035
Cobre	389.000	8900	385	113.527	3659

Bastam três propriedades físicas fundamentais para caracterizar termicamente qualquer material:

- λ = condutividade térmica (W / m.K)
- ρ = densidade aparente (kg / m³)
- c = calor específico (J / kg.K)

Outras propriedades derivam destas primeiras, duas das quais são aplicadas ao estudo da inércia:

$$\text{Difusividade térmica do material: } a = \lambda / \rho.c \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\text{Efusividade térmica do material: } b = (\lambda.\rho.c)^{1/2} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{K})^{1/2} \quad [\text{Eq. 2}]$$

A difusividade expressa a capacidade de um material para transmitir uma variação de temperatura. A efusividade indica a capacidade do material para absorver ou restituir um fluxo de calor ou uma potência térmica. (LAVIGNE, 1994, pg. 36). A tabela 1 apresenta as propriedades de alguns materiais, ordenados segundo as respectivas condutividades.

Difusividade e efusividade são aplicadas no cálculo dos dois principais efeitos da inércia, o atraso e o amortecimento térmicos. O atraso indica o tempo necessário para uma onda térmica atravessar um componente construtivo (parede, cobertura, etc.). Sendo “Ai” e “Ae” 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:

$$\text{Coeficiente de Amortecimento: } \mu = A_i / A_e \quad (\text{adimensional}) \quad [\text{Eq. 3}]$$

Embora adotada internacionalmente, esta definição inverte o conceito usual de 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:

$$\text{Fator de Amortecimento: } \mu' = 1 - \mu = 1 - (A_i / A_e) \quad (\text{adimensional}) \quad [\text{Eq. 4}]$$

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

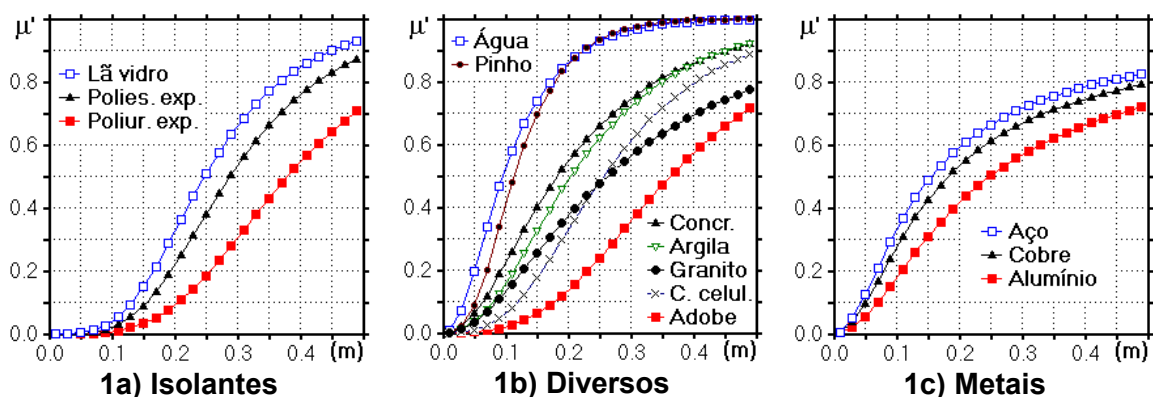


Figura 1 - Fator de Amortecimento (μ') em função da espessura, para diferentes materiais.

Nos isolantes do exemplo (1a), o fator de amortecimento cresce na mesma direção que a efusividade e na direção contrária à da difusividade. No gráfico 1b, 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 0.7, 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.

O presente artigo apresenta a avaliação do desempenho térmico de três edificações, situadas na cidade de São Carlos (SP), cujos sistemas construtivos possuem diferentes inércias térmicas. A avaliação incluiu a caracterização dos projetos arquitetônicos, monitoramentos de temperaturas do ar nos

ambientes internos e externos, cálculos computacionais, estimativas do consumo de energia e análise dos resultados. Este trabalho procurou verificar a hipótese de que, para o clima semi-úmido da cidade de São Carlos, sistemas construtivos com maior inércia apresentam melhores desempenhos térmicos.

O clima de São Carlos é classificado como Subtropical, com inverno frio e seco e verão quente e úmido. Conforme as Normas Climatológicas observadas entre 1960 e 1990, durante oito meses do ano, entre abril e novembro, as médias mensais de umidade relativa permanecem abaixo de 70% (BRASIL, 1992). 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. Projeto de Norma Técnica desenvolvido no âmbito da ABNT (1998), classifica este clima na Zona Bioclimática 4 e recomenda para o mesmo a adoção de sistemas construtivos com alta inércia térmica.

2. DESCRIÇÃO DAS EDIFICAÇÕES ESTUDADAS

Foram estudadas três edificações residenciais, localizadas na região central da cidade e escolhidas por apresentarem sistemas construtivos com diferentes inércias térmicas. Os ambientes monitorados em cada uma delas são descritos a seguir e estão representados na figura 2.

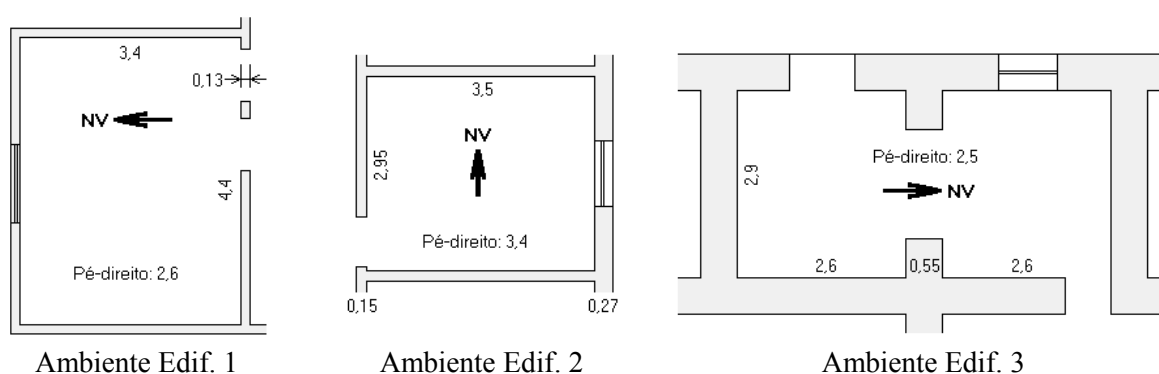


Figura 2 - Dimensões dos ambientes monitorados.

Edificação 1:

Ambiente monitorado: dormitório (um ocupante, somente durante a noite);
Paredes: tijolo maciço com argamassa em ambas as faces. Espessura (cm) = $1,5+10+1,5 = 13$;
Piso: lajota cerâmica sobre contrapiso de concreto, elevado 80 cm do solo;
Cobertura: telha de barro com forro de madeira;
Orientação da fachada: Norte, sem sombreamento.

Edificação 2:

Ambiente monitorado: dormitório (fechado e sem ocupação);
Paredes: tijolo maciço com argamassa em ambas as faces. Espessura (cm) = $2,5+22+2,5 = 27$;
Piso: em madeira, elevado do solo;
Cobertura: telha de barro com forro de madeira;
Orientação da fachada: Leste, sem sombreamento.

Edificação 3:

Ambiente monitorado: sala (fechada e sem ocupação);
Paredes: em pedra com argamassa na face interna. Espessura (cm) = $52,5+2,5 = 55$;
Piso: concreto comum, em contato com o solo;
Cobertura: laje em concreto com forro de madeira, piso do pavimento superior;
Orientação da fachada: Oeste, parcialmente sombreada por edificação vizinha.

3. METODOLOGIA

As temperaturas horárias internas e externas de cada edificação foram medidas durante alguns dias, a intervalos de 10 minutos. As edificações 2 e 3 foram monitoradas entre os dias 28/09/02 e 8/10/02 e a

edificação 1, durante a primeira semana de novembro de 2002. As temperaturas foram registradas por sensores modelo Hobo, fabricados pela Onset Computer Corporation. Para evitar a interferência de radiação térmica sobre as temperaturas medidas, os sensores foram instalados no interior de recipientes de alumínio, com pequenas aberturas para a circulação do ar.

A partir dos dados monitorados, foram determinadas as curvas do dia médio para cada ambiente. Devido à entrada de uma frente fria na região, os valores do dia 1 de outubro não foram computados no cálculo dos dias médios, pois o objetivo do estudo era avaliar os efeitos da inércia diante de condições climáticas mais permanentes. O seguinte procedimento foi adotado na definição dos dias médios:

- Passo 1: Identificação das temperaturas mínimas e máximas de cada dia, internas e externas, e cálculo de suas médias para todo o período, MedMin e MedMax.
- Passo 2: Determinação das oscilações típicas das temperaturas internas e externas, através do cálculo das médias dos valores medidos a cada 10 minutos ao longo do período observado (Fig. 3).

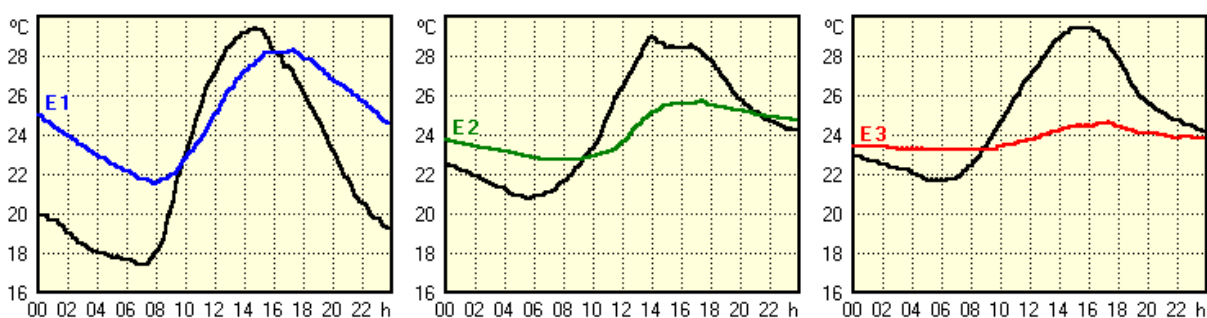


Figura 3 - Valores médios das temperaturas registradas a cada 10 minutos.

- Passo 3: Cálculo dos fatores de correção das temperaturas para estabelecer o “dia médio” de cada local monitorado. A aplicação deste fator objetiva ajustar cada curva às médias de mínimas (MedMin) e de máximas (MedMax) determinadas no passo 1.
- Passo 4: Cálculo das médias de temperatura (TIh e TEh) em cada intervalo de 1 hora.

As diferenças registradas entre os climas externos são parcialmente responsáveis pelas diferenças observadas entre as temperaturas nos ambientes internos das edificações, dificultando comparar-se os efeitos térmicos dos respectivos sistemas construtivos. No caso específico dos exemplos acima, a principal diferença no clima externo ocorreu em relação à edificação 1, monitorada em novembro. 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. Apesar de sua magnitude, este fato tem sido desconsiderado em diversos estudos sobre desempenho térmico de edificações, nos quais adotam-se temperaturas externas medidas em estações climatológicas distantes e localizadas, geralmente, em zonas de baixa densidade de ocupação, cujos climas certamente diferem daqueles provocados pelos centros urbanos. Os passos seguintes da metodologia constituem uma tentativa de solução para este problema.

- Passo 5: Cálculo da relação observada, de hora em hora, entre temperaturas internas e externas. Esta relação é um indicador da capacidade de amortecimento térmico de cada sistema construtivo, conforme as seguintes equações:

$$FTIh = (TIh - TEmin) / Aext \quad [\text{Eq. 5}]$$

Sendo:

h = hora do dia (entre 0 e 24)

FTIh = Fator de variação da temperatura interna na hora “h”

T_{Ih} = Temperatura interna na hora “h”

T_{Emin} = Média das temperaturas mínimas externas (passo 1)

A_{ext} = Amplitude média das temperaturas externas = $T_{Emax} - T_{Emin}$

- Passo 6: Estimativa das temperaturas internas que ocorreriam se as três edificações fossem submetidas ao mesmo clima. Adotou-se o clima medido no exterior da edificação 3 e o fator FT_{Ih} apresentado no passo 5. As novas temperaturas são calculadas pela equação 6:

$$T_{ICh} = T_{Emin}' + FT_{Ih} \times A_{ext}' \quad [\text{Eq. 6}]$$

Sendo:

T_{ICh} = Temperatura interna corrigida (hora “h”)

FT_{Ih} = Fator de variação da temperatura interna na hora “h”

T_{Emin}' = Média das temperaturas mínimas externas do clima adotado

A_{ext}' = Amplitude média das temperaturas externas do clima adotado

Exemplo dos cálculos das temperaturas internas que ocorreriam na edificação 1, se esta estivesse submetida ao clima medido na edificação 3. As temperaturas resultantes são indicadas na figura 4.

Tabela 2 - Exemplo de cálculo das estimativas de temperaturas internas.

Edificação	Temp. Máxima Ext.	Temp. Mínima Ext.	Amplitude Temp. Externa
E1	$T_{Emax1} = 29.3 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Emin1} = 17.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$A_{ext1} = 29.3 - 17.4 = 11.9 \text{ } ^\circ\text{C}$
E3	$T_{Emax}' = 29.4 \text{ } ^\circ\text{C}$	$T_{Emin}' = 21.7 \text{ } ^\circ\text{C}$	$A_{ext}' = 29.4 - 21.7 = 7.7 \text{ } ^\circ\text{C}$

<p>Hora do dia = 6h $TI(6) = 22.2 \text{ } ^\circ\text{C}$ Pela equação 5: $FTI(6) = (22.2 - 17.4) / 11.9 = 0.40$ Pela equação 6: $TIC(6) = 21.7 + 0.40 \times 7.7 = 24.8 \text{ } ^\circ\text{C}$</p>	<p>Hora do dia = 18h $TI(18) = 28.0 \text{ } ^\circ\text{C}$ Pela equação 5: $FTI(18) = (28.0 - 17.4) / 11.9 = 0.89$ Pela equação 6: $TIC(18) = 21.7 + 0.89 \times 7.7 = 28.6 \text{ } ^\circ\text{C}$</p>
--	--

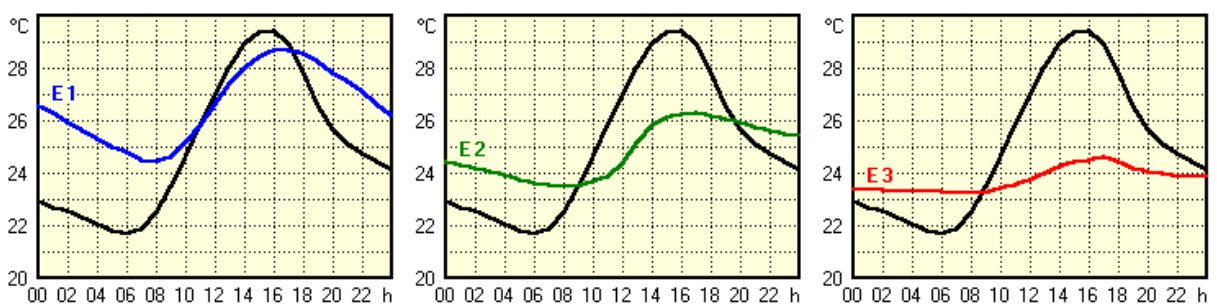


Figura 4 - Temperaturas internas estimadas em E1 e E2 para o mesmo clima externo de E3.

- Passo 7: Cálculo do desconforto por frio ou calor, em graus-hora ($^{\circ}\text{Ch}$) acumulados ao longo do dia médio, considerando-se os limites de conforto indicados no método de Mahoney (UNITED Nations, 1971). Este método foi escolhido por ser um dos únicos que diferenciam limites diurnos e noturnos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para o mês de outubro em São Carlos, as Planilhas de Mahoney indicam intervalos confortáveis de temperatura entre 21 e 28 $^{\circ}\text{C}$ para o período diurno e entre 14 e 21 $^{\circ}\text{C}$ para o período noturno.

Através dos limites de conforto estabelecidos, foi possível determinar a quantidade de graus-hora de desconforto por calor para cada ambiente analisado. A figura 5 apresenta as curvas de temperatura interna estimada de cada ambiente e respectivos quantitativos de desconforto.

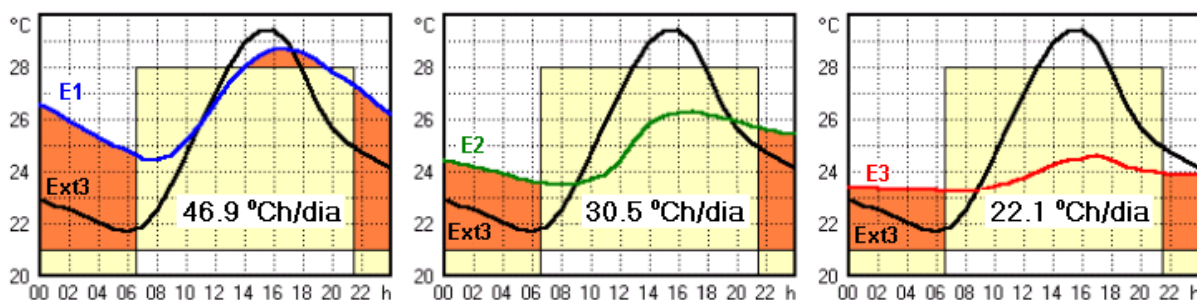


Figura 5 - Estimativas do desconforto por calor em cada edificação durante um dia médio.

Conforme Szokolay (1987), a seguinte equação permite estimar a energia necessária para retirar do ambiente o calor acumulado ao longo das horas:

$$E_{ref} = GH \cdot q \quad (^\circ\text{Ch} \times \text{W}/^\circ\text{C} = \text{Wh}) \quad [\text{Eq. 7}]$$

E_{ref} = Energia de refrigeração (Wh). Energia necessária para retirar do ambiente o calor excedente;

GH = Graus-hora de calor = calor acumulado ao longo do dia considerado ($^\circ\text{Ch}/\text{dia}$);

q = Taxa de Trocas Térmicas por Condução (q_c) e Convecção (q_v). $q = q_c + q_v$ ($\text{W}/^\circ\text{C}$);

q_c = Taxa de trocas térmicas por condução ($\text{W}/^\circ\text{C}$), igual à somatória dos produtos entre a área de cada vedação externa (fachadas, vidraças, coberturas, etc) e a transmitância térmica (U) da mesma;

q_v = Taxa de trocas térmicas por convecção. $q_v = 0,33 \cdot V \cdot N$ ($\text{W}/^\circ\text{C}$);

N = taxa de ventilação (volumes/h);

V = volume do ambiente (m^3).

Aplicando-se a equação 7 sobre o calor acumulado nos ambientes estudados, resultam os valores indicados na tabela 3:

Tabela 3 - Estimativas da energia necessária para estabelecer o conforto em cada ambiente.

Edificação	Calor: [$^\circ\text{Ch}/\text{dia}$]	q [$\text{W}/^\circ\text{C}$]	Energia para refrigeração [Wh/dia]	Área do ambiente [m^2]	Energia para refrigeração [$\text{Wh}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$]
E1	46,9	184,7	8662,4	15,0	577,5
E2	30,5	126,1	3846,1	10,3	373,4
E3	22,1	202,9	4484,1	16,5	271,8

5. CONCLUSÕES

A quantidade de edificações analisadas e as respectivas tipologias construtivas ainda são insuficientes para que se possam generalizar quaisquer conclusões. Além desta limitação, a própria metodologia adotada deverá ser ainda aferida, através de comparações com dados empíricos que se pretende obter em próximas etapas da pesquisa.

Apesar destas restrições, as estimativas dos graus-hora de calor e dos montantes de energia que seriam necessários consumir para restabelecer o conforto nos ambientes, sugerem fortes possibilidades de que realmente a inércia térmica seja recomendável em edificações submetidas ao clima semi-úmido.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (1998) Projeto 02:135.07-003: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Dezembro de 1998.
- BRASIL, Departamento Nacional de Meteorologia (1992) Normas Climatológicas (1961-1990). Departamento Nacional de Meteorologia. Secretaria Nacional de Irrigação. Ministério de Agricultura e Reforma Agrária, Brasília.
- GÁLVEZ, D.M. (2002) Impacto térmico, energético y ambiental de la envolvente arquitectónica vs confort. *Estudios de Arquitectura Bioclimática*, Anuário 2002, v.IV, p. 95-107, 2002.
- GIVONI, B. (1998) *Climate considerations in building and urban design*, John Wiley & Sons, New York, 464p.
- LAVIGNE, P. (1998) *Architecture Climatique: Une Contribution au Développement Durable*. Tome 1: Bases Physiques. Édisud. Aix-en-Provence. France.
- NÓREN, A., AKANDER, J., ISFÄLT, E. e SÖDERSTRÖM, O. (1999) 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). Disponível em: <http://www.ce.kth.se/bim/leas/vol1/a2/LEASART_02_1999.PDF>. Acesso em: 22 set. 2002.
- PAPST, A.L. (1999) Uso de inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis-SC. Florianópolis, 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.
- RORIZ, M. (1996) Conforto Térmico em Edificações: Um Modelo Matemático e uma Aplicação. (Tese de Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- RORIZ, M. (2001) 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. Projeto de Pesquisa financiado pelo CNPq. Processo CNPq 471202/01-0. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP.
- SZOKOLAY, S. V. (1987) *Thermal Design of Buildings*, RAI Education Division. Camberra, Austrália.
- UNITED Nations (1971). *Climate and House Design: design of low-cost housing and community facilities*. New York, Dep. Economic and Social Affairs, vol. 1.