

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME
PERIÓDICO: EFEITO DA INÉRCIA TÉRMICA
EM FECHAMENTOS OPACOS**

Ariovaldo Denis Granja

**Campinas
2002**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME
PERIÓDICO: EFEITO DA INÉRCIA TÉRMICA EM
FECHAMENTOS OPACOS**

Ariovaldo Denis Granja

Orientadora: Prof^{fa}. Dr^a. Lucila Chebel Labaki

Tese de doutorado apresentada à Comissão de pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, na área de concentração em Saneamento e Ambiente, linha de pesquisa em Conforto Ambiental.

**Campinas
2002**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

**TRANSMISSÃO DE CALOR EM REGIME
PERIÓDICO: EFEITO DA INÉRCIA TÉRMICA EM
FECHAMENTOS OPACOS**

Ariovaldo Denis Granja

Tese de Doutorado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Prof^a Dr^a Lucila Chebel Labaki

Presidente e Orientadora / FEC - Universidade Estadual de Campinas

Prof^a Dr^a Marcia Peinado Alucci

FAU - Universidade de São Paulo

Prof^a Dr^a Stelamaris Rolla Bertoli

FEC - Universidade Estadual de Campinas

Prof^a Dr^a Irenilza de Alencar Nääs

FEAGRI - Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Leandro Palermo Júnior

FEC - Universidade Estadual de Campinas

Campinas, 28 de fevereiro de 2002

AGRADECIMENTOS

À Lucila Labaki que orientou este trabalho, pelas suas idéias, pelo apoio em todos os momentos, e por mostrar o caminho a ser seguido.

À Doris Kowaltowski e ao F. W. Grimme, que despertaram meu interesse pela área.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), pelo fornecimento dos dados climáticos.

À Marcia Alucci e à Rosana Caram pelas sugestões por ocasião da qualificação.

Ao José Eduardo e ao Roberlei, que liberaram parte de meu tempo de dedicação profissional para poder realizar esta pesquisa.

À minha Família, pelo apoio em todos os momentos.

À Tereza, pela compreensão e encorajamento nos momentos necessários.

“As (coisas) frias esquentam, quente esfria, úmido seca, seco umedece.”
Heráclito (cerca de 540 – 470 A.C.)

SUMÁRIO

Folha de Rosto.....	ii
Página de aprovação	iii
Agradecimentos	iv
Epígrafe.....	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS	ix
RESUMO E ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	1
2 OBJETIVOS E HIPÓTESES.....	4
2.1 Objetivo geral.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
2.3 Hipóteses formuladas.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
3.1 Dias típicos de projeto para análise de desempenho térmico de edificações.....	6
3.2 Temperatura fictícia sol-ar (t_{sa})	8
3.3 Radiação solar e seu efeito sobre edificações	9
3.3.1 Obtenção de dados de radiação solar.....	10
3.3.2 Tempo solar e ângulos sol-terra	10
3.3.3 Relações empíricas para o cálculo da radiação solar incidente em superfícies horizontais.....	13
3.3.4 Relação entre radiação direta em superfícies inclinadas e em superfícies horizontais.....	16
3.4 Transmissão de calor em paredes e coberturas sob regime periódico	18
3.4.1 Efeito da variação da temperatura externa e da intensidade de radiação solar sobre edificações	19
3.4.2 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas homogêneas	22
3.4.3 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas	28
3.4.3.1 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas por dois materiais	32

3.4.3.2 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas por três materiais	35
3.4.3.3 Cálculo do fechamento homogêneo equivalente para um fechamento composto	39
3.4.4 Inércia térmica como estratégia de conforto e de eficiência energética em coberturas e paredes	41
4 METODOLOGIA	43
4.1 Dias típicos de verão e inverno de Campinas para análise térmica de edificações	44
4.2 Coeficientes de transmissão de calor de superfícies internas (h_i) e externas (h_e) para Campinas	45
4.3 Cálculo da temperatura sol-ar para os dias típicos de verão e inverno	46
4.4 Transmissão de calor em regime periódico e a inércia térmica	47
4.5 Desempenho de técnicas de resfriamento passivo	49
4.5.1 Cor da superfície externa	49
4.5.2 Isolantes térmicos	50
4.5.3 Câmaras de ar	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1 Dias típicos de verão e inverno representativos de Campinas, SP	52
5.2 Comportamento periódico da temperatura externa e da radiação solar em superfícies horizontais homogêneas	59
5.3 Dados da temperatura sol-ar para o dia típico de verão	60
5.4 Transmissão de calor em regime periódico e inércia térmica em fechamentos opacos homogêneos ..	65
5.5 Influência cromática sobre a transmissão de calor em fechamentos opacos	71
5.6 Transmissão de calor em fechamentos opacos compostos por isolantes térmicos	76
5.7 Transmissão de calor em fechamentos opacos compostos por câmaras de ar	87
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
APÊNDICE I: PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAS TÍPICOS DE PROJETO (VERÃO E INVERNO)	108
APÊNDICE II: PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA VARIAÇÃO HORÁRIA DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR	113
APÊNDICE III: ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SOL-AR	114
APÊNDICE IV: COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO DE CALOR DE SUPERFÍCIES INTERNAS (h_i) E EXTERNAS (h_e) PARA CAMPINAS	116
IV.1 Coeficiente de transmissão de calor de superfícies internas (h_i)	116
IV.2 Coeficiente de transmissão de calor de superfícies externas (h_e)	117

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1: Esquema para análise da transmissão de calor em regime periódico (adaptado de ALFORD <i>et alii</i> , 1939)	23
FIGURA 5.1: Valores horários da temperatura externa e da radiação solar em suas componentes difusa, direta e total, em superfície horizontal, dia típico de verão.....	60
FIGURA 5.2: Variação periódica da temperatura do ar externo e da temperatura sol-ar para o dia típico de verão em superfície horizontal.....	62
FIGURA 5.3: Convergência da temperatura sol-ar e sua representação através de séries de Fourier com um e dois harmônicos, dia típico de verão (superfície horizontal, $a = 0,4$).....	64
FIGURA 5.4: Solução gráfica para o EXEMPLO 1	68
FIGURA 5.5: Valores periódicos da temperatura na superfície interna para a laje do EXEMPLO 1 e a temperatura sol-ar	70
FIGURA 5.6: Relação entre cores e espessura de uma placa de concreto do EXEMPLO 4	75
FIGURA 5.7: Densidade de fluxo de calor para as configurações CI e IC do EXEMPLO 5.....	80
FIGURA 5.8: Temperatura na superfície interna para as configurações CI e IC do EXEMPLO 5.....	81
FIGURA 5.9: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 5$ cm. Solução gráfica para o EXEMPLO 6.....	84
FIGURA 5.10: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 10$ cm. Solução gráfica para o EXEMPLO 6.....	85
FIGURA 5.11: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 15$ cm. Solução gráfica para o EXEMPLO 6.....	85
FIGURA 5.12: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 5$ cm. Solução gráfica para o EXEMPLO 6.....	86
FIGURA 5.13: Densidade de fluxo de calor para o fechamento (C) e para o (CAC) com câmara de ar não ventilada. Solução gráfica para o EXEMPLO 7.....	91
FIGURA 5.14: Variação horária da densidade de fluxo de calor através do fechamento CAC, segundo diferentes relações de a/L . Solução gráfica para o EXEMPLO 8	99

LISTA DE TABELAS

TABELA 5.1: Percentis referentes ao grupo de “dias quentes - verão”	52
TABELA 5.2: Percentis referentes ao grupo de “dias frios - inverno”	53
TABELA 5.3: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 10%.....	54
TABELA 5.4: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 5%.....	54
TABELA 5.5: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 2,5%.....	55
TABELA 5.6: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 1%.....	55
TABELA 5.7: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 10%.....	56
TABELA 5.8: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 5%.....	56
TABELA 5.9: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 2,5%.....	57
TABELA 5.10: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 1%.....	57
TABELA 5.11: Dia típico de verão selecionado no percentil 1%.....	58
TABELA 5.12: Dia típico de inverno selecionado no percentil 1%.....	58
TABELA 5.13: Valores horários da temperatura externa e da radiação solar em suas componentes difusa, direta e total, em superfície horizontal, dia típico de verão.....	59
TABELA 5.14: Valores horários de temperatura sol-ar em superfície horizontal para o dia típico de verão, $a = 0,4, 0,7$ e $0,9$, $h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, $dR = 63 \text{ W/m}^2$	61
TABELA 5.15: Valores horários de temperatura sol-ar em superfície horizontal para o dia típico de verão, e valores por séries de Fourier, absorvância $a = 0,4$	63
TABELA 5.16: Coeficientes para as equações da temperatura sol-ar obtidas por análise de Fourier ($a = 0,4$)	65
TABELA 5.17: Coeficientes para temperatura sol-ar, obtidos por análise harmônica, $a=0,2$ (branco)	72
TABELA 5.18: Coeficientes para temperatura sol-ar, obtidos por análise harmônica, $a=0,7$ (cinza).....	72
TABELA 5.19: Coeficientes de amortecimento e atraso obtidos pelo “TRANSCALOR”, $d = 5\text{cm}$	73
TABELA 5.20: Coeficientes de amortecimento e atraso obtidos pelo “TRANSCALOR”, $d = 20\text{cm}$	73
TABELA 5.21: Valores obtidos pela planilha eletrônica “TRANSCALOR”	77
TABELA 5.22: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR”	78
TABELA 5.23: Valores obtidos para a equação da temperatura sol-ar para o dia típico de verão, através de análise harmônica (2 harmônicos) ($a = 0,7$).....	79
TABELA 5.24: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR”	79

TABELA 5.25: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” (EQUAÇÕES 3.96 e 3.99, respectivamente), para as três espessuras totais ($L = 5, 10$ e 15 cm), e para espessuras variáveis de isolante térmico ($l = 0,25L; l = 0,5L$ e $l = 0,75L$).....	83
TABELA 5.26: Valores máximos ($q_{\text{máx}}$) e mínimos ($q_{\text{mín}}$) da densidade de fluxo de calor para as três espessuras totais ($L = 5, 10$ e 15 cm), e para espessuras variáveis de isolante térmico ($l = 0,25L; l = 0,5L$ e $l = 0,75L$).....	83
TABELA 5.27: Valores obtidos para a equação da temperatura sol-ar para o dia típico de verão, através de análise harmônica (2 harmônicos) ($a = 0,9$).....	88
TABELA 5.28: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” (C)	88
TABELA 5.29: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” (CAC)	91
TABELA 5.30: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L \Rightarrow 0$).....	95
TABELA 5.31: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,25$).....	96
TABELA 5.32: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,50$).....	97
TABELA 5.33: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,75$).....	98
TABELA 5.34: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L \Rightarrow 1$).....	99
TABELA II.1: Fatores multiplicadores para o momento “h”	113
TABELA III.1: Análise harmônica da temperatura sol-ar (dia típico de verão – $a = 0,4$ – $dr = 63$ w/m ²)	115
TABELA IV.1: Valores de h_i adotados para Campinas	117
TABELA IV.2: Velocidades do vento (m/s) para Campinas	119
TABELA IV.3: Valores de troca de calor radiante (H_r) (W/m ² °C).....	119
TABELA IV.4: Valores do coeficiente de convecção térmica para superfícies verticais (W/m ² °C).....	119
TABELA IV.5: Valores do coeficiente de transmissão de calor para superfícies HORIZONTAIS externas h_e (W/m ² °C) – Campinas.....	120
TABELA IV.6: Valores do coeficiente de transmissão de calor para superfícies VERTICAIS externas h_e (W/m ² °C) – Campinas.....	121

RESUMO

Esta pesquisa representa uma contribuição à área de conforto térmico e de eficiência energética de edificações. Seu objetivo essencial foi descrever analiticamente o fenômeno da inércia térmica em fechamentos opacos de edificações em Campinas, SP. Caracterizou-se os dias típicos de projeto através das temperaturas sol-ar e de seus índices de transparência, e obteve-se valores horários de radiação solar incidente a partir de dados de horas de insolação diária. A abordagem da inércia térmica baseou-se em soluções periódicas para a equação diferencial parcial de condução de calor, em uma dimensão, por meio de séries de Fourier, com período de vinte e quatro horas. Como resultado, apresentou-se dados quantitativos locais da influência de parâmetros climáticos e termofísicos sobre este fenômeno. Conclui-se que a seleção de sistemas construtivos para os fechamentos opacos de edificações locais deve basear-se em seu efeito sobre a carga térmica de resfriamento, na sua capacidade de nivelamento dos picos de carga térmica e na sua consequência sobre o dimensionamento de eventual equipamento de condicionamento térmico ativo. Neste sentido, benefícios energéticos são possíveis através do uso da inércia térmica como técnica solar passiva em paredes externas e coberturas de edificações locais.

Palavras-chave: inércia térmica, regime periódico, coberturas, paredes, eficiência energética.

ABSTRACT

This research is a contribution to thermal comfort and energy efficiency of buildings. Its primary aim was to present an analytical description of the thermal inertia phenomenon in opaque envelope components of buildings of the area of Campinas, Brazil. Thermal inertia has been addressed using periodic solutions for the one-dimensional partial differential equation of heat conduction, by means of Fourier analysis for twenty-four hours period. As result, quantitative data were presented in order to show the influence of climatic and thermophysical parameters on the phenomenon. It was concluded that the selection of local opaque envelope components should be based in their effect on cooling loads, in their ability for thermal load leveling and on the consequence for an eventual air-conditioning system. In this sense, it is possible to obtain energy savings by using thermal inertia as a passive solar technique for external walls and roofs of local buildings.

Key-words: thermal inertia, periodic heat flow, roofs, walls, energy efficiency.

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A chegada do novo milênio tem provocado uma conscientização maior no trato das questões ambientais. Se aplicadas já na concepção de projetos, diretrizes de conforto ambiental podem elevar a satisfação do usuário final, bem como promover a eficiência energética das edificações. Especificamente, o conforto térmico em edificações da região de Campinas, SP merece atenção deste trabalho, dado seu impacto imediato na percepção de conforto do usuário. Até há pouco tempo, grande parcela do conhecimento da área originou-se de pesquisas realizadas em países industrializados, sendo que boa parte destas nações apresenta contextos climáticos e sócio-culturais diferentes de nosso país. Algumas tecnologias desenvolvidas em regiões de clima frio foram absorvidas irrefletidamente pelo mercado da construção civil nacional, gerando ganhos térmicos elevados e desnecessários.

Estratégias de conforto térmico, para serem eficazes, pressupõem uma caracterização precisa do clima da região em estudo. Neste contexto, o clima de Campinas enquadra-se numa situação intermediária entre o quente e seco e o quente e úmido, dificultando a elaboração de recomendações padronizadas. Estudos específicos são, portanto, necessários para obtenção de melhores resultados para este tipo de clima. Sua descrição possibilitará a seleção de novas tecnologias, especificação de materiais e desenvolvimento de projetos climaticamente adaptados.

O fenômeno da inércia térmica apresenta-se como uma técnica solar passiva promissora ao clima da região (CHVATAL, 1998). Para sua compreensão, as interações qualitativas e quantitativas da onda de calor com os fechamentos opacos necessitam melhor elucidação. Diversos fatores climáticos, além das propriedades termofísicas inerentes aos materiais do fechamento, afetam estas interações, e, portanto, interferem na retenção e na mobilidade da onda térmica. Entre estes fatores e propriedades, pode-se mencionar:

- I. As variações da temperatura do ar externo e da incidência de radiação solar no fechamento,
- II. A variação da temperatura do ar interno,
- III. Os coeficientes de transmissão de calor das superfícies interna e externa do fechamento,
- IV. A absorptância à radiação solar da superfície externa do fechamento,
- V. A emissividade de radiação de onda longa da superfície interna do fechamento,
- VI. A espessura, a condutividade térmica dos materiais e a capacidade térmica volumétrica do fechamento.

Dentre estes itens, IV, V e VI estão sob controle total ou parcial do projetista, razão pela qual seus efeitos merecem ser investigados. Os itens remanescentes, por sua vez, estão à mercê de fatores climáticos, dificultando a ação de controle do projetista.

A espessura e a massa específica aparente exercem grande influência na variação da temperatura da superfície interna de fechamentos homogêneos. Fechamentos compostos, por sua vez, apresentam comportamentos distintos conforme a ordem de disposição das camadas. No caso de fechamentos compostos de duas camadas, materiais com pouca espessura e baixa condutividade térmica, posicionados na face externa, eliminam a necessidade de grandes espessuras do fechamento para um bom desempenho térmico. Câmaras de ar constituem barreiras à passagem da onda térmica, e podem compor fechamentos com três ou mais camadas. Quantitativamente, porém, há pouco conhecimento sobre o grau de influência de cada parâmetro, isoladamente, no desempenho térmico destes fechamentos. Depende-se, portanto, de sua obtenção para conceber-se fechamentos térmica e energeticamente mais eficientes.

Diversos métodos analíticos baseados na solução da equação de condução de calor unidimensional, proposta por Fourier, através da concepção de condições de contorno adequadas, têm sido propostos. A consideração do grande número de variáveis envolvidas na solução da equação da condução de calor mostra-se pouco produtiva. Porém, assumindo-se soluções periódicas, é possível se chegar a expressões que descrevem o comportamento das variáveis de interesse. O uso de métodos analíticos torna possível a ampliação do conhecimento existente sobre o fenômeno da inércia térmica através da relação de causa-e-efeito entre as variáveis.

Adicionalmente à sua importância para o conforto térmico, a obtenção de valores de densidade de fluxo de calor e de temperatura na superfície interna de fechamentos opacos oferece informações mais confiáveis sobre a qualidade de um sistema de parede ou cobertura, uma vez que o procedimento tradicional de cálculo com base nas diferenças de temperaturas externas e internas, e nos respectivos atrasos térmicos, é influenciado por variáveis não relacionadas ao fechamento opaco em si. No Brasil, estudos analíticos neste sentido ainda são incipientes. Para a região de Campinas inexistia um estudo detalhado sobre a influência de parâmetros climáticos e termofísicos na propagação, amortecimento e atraso da onda de calor através de fechamentos opacos, o que torna a questão do efeito da inércia térmica em edificações locais uma área de pesquisa aberta à investigação.

2 OBJETIVOS E HIPÓTESES

Esta pesquisa pretende oferecer uma contribuição à área de conforto ambiental, mais precisamente em conforto térmico de edificações, fornecendo subsídios para desenvolvimento de projetos climaticamente adaptados e energeticamente eficientes.

2.1 Objetivo geral

Estudar analiticamente o fenômeno da inércia térmica de fechamentos opacos em edificações na região de Campinas.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar modelos analíticos de transmissão de calor em regime periódico, buscando relações de causa-e-efeito entre parâmetros relacionados à inércia térmica,
- Caracterizar o contexto climático local, definindo dias típicos de projeto de verão e inverno para cálculo de irradiância solar em fechamentos opacos,
- Estudar a influência cromática sobre a transmissão de calor em fechamentos opacos,
- Estudar o comportamento de material isolante incorporado ao fechamento,
- Estudar o efeito da adição de câmara de ar ao fechamento.

2.3 Hipóteses formuladas

Com base no modelo analítico de transmissão de calor em regime periódico, espera-se confirmar as seguintes hipóteses relacionadas ao fenômeno da inércia térmica em fechamentos opacos:

- Diminui a influência cromática na transmissão de calor, conforme se aumenta a espessura do fechamento,
- Existe uma espessura ideal de isolante térmico a ser utilizada no fechamento, de forma a atenuar os picos máximos e mínimos de carga térmica,
- O método do fechamento homogêneo equivalente (MACKEY e WRIGHT, 1946) será capaz de confirmar que a atenuação dos picos máximos e mínimos de carga térmica em um fechamento CAC (concreto-câmara de ar-concreto) é maior, conforme diminui-se a espessura da placa de concreto em contato com o ar exterior, mantendo-se a espessura total de concreto (SODHA *et alii*, 1980).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As equações para as trocas de calor em regime permanente, entre a envolvente de uma edificação e o ambiente externo, pressupõem situações bastante particulares. A transmissão de calor em regime permanente raramente ocorre em situações reais, devido às contínuas flutuações no ambiente térmico externo. Outro fator que não pode ser negligenciado no estudo da transmissão de calor em fechamentos opacos é a capacidade de armazenamento de calor dos materiais que constituem a envolvente da edificação.

A variação cíclica da temperatura externa e da radiação solar, associada à capacidade de armazenamento de calor pelos elementos construtivos da envolvente, reflete uma situação mais próxima da realidade e caracteriza o estudo da transmissão de calor em regime periódico.

3.1 Dias típicos de projeto para análise de desempenho térmico de edificações

Para o melhor conhecimento do clima da região em estudo, são necessários dados confiáveis de variáveis climáticas e de radiação solar. No Brasil, duas metodologias se destacam no tratamento de dados climáticos para definição de dias típicos de projeto, destinados à construção civil: a do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) (AKUTSU *et alii*, 1987) e a de Miguel Sattler (SATTLER, 1990). As principais diferenças entre as duas metodologias são as seguintes (GOULART, 1993):

- A metodologia do IPT utiliza temperaturas máximas diárias para o período de verão e temperaturas mínimas diárias para o período de inverno, enquanto que a de Sattler emprega temperaturas médias diárias.
- Os períodos de verão e de inverno são definidos pelos meses mais quentes e pelos mais frios do ano, de acordo com o IPT, enquanto que Sattler define períodos quentes e frios segundo os dias mais quentes e mais frios do ano.
- A metodologia do IPT define o dia de projeto como um dia real, dentro de um intervalo de $\pm 0,5$ °C em torno da temperatura do dia de referência. A metodologia de Sattler define o dia típico como um dia fictício, com base na média das variáveis climáticas dos dias situados dentro de um intervalo de 1% do número de dias do conjunto analisado.

Ainda segundo GOULART, 1993, a amplitude de temperatura influencia os resultados nos dois métodos, pois dias com amplitudes muito acima da média do período podem enquadrar-se em diferentes intervalos, gerando dias típicos de diferentes níveis de frequência de ocorrência. Por esta razão, os dias típicos obtidos em função das temperaturas médias (SATTTLER, 1990) aparentemente são mais indicados para aplicações em edificações, uma vez que apresentam amplitudes de temperatura dentro de uma faixa maior de frequência de ocorrência.

O período mínimo recomendado para definição de dias típicos de projeto é de 10 anos, porém, dada a dificuldade de obtenção de registros contínuos de variáveis climáticas, especialmente dados de radiação solar incidente, períodos menores (5 anos) são usualmente adotados. No método de Sattler adota-se normalmente a temperatura do ar como parâmetro de referência. Caso existam registros contínuos de radiação solar incidente, pode-se utilizar alternativamente a temperatura fictícia sol-ar (t_{sa}) como parâmetro. O conceito da temperatura sol-ar tem importância central no estudo da influência da radiação solar incidente em elementos construtivos e será aprofundado adiante. Para cada dia típico indica-se também uma data de referência correspondente ao dia cuja declinação solar (δ), mais se aproxime da média das declinações solares das datas consideradas para definição dos dias típicos. É importante conhecer-se as datas de referência para se estimar os valores de irradiância solar na envolvente da edificação.

3.2 Temperatura fictícia sol-ar (t_{sa})

A transmissão de calor na superfície externa de elementos de uma edificação expostos à radiação solar é obviamente maior do que quando elementos similares não estão sujeitos à radiação. Mesmo sob condições de regime permanente, além do produto da transmitância pela diferença de temperatura, a densidade do fluxo de calor é determinada também pelo termo correspondente à radiação solar incidente, o qual depende da energia solar absorvida pelas superfícies. Nestas condições, a densidade de fluxo de calor sofre influência também da temperatura da superfície externa do elemento (van STRAATEN, 1967).

Levando-se em consideração este quadro físico, foi concebido o conceito da temperatura equivalente do ar externo, posteriormente renomeada para temperatura fictícia sol-ar (este termo será chamado simplesmente de temperatura sol-ar daqui por diante). Ela pode ser definida como a temperatura do ar externo, que em contato com superfícies à sombra de qualquer material que não transmita radiação solar diretamente, causaria o mesmo fluxo de transmissão de calor e a mesma distribuição de temperatura através daquele material, quando exposto às condições existentes de temperatura do ar externo e da radiação solar incidente naquelas superfícies (MACKEY e WRIGHT, 1943). A expressão para a temperatura sol-ar é dada por:

$$t_{sa} = t_e + \frac{\alpha \cdot I}{h_e} - \frac{\epsilon \cdot \delta R}{h_e} \quad (3.1)$$

onde,

t_{sa} = temperatura sol-ar (°C)

t_e = temperatura do ar externo (°C)

α = absortância da superfície à radiação solar (adimensional)

I = intensidade da radiação solar incidente (W/m²)

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa (W/m²°C)

δR = diferença entre a radiação de onda longa incidente na superfície através da abóbada celeste e entorno, e a radiação emitida por um corpo negro submetido à temperatura atmosférica (W/m²). No caso de superfícies verticais, este valor é nulo, restringindo-se a

equação 3.1 aos dois primeiros termos. No caso de superfícies horizontais, este valor corresponde a 63 W/m^2 (ASHRAE, 1989).

ϵ = emissividade de radiação de onda longa pela superfície externa (adimensional).

A temperatura sol-ar combina, portanto, os efeitos da temperatura do ar e da radiação solar sobre a densidade de fluxo de calor no ambiente externo. Como exemplo de aplicação, supondo-se uma intensidade de radiação solar incidente de $300,0 \text{ W/m}^2$ numa superfície horizontal com absorptância à radiação solar $\alpha = 0,4$ e coeficiente de transmissão na superfície $h_e = 25,0 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$, o efeito da radiação solar através do material e sobre a distribuição de temperatura naquele material seria o mesmo se a temperatura do ar exterior fosse $4,8 \text{ }^\circ\text{C}$ mais elevada do que a da mesma superfície quando à sombra. Dada sua influência na expressão da temperatura sol-ar, trata-se a seguir da obtenção de dados relativos à radiação solar e maneiras de convertê-los em valores horários.

3.3 Radiação solar e seu efeito sobre edificações

O contexto climático de uma localidade resulta do efeito combinado da radiação solar e de outros fatores meteorológicos. Fatores físicos como topografia e correntes marítimas podem exercer forte influência sobre o clima de uma localidade. A radiação solar merece atenção especial em pesquisas de conforto, uma vez que o uso correto dessa energia pode representar uma ferramenta poderosa ao projetista com consciência ambiental. Infelizmente observa-se com bastante frequência em edificações de nosso país a utilização inadequada desta fonte de energia.

O controle ineficiente da insolação em edificações pode trazer sérios problemas de conforto térmico, e exigir um aporte suplementar de energia na forma de condicionamento artificial, para que a edificação se enquadre em padrões adequados aos usuários. Portanto, conhecimentos sobre a radiação solar, e de como utilizá-la e controlá-la, são indispensáveis para a concepção de um projeto ambientalmente correto.

3.3.1 Obtenção de dados de radiação solar

Para o aproveitamento consciente da energia solar, necessita-se primeiramente obter dados na região de atuação do projetista. Dados de radiação solar são a melhor fonte de informação para estimar-se a radiação média incidente, porém são poucas as estações que dispõem de registros contínuos destes. Na falta destes registros, é possível utilizar relações empíricas para estimativas de radiação a partir do número de horas de insolação diária ou de nebulosidade. Dados relativos à nebulosidade são facilmente obtidos, porém são registros baseados em observações visuais e seu uso científico provavelmente é menos rigoroso do que o uso do número de horas de insolação. Para o registro de dados do número de horas de insolação utiliza-se normalmente medições instrumentais, que oferecem informações mais precisas do que as observações visuais necessárias para registros de nebulosidade.

3.3.2 Tempo solar e ângulos sol-terra

Os cálculos de radiação solar devem ser feitos em termos do tempo solar, que por sua vez não coincide com a contagem de tempo padrão. O tempo solar é baseado no movimento angular aparente do sol no céu. O meio-dia solar corresponde ao momento em que o sol cruza o meridiano onde está localizado o observador. A expressão que relaciona o tempo solar com o tempo padrão é dada por (DUFFIE e BECKMAN, 1991):

$$\text{tempo solar} = \text{tempo padrão} + 4(L_p - L_{loc}) + E \quad (3.2)$$

onde,

L_p = meridiano padrão para a zona de tempo local (°)

L_{loc} = longitude do local em questão (° Oeste)

E = equação do tempo dada por:

$$E = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad (3.3)$$

sendo que B é dado por:

$$B = \frac{360(n-81)}{364} \quad (3.4)$$

n = número de ordem do dia do ano (1° de janeiro, n=1)

A seguir, são apresentados os ângulos sol-terra necessários aos cálculos de radiação solar na seqüência do trabalho, bem como as convenções de sinal adotadas por DUFFIE e BECKMAN, (1991).

A declinação (δ) que fornece a posição angular do sol ao meio-dia, tempo-solar, com respeito ao plano do equador é dada por:

$$\delta = 23,45 \text{sen} \left[\frac{360(284 + n)}{365,24} \right] \quad (3.5)$$

onde,

n = número de ordem do dia do ano (1° de janeiro, n=1), $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$

A latitude (ϕ) é a localização angular ao norte ou ao sul do equador, com $\phi < 0$ para o hemisfério sul, por convenção, $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$.

O azimute (γ) é o desvio de projeção num plano horizontal da normal à superfície a partir do meridiano local:

$-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ (sul: $\gamma=0$, leste: $\gamma<0$, oeste: $\gamma>0$).

A inclinação (β) é dada pelo ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal.

$0 \leq \beta \leq 180^\circ$ ($\beta > 90^\circ$ significa que a superfície possui um componente com a face descendente, no caso de estar-se considerando o cálculo de coletores de energia solar).

O ângulo entre a direção de incidência da radiação direta numa superfície e a normal àquela superfície (θ) é dado pela expressão:

$$\begin{aligned}\cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega\end{aligned}\quad (3.6)$$

O ângulo horário (ω) é o deslocamento angular do sol a leste ou oeste do meridiano local devido à rotação da terra em torno de seu eixo à razão de 15° por hora,

$$\omega = \frac{360(t - 12)}{24} \quad (3.7)$$

onde,

t = hora padrão do dia, sendo que ω é negativo para o período da manhã e positivo para o da tarde.

O ângulo de incidência do sol no zênite (θ_z) pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$\cos \theta_z = (\cos \delta \cos \phi \cos \omega + \sin \delta \sin \phi) \quad (3.8)$$

O ângulo horário do anoitecer (ω_s) é dado por:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3.9)$$

Finalmente, o número médio total de horas de insolação possíveis (N), função do ângulo horário do anoitecer é dado pela expressão:

$$N = \frac{2\omega_s}{15} + 0,1 \quad (3.10)$$

Todos estes ângulos e expressões são necessários para o cálculo da radiação solar incidente a partir das relações empíricas dadas a seguir.

3.3.3 Relações empíricas para o cálculo da radiação solar incidente em superfícies horizontais

Uma metodologia para obtenção de valores médios diários, bem como de respectivas médias horárias de radiação solar global, direta e difusa foi desenvolvida por LABAKI, (1995). Seu trabalho baseou-se em DUFFIE e BECKMAN, (1991) para o cálculo da radiação solar global incidente em superfícies horizontais e em LIU e JORDAN, (1960), para o cálculo das médias diárias e horárias de radiação direta e difusa.

Para o cálculo da radiação global (G_0), e de suas componentes direta e difusa, é conveniente utilizar níveis de radiação normalizados, isto é, relacionar os níveis de radiação com aquele teoricamente possível se não houvesse atenuação pela atmosfera. Em qualquer instante no tempo, a radiação solar no topo da atmosfera, incidente num plano horizontal é dada pela expressão:

$$G_0 = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365,24} \right) \right] \cos \theta_z \quad (3.11)$$

onde,

G_{sc} = constante solar, 1.353 W/m^2

n = número de ordem do dia do ano (1° de janeiro, $n=1$)

θ_z = ângulo de incidência do sol no zênite ($^\circ$)

Para se calcular a radiação solar total (H_0), necessita-se da radiação extraterrestre numa superfície horizontal por todo o período diário de insolação:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365,24} \right) \right] (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta) \quad (3.12)$$

onde,

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \frac{\pi}{180^\circ} \text{ (radianos)} \quad (3.13)$$

A média mensal da radiação solar total diária incidindo em um plano horizontal ao nível do solo pode ser obtida pela equação de Ångström:

$$\frac{H_t}{H_o} = a + b \left(\frac{s}{N} \right) = K_t \quad (3.14)$$

onde,

H_t = radiação total incidente em uma superfície horizontal (W/m^2)

a = coeficiente linear empírico (p/ Campinas, $a=0,25$), (LABAKI, 1995) (adimensional)

b = coeficiente angular empírico (p/ Campinas, $b=0,56$), (LABAKI, 1995) (adimensional)

s = média do número de horas de insolação no período considerado (h)

N = número médio total de horas de insolação possíveis (h) (EQUAÇÃO 3.9)

A relação $K_t = H_t/H_o$ é chamada de índice de transparência. Valores de K_t para dias claros situam-se na faixa de 0,75 ou mais, e para dias considerados nublados na faixa de 0,40 ou menos (LIU e JORDAN, 1960). Para obter-se a relação entre os coeficientes K_t e K_d (EQUAÇÃO 3.16), utiliza-se o polinômio de 3º grau apresentado por LABAKI, (1995):

$$K_d = 0,2038345 - 0,3259358 K_t + 1,148309 K_t^2 - 1,137844 K_t^3 \quad (3.15)$$

Define-se ainda as seguintes relações:

Relação entre a média mensal da radiação difusa diária e a radiação extraterrestre numa superfície horizontal (K_d):

$$K_d = \frac{H_d}{H_o} \quad (3.16)$$

A relação entre a radiação total horária e a radiação total diária é dada por:

$$r_t = (a + b \cos \omega) r_d \quad (3.17)$$

onde,

$$a = 0,4090 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.18)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (3.19)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left(\frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{2\pi \omega_s}{360} \cos \omega_s} \right) \quad (3.20)$$

A média da intensidade horária de radiação difusa é obtida por:

$$I_d = r_d \cdot H_d \quad (3.21)$$

A intensidade média de radiação global horária será:

$$I_t = r_t \cdot H_t \quad (3.22)$$

Fazendo-se a diferença entre as médias das radiações total e difusa, tanto para valores diários como para os horários, obtém-se as médias de radiação direta:

$$H_b = H_t - H_d \quad (3.23)$$

$$I_b = I_t - I_d \quad (3.24)$$

3.3.4 Relação entre radiação direta em superfícies inclinadas e em superfícies horizontais

Além dos cálculos de radiação solar em superfícies horizontais, o projetista com preocupação em conforto ambiental necessita dos valores de radiação incidente em superfícies inclinadas, particularmente em superfícies verticais. A radiação total incidente em uma superfície inclinada é composta de três elementos: direta, difusa e refletida pelo solo. O fator geométrico R_b estipula a relação entre a radiação direta horária (ou instantânea) numa superfície inclinada e a radiação direta horária (ou instantânea) numa superfície horizontal. Segundo REINDL, BECKMAN e DUFFIE, (1990), esta relação é dada por:

$$R_b = \frac{I_{b,v}}{I_b} = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (3.25)$$

onde,

$I_{b,v}$ = radiação direta incidente numa superfície inclinada (W/m^2)

I_b = radiação direta incidente em superfície horizontal no período (W/m^2)

No trabalho citado, os autores comparam um modelo isotrópico e quatro anisotrópicos para cálculo de radiação horária em superfícies inclinadas ¹. Todos os modelos supõem a parcela de radiação direta através do uso do coeficiente R_b (EQUAÇÃO 3.25), e que a parcela de radiação refletida pelo solo tem comportamento isotrópico. A diferença entre os métodos pode ser percebida no modo de tratamento da parcela de radiação difusa. Segundo a pesquisa, o modelo isotrópico apresentou o pior desempenho, e sua utilização não é recomendada. Os quatro modelos anisotrópicos apresentam desempenho semelhante, diferenciando-se entre si apenas pela maior ou menor dificuldade no tratamento matemático.

¹ A parcela de radiação difusa é difícil de modelar, uma vez que sua distribuição espacial é desconhecida e dependente do tempo. O modelo isotrópico pressupõe que a parcela de radiação difusa é uniformemente distribuída na abóbada celeste. Já o modelo anisotrópico divide esta parcela em três sub-componentes: a componente circumsolar, uma componente mais brilhante próxima ao horizonte e aquela isotrópica uniformemente distribuída na abóbada celeste.

Um novo modelo para cálculo de radiação solar incidente foi apresentado, resultado de adições ao modelo de HAY e DAVIES, (1980) apud REINDL *et alii*, (1990) com contribuições de KLUCHER, (1979) (modelo HDKR). Sua formulação é dada a seguir:

$$I_o = \frac{12}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365,24} \right) \right] \cdot \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega) + \left(\frac{\pi}{180} \right) \omega \sin \phi \sin \delta \right] \quad (3.26)$$

onde,

$\omega = 15^\circ/\text{h}$ ou $0,2618 \text{ rad/h}$.

$$I_{d,v} = I_d \left\{ \left[(1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right] + (A_i R_b) \right\} \quad (3.27)$$

$$I_{t,v} = [(I_b + I_d \cdot A_i) \cdot R_b] + \left[I_d \cdot (1 - A_i) \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \cdot \left(1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right) \right] + \left[I_t \cdot \rho_g \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \right] \quad (3.28)$$

onde,

I_o = radiação extraterrestre numa superfície horizontal em período horário (W/m^2)

$I_{t,v}$ = radiação total incidente numa superfície inclinada (W/m^2)

$I_{b,v}$ = radiação direta incidente numa superfície inclinada (W/m^2)

$I_{d,v}$ = radiação difusa incidente em uma superfície inclinada (W/m^2)

I = radiação total incidente em superfície horizontal no período (W/m^2)

I_b = radiação direta incidente em superfície horizontal no período (W/m^2)

I_d = radiação difusa incidente em superfície horizontal no período (W/m^2)

β = ângulo entre o plano da superfície em questão e a horizontal ($^\circ$)

R_b = relação entre a radiação direta horária numa superfície inclinada e na horizontal
(EQUAÇÃO 3.25)

A_i = índice anisotrópico, $A_i = \frac{I_b}{I_o}$ (adimensional)

f = termo de correção para modulação do brilho difuso no horizonte, $f = \sqrt{\frac{I_b}{I}}$

(adimensional)

ρ_g = refletância difusa do solo, assumido como 0,6 (adimensional)

A relação entre as radiações total, direta e difusa é dada pela expressão:

$$I_{t,v} = I_{b,v} + I_{d,v} \quad (3.29)$$

3.4 Transmissão de calor em paredes e coberturas sob regime periódico

Dependendo da concepção arquitetônica da envolvente de uma edificação, a transmissão de calor através de seus fechamentos opacos e a radiação solar transmitida diretamente através de superfícies envidraçadas podem exigir um elevado condicionamento térmico artificial.

Enfocando-se a transmissão de calor em regime permanente em um fechamento opaco, a densidade de fluxo de calor que atinge a superfície externa é a mesma que deixa uma área de mesma proporção na superfície oposta; não se considera a capacidade de armazenamento de calor pelo fechamento. Com relação aos materiais que os compõem, pode-se afirmar que dois fechamentos possuem características idênticas em regime permanente quando: a absorptância à radiação solar da superfície externa de ambos é a mesma, a relação entre a espessura do fechamento e a condutividade térmica é igual e a emissividade da superfície interna é a mesma (MACKEY e WRIGHT, 1943).

Se o fechamento em questão possui alguma capacidade de armazenamento térmico, pode-se inferir que as condições de transmissão de calor em regime permanente ocorrem somente em situações particulares. Portanto, pode-se afirmar que as condições em regime permanente representam a exceção e não a regra (MACKEY e WRIGHT, 1943).

3.4.1 Efeito da variação da temperatura externa e da intensidade de radiação solar sobre edificações

Os parâmetros temperatura externa e intensidade de radiação solar estão sujeitos a variações erráticas ao longo do dia. No entanto, limitando-se a análise a dias claros (índice de transparência, $K_t > 0,75$), a intensidade da radiação solar incidente sobre uma superfície pode ser considerada periódica. De maneira análoga, pode-se assumir também que a temperatura do ar externo apresenta caráter periódico. A análise a seguir supõe a temperatura do ambiente interno mantida constante, e que a temperatura do ar externo e a intensidade de radiação solar assumem variações periódicas ao longo do dia (THRELKELD, 1970).

Para o cálculo da transmissão de calor a partir do ambiente externo, é conveniente incluir-se os efeitos da temperatura do ar externo e da intensidade de radiação solar em uma única expressão. A densidade de fluxo de calor a partir do ambiente externo para a superfície externa de uma parede ou cobertura é dada pela seguinte expressão:

$$q = h_e(t_e - t_{s,e}) + \alpha I \quad (3.30)$$

onde,

q = densidade de fluxo de calor (W/m^2)

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

t_e = temperatura do ar externo ($^\circ C$)

$t_{s,e}$ = temperatura da superfície externa ($^\circ C$)

α = absorptância à radiação solar (adimensional)

I = intensidade da radiação solar incidente (W/m^2)

Pela equação 3.1 para a temperatura fictícia sol-ar (t_{sa}),

$$t_{sa} = t_e + \frac{\alpha I}{h_e} \therefore t_e = t_{sa} - \frac{\alpha I}{h_e} \quad (3.31)$$

então, substituindo a EQUAÇÃO 3.29 na EQUAÇÃO 3.28,

$$q = h_e \left(t_{sa} - \frac{\alpha I}{h_e} - t_{s,e} \right) + \alpha I, \text{ ou,}$$

$$q = h_e (t_{sa} - t_{s,e}) \quad (3.32)$$

A temperatura sol-ar (t_{sa}), como já visto em 3.2, combina o efeito periódico e repetitivo em ciclos de 24 horas da temperatura do ar externo (t_e) e da intensidade de radiação solar incidente (I). Portanto, fazendo-se uma analogia com os circuitos elétricos, as fontes do circuito térmico em questão serão representadas pela temperatura do ar exterior e pela intensidade de radiação solar.

De acordo com a teoria de condução de calor desenvolvida por Fourier, qualquer função periódica $f(t)$ pode ser expressa por uma série infinita da forma:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega_T t + b_n \sin n \omega_T t) \quad (3.33)$$

onde os coeficientes para uma dada função $f(t)$, de período T , são calculados por:

$$\omega_T = \frac{2\pi}{T} \quad (3.34)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.35)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n \omega_T t dt \quad (3.36)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n \omega_T t dt \quad (3.37)$$

Deve-se observar que o coeficiente a_0 é duas vezes a média da função $f(t)$ sobre o período T , e que a_n e b_n são chamados de coeficientes de Fourier. Uma forma alternativa para as séries de Fourier, incorporando o ângulo de fase Ψ_n , é dada por:

$$f \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \cos(n \omega_T + \psi_n) \quad (3.38)$$

onde,

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad n=1,2,\dots \quad (3.39)$$

$$\psi_n = \arctan\left(\frac{-b_n}{a_n}\right) \quad n=1,2,\dots \quad (3.40)$$

Assumiu-se uma variação periódica diária da temperatura fictícia sol-ar (t_{sa}), portanto se $t_{sa}=f(\theta)$, onde θ é o número de horas medido a partir da meia-noite solar (3.3.2), obtém-se (THRELKELD, 1970):

$$t_{sa} = t_{sa,m} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \omega_n \theta + b_n \sin \omega_n \theta \quad (3.41)$$

onde, para $T=24$ h,

$$t_{sa,m} = \frac{1}{24} \int_0^{24} t_{sa} d\theta \quad (3.42)$$

$$a_n = \frac{1}{12} \int_0^{24} t_{sa} \cos \omega_n \theta d\theta \quad (3.43)$$

$$b_n = \frac{1}{12} \int_0^{24} t_{sa} \sin \omega_n \theta d\theta \quad (3.44)$$

$$\omega_1 = \frac{2\pi}{24} \text{ (radianos)} \quad (3.45)$$

$$\omega_n = n \omega_1 \quad (3.46)$$

Seguindo a fórmula 3.38, e invertendo-se o sinal de ψ_n , por conveniência, pode-se escrever alternativamente:

$$t_{sa} = t_{sa,m} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cos(\omega_n \theta - \psi_n) \quad (3.47)$$

ou:

$$t_{sa} = t_{sa,m} + \sum_{n=1}^{\infty} t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n) \quad (3.48)$$

onde,

$t_{sa,n}$ = amplitude ou temperatura sol-ar nos harmônicos, $n=1,2,\dots(^{\circ}\text{C})$

$$\psi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right), \text{ ângulo de fase para a temperatura sol-ar } (^{\circ} \text{ ou radianos}) \quad (3.49)$$

Na equação 3.47, o quadrante referente a ψ_n é determinado pela condição que $\sin \psi_n$ tenha o sinal de b_n e $\cos \psi_n$ tenha o sinal de a_n .

Este método, apresentado por THRELKELD, (1970), seguindo pesquisas precedentes de ALFORD *et alii*, (1939) e MACKEY e WRIGHT, (1944), pode ser utilizado para o cálculo da variação periódica da temperatura fictícia sol-ar (t_{sa}) para dias claros. A variação periódica de t_{sa} para uma superfície horizontal pode ser representada adequadamente por séries de Fourier contendo dois harmônicos (o método numérico para cálculo dos coeficientes harmônicos para cálculo da temperatura sol-ar encontra-se no Apêndice III). Entretanto, a variação de t_{sa} para superfícies verticais, em suas diferentes orientações, difere do comportamento puramente senoidal e seis ou mais harmônicos podem ser necessários.

3.4.2 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas homogêneas

Considera-se a seguir o fenômeno da transmissão de calor em regime periódico através de uma parede ou cobertura constituída de material homogêneo. Uma síntese de metodologias para cálculo da transmissão de calor em regime periódico pode ser encontrada em GIVONI, (1981). Esta

pesquisa adota a metodologia proposta por ALFORD *et alii*, (1939), seguindo uma analogia com a teoria dos circuitos elétricos. A FIGURA 3.1 ilustra esquematicamente o problema físico:

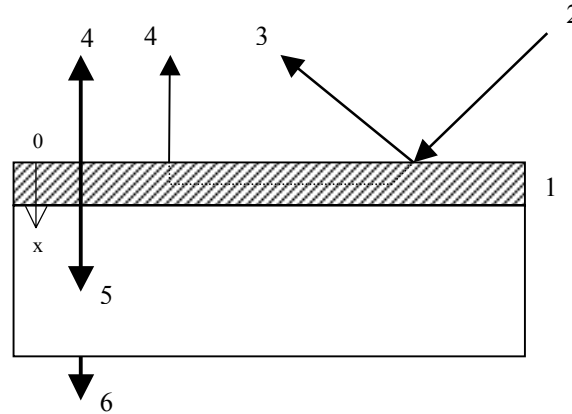


FIGURA 3.1: Esquema para análise da transmissão de calor em regime periódico (adaptado de ALFORD *et alii*, 1939)

onde,

1 = superfície externa da parede com absorvância α à radiação solar,

2 = radiação solar incidente $I(\text{W}/\text{m}^2)$,

3 = radiação solar refletida $(1-\alpha)I$ (W/m^2),

4 = saldo da energia térmica dissipada pela superfície externa por convecção e radiação $[h_e(t_{s,e} - t_e)]$,

5 = densidade de fluxo de calor através da parede, parcialmente armazenado para aquecimento da parede e parcialmente transmitido para a superfície interna,

6 = densidade de fluxo de calor da superfície interna da parede para o interior

$q_i = h_i(t_{s,i} - t_i)$.

Para a análise do problema, são assumidas as seguintes condições (THRELKELD, 1970):

- A parede possui altura e comprimento infinitos, e o fluxo de calor ocorre apenas na direção x ,

- A parede é constituída de material homogêneo,
- Os coeficientes de superfície h_e e h_i são constantes,
- A absorção solar da superfície externa é constante e independe do ângulo de incidência dos raios solares,
- A variação de t_e e I é periódica e assumida como repetitiva em dias consecutivos,
- A temperatura do ambiente interno é constante.

De acordo com estas condições, a forma válida para a densidade de fluxo de calor em qualquer ponto da parede, em função da variação temporal θ , é dada pela equação de condução de calor unidimensional, proposta por Fourier:

$$\left(\frac{\lambda}{\rho c}\right) \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}\right) = \frac{\partial t}{\partial \theta} \quad (3.50)$$

onde,

λ = condutividade térmica do material (W/m °C)

ρ = massa específica aparente do material da parede (kg/m³)

c = calor específico do material da parede (kJ/kg °C)

$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho c}$ = difusividade térmica do material da parede (m²/s)

A equação 3.50 indica que a diferença entre o fluxo de calor que “entra” e o que “saí” de um componente com espessura elementar ∂x causa uma elevação de temperatura que dependerá da capacidade térmica volumétrica (ρc). Para solucioná-la, deve-se submetê-la a duas condições de contorno, a saber:

Na superfície interna ($x=d$),

$$q_i = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x}\right)_{x=d} = h_i (t_{s,i} - t_i) \quad (3.51)$$

onde,

q_i = densidade de fluxo de calor para o interior

h_i = coeficiente de transmissão de calor da superfície interna

$t_{s,i}$ = temperatura da superfície interna da parede

t_i = temperatura interna

λ = condutividade térmica do material

Esta condição indica que o fluxo de calor através do elemento mais interno ao fechamento é igual àquele transmitido por convecção (e radiação) para dentro do cômodo.

Na superfície externa ($x=0$)²

$$q_e = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial x} \right)_{x=0} = h_e (t_{sa} - t_{s,e}) \quad (3.52)$$

onde,

q_e = densidade de fluxo de calor externo

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa

t_{sa} = temperatura fictícia sol-ar dada por 3.1

$t_{s,e}$ = temperatura da superfície externa da parede

λ = condutividade térmica do material

A equação 3.52 indica que o produto do gradiente de temperatura no fechamento, na posição mais próxima à sua face externa ($x = 0$), pela condutividade térmica do material representa a densidade de fluxo de calor no fechamento.

A solução para a equação 3.50, submetida às condições de contorno 3.51 e 3.52, assume a forma:

² Despreza-se aqui o termo relativo às trocas por radiação de onda longa entre a superfície e os elementos do entorno.

$$t = A + Bx + \sum_{n=1}^{\infty} (C_n \cos p_n mx + D_n \sin p_n mx) e^{-m^2 \omega_n \theta} \quad (3.53)$$

onde,

A, B, C_n e D_n , p_n são constantes e $m = \sqrt[4]{-1}$. Os coeficientes A, B, C_n e D_n podem assumir forma complexa ou real, porém a solução física para o problema envolve apenas a parte real³.

A temperatura da superfície interna da parede ($t_{s,i}$) é dada por (THRELKELD, 1970):

$$t_{s,i} = t_i + \frac{1}{h_i} \left[U(t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} V_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \phi_n) \right] \quad (3.54)$$

onde (apenas as novas variáveis são citadas, sendo as demais as mesmas das equações precedentes),

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{d_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}}, \text{transmitância térmica (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} \quad (3.55)$$

$$V_n = \frac{h_e h_i}{\sigma_n \lambda \sqrt{y_n^2 + Z_n^2}}, \text{fator para a equação 3.54 (W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)} \quad (3.56)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\omega_n}{2\alpha_d}}, \text{fator para a equação 3.56 (m}^{-1}\text{)} \quad (3.57)$$

$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho c}, \text{difusividade térmica da parede (m}^2\text{/s)} \quad (3.58)$$

³ O tratamento matemático da equação 3.48 foge ao escopo desta pesquisa. A solução completa pode ser obtida em ALFORD *et alii*, 1939, Apêndice I.

$$\begin{aligned}
Y_n = & \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \cos \sigma_n d \sinh \sigma_n d + \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \sen \sigma_n d \cosh \sigma_n d \\
& + \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \cos \sigma_n d \cosh \sigma_n d \quad (\text{adimensional})
\end{aligned} \tag{3.59}$$

$$\begin{aligned}
Z_n = & \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} + 1 \right) \sen \sigma_n d \cosh \sigma_n d - \left(\frac{h_e h_i}{2 \sigma_n^2 \lambda^2} - 1 \right) \cos \sigma_n d \sinh \sigma_n d \\
& + \left(\frac{h_e + h_i}{\sigma_n \lambda} \right) \sen \sigma_n d \sinh \sigma_n d \quad (\text{adimensional})
\end{aligned} \tag{3.60}$$

$$\varphi_n = \arctan \left(\frac{Z_n}{Y_n} \right) \quad , \text{ângulo de defasagem ou de atraso} \tag{3.61}$$

Na equação 3.61, $\sen \varphi_n$ tem o sinal de Z_n (EQUAÇÃO 3.60) e $\cos \varphi_n$ tem o sinal de Y_n (EQUAÇÃO 3.59)

A densidade de fluxo de calor para o interior é dada por:

$$q_i = h_i (t_{s,i} - t_i) \tag{3.62}$$

Substituindo a EQUAÇÃO 3.54 na 3.62 obtém-se:

$$q_i = U \left[(t_{sa,m} - t_i) + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n t_{sa,n} \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \varphi_n) \right] \tag{3.63}$$

onde,

$$\mu_n = \frac{V_n}{U} \quad , \text{fator de amortecimento para a amplitude da onda (adimensional)} \tag{3.64}$$

THRELKELD, (1970), sugere que, apesar de q_i na equação 3.63 estar variando continuamente, ele pode ser calculado multiplicando-se a transmitância térmica (U) para regime

permanente por uma “diferença de temperatura equivalente”, que considera as variações periódicas da temperatura sol-ar (t_{sa}) e a capacidade de armazenamento de calor da parede. O fator μ_n (EQUAÇÃO 3.64) e o ângulo φ_n (EQUAÇÃO 3.61) são dois parâmetros relacionados ao fenômeno da inércia térmica, que será tratada mais à frente.

3.4.3 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas

A análise da transmissão de calor sob regime periódico em fechamentos homogêneos é extremamente importante para compreensão do fenômeno da inércia térmica em fechamentos opacos. Necessita-se, porém, estender a análise aos fechamentos compostos, uma vez que são prática corrente na maioria das edificações. O processo de cálculo para fechamentos compostos complica-se exponencialmente à medida que mais camadas de materiais são adicionadas à análise. Serão expostos nas próximas seções os métodos de cálculo analíticos para fechamentos compostos por duas e três camadas de materiais. Para fechamentos compostos, formados por maior número de camadas, pode-se utilizar o método da “construção homogênea equivalente” constante em MACKEY e WRIGHT, (1946) e também em ALUCCI, (1981), e reproduzido na seção 3.4.3.3 adiante. Cabe lembrar que os processos de cálculo a seguir destinam-se a calcular dois parâmetros quantitativos: o fator de amortecimento (μ_n) e o ângulo de atraso (φ_n), em cada harmônico considerado (ω_n dado pela EQUAÇÃO 3.46).

Toma-se um fechamento opaco que consiste de duas placas (isolante-concreto) caracterizado pelos planos $x_1 < x < x_2$; $x_2 < x < x_3$, respectivamente. O plano $x = x_1$ está exposto às variações periódicas da radiação solar e da temperatura do ar externo. Por sua vez, o plano $x = x_3$ está em contato com o ar do cômodo, mantido a temperatura constante t_i . A equação da condução de calor unidimensional em função do tempo θ , para a distribuição de calor na m -ésima placa, é dada por:

$$\left(\frac{\lambda_m}{\rho_m c_m} \right) \left(\frac{\partial^2 t_m}{\partial x^2} \right) = \frac{\partial t_m}{\partial \theta} \quad (3.65)$$

onde,

λ_m = condutividade térmica do material na m-ésima placa (W/m °C)

ρ_m = massa específica aparente do material da m-ésima placa (kg/m³)

c_m = calor específico do material da m-ésima placa (kJ/kg °C)

$\alpha_{d,m} = \frac{\lambda_m}{\rho_m c_m}$ = difusividade térmica do material da m-ésima placa (m²/h)

As condições de contorno adotadas são:

Na superfície externa ($x = x_1$),

A densidade de fluxo de calor na placa consiste no balanço da radiação solar absorvida e o calor liberado pela superfície por convecção e radiação. Tem-se então:

$$q_e = -\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial x} \right)_{x=x_1} = h_e (t_{sa} - t_{s,e}) \quad (3.66)$$

onde,

q_e = densidade de fluxo de calor externo (W/m²)

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa (W/m² °C)

t_{sa} = temperatura sol-ar (EQUAÇÃO 3.1) (°C)

$t_{s,e}$ = temperatura da superfície externa da placa (°C)

λ_1 = condutividade térmica do material da placa externa (W/m °C)

Na interface ($x = x_2$)

A condição de contorno na interface das duas placas é determinada pela condição que a temperatura t_m e a densidade de fluxo de calor $-\lambda_m \left(\frac{\partial t_m}{\partial x} \right)$ são contínuas na interface $x = x_2$

Na superfície interna ($x = x_3$)

O balanço de energia na superfície $x = x_3$ é dado por:

$$q_i = -\lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial x} \right)_{x=x_3} = h_i (t_{si} - t_i) \quad (3.67)$$

onde,

q_i = densidade de fluxo de calor interno (W/m^2)

h_i = coeficiente de transmissão de calor da superfície interna ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

$t_{s,i}$ = temperatura na superfície interna da placa ($^\circ C$)

t_i = temperatura interna do cômodo ($^\circ C$)

λ_2 = condutividade térmica do material da placa interna ($W/m \text{ } ^\circ C$)

Assumindo-se uma solução periódica para a temperatura t_m , tem-se ⁴:

$$t_m = t_{m,0}(X) + \sum_{n=1}^{\infty} t_{m,n} e^{(i\omega_n \theta)} \quad (3.68)$$

Considerando-se agora um fechamento opaco composto por três placas (isolante-concreto-isolante ou concreto-isolante-concreto), caracterizado pelos planos $x_1 < x < x_2$, $x_2 < x < x_3$ e $x_3 < x < x_4$ respectivamente, as condições de contorno nos planos $x = x_1$ e $x = x_4$ são idênticas para o caso do fechamento composto por duas placas (EQUAÇÕES 3.66 e 3.67). Já a condição de contorno nos planos $x = x_2$ e $x = x_3$ é determinada pela condição que a temperatura t_m e a densidade de fluxo de calor $-\lambda_m \left(\frac{\partial t_m}{\partial x} \right)$ são contínuas nas interfaces $x = x_2$ e $x = x_3$.

As expressões a seguir podem ser utilizadas para o cálculo da densidade de fluxo de calor e para a temperatura na superfície interna do fechamento (JOHNSON, 1948). Para os fechamentos

⁴ O tratamento matemático das equações 3.65, 3.66, 3.67 e 3.68 não faz parte do escopo desta pesquisa. As formas explícitas para cálculo de μ_n e ϕ_n constituem o interesse central da pesquisa.

compostos, o que muda em relação aos homogêneos é o método de cálculo dos coeficientes para as séries de Fourier.

Densidade de fluxo de calor:

$$q_i = U(t_{sa,m} - t_i) + h_i \left[\sum_{n=1}^n t_{sa,n} \mu_n \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \phi_n) \right] \quad (3.69)$$

Temperatura na superfície interna do fechamento:

$$t_{si} = \left(\frac{U}{h_i} t_{sa,m} \right) + \left(1 - \frac{U}{h_i} \right) t_i + \left[\sum_{n=1}^{\infty} t_{sa,n} \mu_n \cos(\omega_n \theta - \psi_n - \phi_n) \right] \quad (3.70)$$

onde,

ω_n = frequência harmônica (equação 3.46) ($^{\circ}/h$ ou rad/h)

U = transmitância térmica (equação 3.55) ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)

$t_{sa,m}$ = temperatura sol-ar média diária (equação 3.42) ($^{\circ}C$)

t_i = temperatura do cômodo mantida constante ($^{\circ}C$)

h_i = coeficiente de transmissão de calor da superfície interna ($W/m^2 \text{ } ^{\circ}C$)

$t_{sa,n}$ = amplitude ou temperatura sol-ar nos harmônicos, $n=1,2,...(^{\circ}C)$

ψ_n = ângulo de fase para a temperatura sol-ar ($^{\circ}$ ou radianos)

μ_n = amortecimento da amplitude de temperatura nos harmônicos (adimensional) ⁵

ϕ_n = ângulo de fase da amplitude de temperatura nos harmônicos ($^{\circ}$ ou rad)

Nas próximas seções serão indicadas as expressões para cálculo dos parâmetros necessários para obtenção das equações 3.69 e 3.70, conforme o número de camadas do fechamento considerado.

⁵ Notar que o amortecimento da amplitude de temperatura nos harmônicos (μ_n) utilizado nas equações 3.69 e 3.70 não é o mesmo fator de amortecimento para a amplitude da onda de calor transmitida, obtido pela equação 3.64 (THRELKELD, 1970). Para encontrar-se o abatimento da amplitude de onda, utilizando-se as expressões dadas a seguir, deve-se multiplicar μ_n por h_i/U .

3.4.3.1 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas por dois materiais

Apresenta-se a seguir as variáveis “primárias” que servirão de base para o cálculo das expressões a seguir. De maneira geral, o índice “e” será utilizado para identificação do material do fechamento composto que está exposto às condições climáticas externas (lado externo). Já o índice “i” será utilizado para designar o material do fechamento composto, em contato com as condições do lado interno do cômodo.

Coeficientes de superfície:

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

h_i = coeficiente de transmissão de calor da superfície interna ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Condutividades térmicas:

λ_e = condutividade térmica do material do lado externo do fechamento ($W/m \text{ } ^\circ C$)

λ_i = condutividade térmica do material do lado interno do fechamento ($W/m \text{ } ^\circ C$)

Calores específicos:

c_e = calor específico do material do lado externo do fechamento ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)

c_i = calor específico do material do lado interno do fechamento ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)

Massas específicas aparentes:

ρ_e = massa específica aparente do material do lado externo do fechamento (kg/m^3)

ρ_i = massa específica aparente do material do lado interno do fechamento (kg/m^3)

Espessuras:

d_e = espessura do material do lado externo do fechamento (m)

d_i = espessura do material do lado interno do fechamento (m)

As expressões a seguir destinam-se ao cálculo de μ_n e φ_n para o fechamento composto por duas placas (MACKEY e WRIGHT, 1946):

$$P_1 = \frac{h_i}{h_e} \quad (3.71)$$

$$P_2 = \sqrt{\frac{\omega_n}{2} \frac{\rho_i c_i}{\lambda_i}} d_i \quad (3.72)$$

$$P_3 = \frac{\lambda_i}{h_i} \sqrt{\frac{\omega_n}{2} \frac{\rho_i c_i}{\lambda_i}} \quad (3.73)$$

$$T_2 = \sqrt{\frac{\omega_n}{2} \frac{\rho_e c_e}{\lambda_e}} d_e \quad (3.74)$$

$$T_3 = \frac{\lambda_e}{h_e} \sqrt{\frac{\omega_n}{2} \frac{\rho_e c_e}{\lambda_e}} \quad (3.75)$$

$$C_1 = \cos P_2 \cosh P_2 + \sen P_2 \sinh P_2 \quad (3.76)$$

$$C_2 = \cos P_2 \cosh P_2 - \sen P_2 \sinh P_2 \quad (3.77)$$

$$C_3 = \sen P_2 \cosh P_2 \quad (3.78)$$

$$C_4 = \cos P_2 \sinh P_2 \quad (3.79)$$

$$D_1 = \cos T_2 \cosh T_2 + \sen T_2 \sinh T_2 \quad (3.80)$$

$$D_2 = \cos T_2 \cosh T_2 - \sen T_2 \sinh T_2 \quad (3.81)$$

$$D_3 = \sen T_2 \cosh T_2 \quad (3.82)$$

$$D_4 = \cos T_2 \sinh T_2 \quad (3.83)$$

$$g_c = \sqrt{\frac{2}{\left[\frac{C_3}{P_3} + C_1 \right]^2 + \left[\frac{C_4}{P_3} + C_2 \right]^2}} \quad (3.84)$$

$$g_d = \frac{2}{\sqrt{\left[\frac{D_3}{T_3} + D_1\right]^2 + \left[\frac{D_4}{T_3} + D_2\right]^2}} \quad (3.85)$$

$$r_c = (C_1 + 2P_3C_4)\left(\frac{C_3}{P_3} + C_1\right) + (C_2 - 2P_3C_3)\left(\frac{C_4}{P_3} + C_2\right) \quad (3.86)$$

$$r_d = (D_1 + 2T_3D_4)\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) + (D_2 - 2T_3D_3)\left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right) \quad (3.87)$$

$$s_c = (C_2 - 2P_3C_3)\left(\frac{C_3}{P_3} + C_1\right) - (C_1 + 2P_3C_4)\left(\frac{C_4}{P_3} + C_2\right) \quad (3.88)$$

$$s_d = (D_2 - 2T_3D_3)\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) - (D_1 + 2T_3D_4)\left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right) \quad (3.89)$$

$$A_1 = \left(\frac{C_3}{P_3} + C_1\right) - \left(\frac{C_4}{P_3} + C_2\right) \quad (3.90)$$

$$A_2 = \left(\frac{C_3}{P_3} + C_1\right) + \left(\frac{C_4}{P_3} + C_2\right) \quad (3.91)$$

$$B_1 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) - \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right)\right] \left[r_d g_d^2 + P_1 r_c g_c^2\right] \quad (3.92)$$

$$B_2 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) + \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right)\right] \left[s_d g_d^2 + P_1 s_c g_c^2\right] \quad (3.93)$$

$$B_3 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) + \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right)\right] \left[r_d g_d^2 + P_1 r_c g_c^2\right] \quad (3.94)$$

$$B_4 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1\right) - \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2\right)\right] \left[s_d g_d^2 + P_1 s_c g_c^2\right] \quad (3.95)$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{A_1}{A_2}\right) + \arctan\left(\frac{B_1 - B_2}{B_3 + B_4}\right) \quad (3.96)$$

$$B_5 = \left(r_d \frac{g_d}{g_c} + P_1 r_c \frac{g_c}{g_d} \right)^2 \quad (3.97)$$

$$B_6 = \left(s_d \frac{g_d}{g_c} + P_1 s_c \frac{g_c}{g_d} \right)^2 \quad (3.98)$$

$$\mu_n = \frac{2}{\sqrt{B_5 + B_6}} \quad (3.99)$$

3.4.3.2 Transmissão de calor sob regime periódico em paredes ou coberturas compostas por três materiais

Apresenta-se a seguir as variáveis “primárias” que servirão de base para o cálculo das expressões a seguir. De maneira geral, o índice “e” será utilizado para identificação do material do fechamento composto que está exposto às condições climáticas externas (lado externo). Já o índice “i” será utilizado para designar o material do fechamento composto, em contato com as condições do lado interno do cômodo, e o índice “m” para o material na região intermediária.

Coeficientes de superfície:

h_e = coeficiente de transmissão de calor da superfície externa ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

h_i = coeficiente de transmissão de calor da superfície interna ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

Condutividades térmicas:

λ_e = condutividade térmica do material do lado externo do fechamento ($W/m \text{ } ^\circ C$)

λ_m = condutividade térmica do material intermediário do fechamento ($W/m \text{ } ^\circ C$)

λ_i = condutividade térmica do material do lado interno do fechamento ($W/m \text{ } ^\circ C$)

Calores específicos:

c_e = calor específico do material do lado externo do fechamento ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)

c_m = calor específico do material intermediário do fechamento ($kJ/kg \text{ } ^\circ C$)

c_i = calor específico do material do lado interno do fechamento (kJ/kg °C)

Massas específicas aparentes:

ρ_e = massa específica aparente do material do lado externo do fechamento (kg/m³)

ρ_m = massa específica aparente do material intermediário do fechamento (kg/m³)

ρ_i = massa específica aparente do material do lado interno do fechamento (kg/m³)

Espessuras:

d_e = espessura do material do lado externo do fechamento (m)

d_m = espessura do material intermediário do fechamento (m)

d_i = espessura do material do lado interno do fechamento (m)

As expressões a seguir destinam-se ao cálculo de μ_n e ϕ_n para o fechamento composto por três placas (MACKEY e WRIGHT, 1946):

As seguintes expressões são as mesmas já definidas para o fechamento composto por duas placas (seção 3.4.3.1):

P_1 (eq. 3.71), P_2 (eq. 3.72), P_3 (eq. 3.73), C_1 (eq. 3.76), C_2 (eq. 3.77), C_3 (eq. 3.78), C_4 (eq. 3.79), g_c (eq. 3.84), r_c (eq. 3.86), s_c (eq. 3.88), T_2 (eq. 3.74), T_3 (eq. 3.75), D_1 (eq. 3.80), D_2 (eq. 3.81), D_3 (eq. 3.82), D_4 (eq. 3.83), g_d (eq. 3.85), r_d (eq. 3.87), s_d (eq. 3.89).

As novas expressões são dadas a seguir:

$$O_2 = \sqrt{\frac{\omega_n \rho_m c_m}{2 \lambda_m}} d_m \quad (3.100)$$

$$O_3 = \frac{\lambda_m}{h_i} \sqrt{\frac{\omega_n \rho_m c_m}{2 \lambda_m}} \quad (3.101)$$

$$w_1 = \cos O_2 \cosh O_2 + \sin O_2 \sinh O_2 \quad (3.102)$$

$$w_2 = \cos O_2 \cosh O_2 - \sin O_2 \sinh O_2 \quad (3.103)$$

$$w_3 = \text{sen } O_2 \cosh O_2 \quad (3.104)$$

$$w_4 = \cos O_2 \sinh O_2 \quad (3.105)$$

$$y_w = w_1 w_3 + w_2 w_4 \quad (3.106)$$

$$z_w = w_2 w_3 - w_1 w_4 \quad (3.107)$$

$$p_w = \sqrt{\frac{2}{(w_3)^2 + (w_4)^2}} \quad (3.108)$$

$$\delta_n = \frac{p_w}{\sqrt{\left(\frac{y_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{r_c g_c^2}{2}\right)^2 + \left(\frac{z_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{s_c g_c^2}{2}\right)^2}} \quad (3.109)$$

$$F_1 = (w_3 - w_4) \left(\frac{y_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{r_c g_c^2}{2} \right) \quad (3.110)$$

$$F_2 = (w_3 + w_4) \left(\frac{y_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{r_c g_c^2}{2} \right) \quad (3.111)$$

$$F_3 = (w_3 + w_4) \left(\frac{z_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{s_c g_c^2}{2} \right) \quad (3.112)$$

$$F_4 = (w_3 - w_4) \left(\frac{z_w p_w^2}{2} + \frac{1}{O_3} \frac{s_c g_c^2}{2} \right) \quad (3.113)$$

$$\epsilon_n = \arctan \frac{(F_1 - F_3)}{(F_2 + F_4)} \quad (3.114)$$

$$G_1 = \left\{ \left(\frac{r_d g_d^2}{2} - p_1 O_3 \frac{p_w^2}{2} \right) [(w_3 + w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 - w_4) \delta \sin \epsilon - y_w] \right\} \quad (3.115)$$

$$G_2 = \left\{ \left(\frac{s_d g_d^2}{2} - p_1 O_3 \frac{p_w^2}{2} \right) [(w_3 - w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 + w_4) \delta \sin \epsilon - z_w] \right\} \quad (3.116)$$

$$\gamma_n = \frac{g_d}{\sqrt{G_1^2 + G_2^2}} \quad (3.117)$$

$$H_1 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1 \right) - \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2 \right) \right] \left\{ \left(\frac{r_d g_d^2}{2} - P_1 O_3 \frac{P_w^2}{2} \right) [(w_3 + w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 - w_4) \delta \sin \epsilon - y_w] \right\} \quad (3.118)$$

$$H_2 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1 \right) + \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2 \right) \right] \left\{ \left(\frac{r_d g_d^2}{2} - P_1 O_3 \frac{P_w^2}{2} \right) [(w_3 + w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 - w_4) \delta \sin \epsilon - y_w] \right\} \quad (3.119)$$

$$H_3 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1 \right) + \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2 \right) \right] \left\{ \left(\frac{s_d g_d^2}{2} - P_1 O_3 \frac{P_w^2}{2} \right) [(w_3 - w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 + w_4) \delta \sin \epsilon - z_w] \right\} \quad (3.120)$$

$$H_4 = \left[\left(\frac{D_3}{T_3} + D_1 \right) - \left(\frac{D_4}{T_3} + D_2 \right) \right] \left\{ \left(\frac{s_d g_d^2}{2} - P_1 O_3 \frac{P_w^2}{2} \right) [(w_3 - w_4) \delta \cos \epsilon - (w_3 + w_4) \delta \sin \epsilon - z_w] \right\} \quad (3.121)$$

$$\kappa_n = \arctan \left(\frac{H_1 - H_3}{H_2 + H_4} \right) \quad (3.122)$$

$$\eta_n = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{C_3}{P_3} + C_1 \right)^2 + \left(\frac{C_4}{P_3} + C_2 \right)^2}} \quad (3.123)$$

$$\vartheta_n = \arctan \frac{\left(\frac{C_3}{P_3} + C_1 \right) - \left(\frac{C_4}{P_3} + C_2 \right)}{\left(\frac{C_3}{P_3} + C_1 \right) + \left(\frac{C_4}{P_3} + C_2 \right)} \quad (3.124)$$

$$\mu_n = \eta_n \delta_n \gamma_n \quad (3.125)$$

$$\varphi_n = \vartheta_n + \varepsilon_n + \kappa_n \quad (3.126)$$

3.4.3.3 Cálculo do fechamento homogêneo equivalente para um fechamento composto

Como exposto anteriormente, o cálculo para fechamentos opacos compostos é dificultado, na medida que mais camadas são adicionadas ao fechamento. Pode-se recorrer ao método do cálculo do fechamento homogêneo equivalente, originalmente proposto por MACKEY e WRIGHT, (1946). Um fechamento homogêneo equivalente corresponde a um fechamento opaco homogêneo (parede ou cobertura) que apresenta o mesmo padrão de variação da temperatura em sua superfície interna que o fechamento composto em estudo, ambos submetidos às mesmas condições ambientais. A densidade de fluxo de calor a partir da superfície interna do fechamento para o cômodo considerado depende da temperatura da superfície interna (t_{si}), bem como do coeficiente de transmissão de calor da superfície interna (h_i). Então, o fechamento composto em estudo, e seu equivalente homogêneo, apresentam o mesmo perfil de carga térmica no mesmo intervalo de tempo. É importante lembrar que este método de cálculo do fechamento homogêneo equivalente é válido somente no caso da transmissão de calor em regime periódico, não sendo aplicável a outros métodos existentes de transmissão de calor em regimes transientes.

O fechamento homogêneo equivalente é definido através de duas propriedades térmicas: a resistência térmica $(d/\lambda)_E$ e o produto $(\lambda \rho c)_E$,

onde,

d = espessura do material da camada considerada (m)

λ = condutividade térmica do material da camada considerada (W/m °C)

ρ = massa específica aparente do material da camada considerada (kg/m³)

c = calor específico do material da camada considerada (kJ/kg °C)

O índice “E” denota as propriedades térmicas do elemento equivalente.

A resistência térmica do fechamento homogêneo equivalente é determinada pelo fato que as características do fechamento composto e do homogêneo são equivalentes. A seguir apresenta-se a expressão para cálculo da resistência térmica do fechamento homogêneo equivalente:

$$\left(\frac{d}{\lambda}\right)_E = \left(\frac{d}{\lambda}\right)_i + \left(\frac{d}{\lambda}\right)_e + \sum_{j=1}^n \left(\frac{d}{\lambda}\right)_{mj} \quad (3.127)$$

onde,

d = espessura do material (m)

λ = condutividade térmica do material (W/m °C)

O índice “E” denota as propriedades térmicas do elemento equivalente,

O índice “i” denota as propriedades da camada interna em contato o ar interior,

O índice “e” denota as propriedades da camada externa em contato com o ambiente,

O índice “m” denota as camadas intermediárias do fechamento composto

O índice “j” denota a ordem de disposição das camadas intermediárias.

Caso o fechamento composto contenha ar em seu interior, recomenda-se o uso de valores tabelados de resistência térmica de câmaras de ar, para o cálculo da resistência térmica equivalente.

O produto $(\lambda \rho c)_E$ do fechamento homogêneo equivalente pode ser obtido através da seguinte expressão:

$$A = \frac{1,1 \left(\frac{d}{\lambda}\right)_i (\lambda \rho c)_i + 1,1 \sum_{j=1}^n (\lambda \rho c)_{mj}}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)_E} \quad (3.128)$$

$$B = \frac{(\lambda \rho c)_e \left[\left(\frac{d}{\lambda}\right)_e^{-0,1} \left(\frac{d}{\lambda}\right)_i^{-0,1} \sum_{j=1}^n \left(\frac{d}{\lambda}\right)_{mj} \right]}{\left(\frac{d}{\lambda}\right)_E} \quad (3.129)$$

$$(\lambda \rho c)_E = A + B \quad (3.130)$$

onde,

d = espessura do material (m)

c = calor específico do material (kJ/kg °C)

λ = condutividade térmica do material (W/m °C)

O índice “E” denota as propriedades térmicas do elemento equivalente,

O índice “i” denota as propriedades da camada interna em contato com o ar interior,

O índice “e” denota as propriedades da camada externa em contato com o ambiente,

O índice “m” denota as camadas intermediárias do fechamento composto

O índice “j” denota a ordem de disposição das camadas intermediárias.

Quando uma das camadas intermediárias for uma câmara de ar, o produto ($\lambda\rho c$) desta camada deve ser igual a zero. Em alguns casos, o termo entre colchetes da equação 3.129 torna-se negativo. Na ocorrência deste fato, o termo inteiro entre colchetes deve se igualado a zero. Em casos onde a resistência térmica da camada interna de um fechamento composto é maior que dez vezes a da camada externa, deve-se recorrer às equações das seções 3.4.3.1 e 3.4.3.2 para cálculo preciso de fechamentos compostos de duas ou três camadas, uma vez que os valores do produto ($\lambda\rho c$) para o fechamento homogêneo equivalente estarão imprecisos.

3.4.4 Inércia térmica como estratégia de conforto e de eficiência energética em coberturas e paredes

Pode-se inferir pelas seções anteriores que a inércia térmica de um fechamento, ou a sua capacidade de atenuação e retardo dos picos da onda térmica, depende em conjunto do fator de amortecimento μ_n (EQUAÇÃO 3.64) e do ângulo de atraso ou deslocamento angular φ_n (EQUAÇÃO 3.61). Para o clima de Campinas, SP, CHVATAL, (1998), recomenda a utilização de inércia térmica média a alta para os fechamentos de edificações, dadas as grandes amplitudes de temperatura na região, notadamente no inverno.

Um conceito relacionado à inércia é o de massa térmica que corresponde à análise combinada entre a massa específica aparente do material que compõe o fechamento e sua espessura

(PAPST, 1999). O calor específico para os materiais de construção encontra-se na faixa de 0,38 kJ/kg °C para o cobre a 2,30 kJ/kg °C para os aglomerados de madeira, já a variação das massas específicas aparentes é bem maior (de 10 kg/m³ para a lã de vidro a 8.900 kg/m³ para o cobre) (ABNT, 1998). Pode-se inferir então que a capacidade térmica superficial de um fechamento depende estreitamente da massa específica aparente do material que constitui o fechamento e também de sua espessura.

O conhecimento analítico da inércia térmica como técnica solar passiva depende da concepção de métodos que possibilitem investigar as interações quantitativas, entre parâmetros climáticos e termofísicos, e seu efeito no fechamento em questão. Uma vez que, qualitativamente, o fenômeno da inércia térmica é suficientemente conhecido pelo atual estágio de pesquisa na área, almeja-se a ampliação do conhecimento existente através de um estudo analítico quantitativo das variáveis acima, restrito à caracterização climática de Campinas, SP.

4 METODOLOGIA

Descreve-se a seguir a metodologia adotada neste trabalho, para fins de seu registro e reprodução posteriores. Optou-se por investigar o fenômeno da inércia térmica de fechamentos opacos de maneira analítica. Através de pesquisa causal, buscou-se ampliar o conhecimento já existente do fenômeno, através da relação de causa-e-efeito entre variáveis. As hipóteses formuladas buscaram verificar o comportamento físico de algumas técnicas de resfriamento passivo para o conforto térmico e eficiência energética em edificações locais, quais sejam, a utilização de isolantes térmicos, incorporação de câmaras de ar em fechamentos opacos, e também verificar a influência cromática das fachadas na transmissão do calor.

Iniciou-se o trabalho com a definição de dias típicos de verão e inverno para a região de Campinas, SP, visando obter dados para cálculo de irradiância solar na envolvente de edificações. Determinou-se os coeficientes de transmissão de calor de superfícies internas (h_i) e externas (h_e) para Campinas. Realizou-se uma pesquisa teórica sobre o cálculo da transmissão de calor em regime periódico, especialmente em paredes e coberturas, utilizando-se séries de Fourier. Mostrou-se, analiticamente, o processo de transmissão de calor em regime periódico, contemplando a variação cíclica da temperatura externa e radiação solar, bem como a capacidade de armazenamento térmico dos materiais que compuseram o fechamento considerado.

O fenômeno da inércia térmica foi, então, representado por duas componentes que o definiram: o amortecimento da amplitude e o atraso da onda de calor. Foram analisadas as interações quantitativas entre parâmetros climáticos e termofísicos, e a propagação da onda de calor para o caso de fechamentos homogêneos, fechamentos compostos com material isolante térmico e fechamentos compostos com câmara de ar. Estendeu-se a análise aos fechamentos compostos, pesquisando-se expressões analíticas para duas e três camadas, e também o método do fechamento homogêneo equivalente. Finalmente estudou-se a influência quantitativa entre variáveis climáticas e termofísicas

na mobilidade e retenção da onda térmica, através de fechamentos opacos homogêneos e também compostos.

4.1 Dias típicos de verão e inverno de Campinas para análise térmica de edificações

Dada a destinação desta pesquisa a uma aplicação à área de edificações, e as amplitudes diárias de temperatura estarem próximas da amplitude média do período considerado de cinco anos⁶, adotou-se a metodologia de SATTLER, (1990) para determinação dos dias típicos de projeto de verão e inverno, conforme recomendação de GOULART, (1993). Conforme observação em SATTLER, (1990), propôs-se que a definição destes dias fosse baseada não nas temperaturas médias diárias do ar, mas alternativamente, segundo as temperaturas sol-ar⁷. Para tanto necessitou-se, além de dados de temperaturas médias diárias do ar, de pelo menos cinco anos de registros contínuos de radiação solar incidente em superfície horizontal. As Instituições consultadas para o fornecimento de dados climáticos foram as seguintes:

- Instituto Agrônomo de Campinas (IAC),
- Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP (FEAGRI),
- Centro de Ensino e Pesquisa em Agricultura da UNICAMP (CEPAGRI).

O critério para seleção dos dados disponíveis foi a continuidade no registro de informações (mínimo cinco anos), e disponibilidade contínua neste mesmo período de dois parâmetros necessários ao cálculo da temperatura sol-ar: temperaturas médias diárias e número de horas de insolação diária. Os dados do IAC preencheram estes quesitos e foram adotados nesta pesquisa.

⁶ Para o período adotado de cinco anos (1.827 dias), obteve-se uma amplitude média de 11,1°C, valor este próximo das amplitudes diárias observadas na região de Campinas.

⁷ Apesar da expressão da temperatura sol-ar conter em sua formulação parâmetros relativos ao fechamento em si, utilizou-se este parâmetro de seleção para os dias típicos para priorizar o efeito da irradiância solar em fechamentos opacos, intenção relevante desta pesquisa, através de características como a absorvância à radiação solar.

Poucas são as estações meteorológicas que dispõem de registros contínuos de longo prazo de radiação solar incidente. A maioria delas disponibiliza registros do número diário de horas de insolação. Porém, existem métodos que permitem obter médias mensais de radiação horária e diária em planos horizontais, verticais e inclinados a partir destes dados (DUFFIE e BECKMAN, 1980).

Como se necessitava de dias considerados claros para a garantia da variação cíclica da temperatura do ar e da radiação solar, os dias típicos de projeto foram selecionados com base em seu índice de transparência ($K_t > 0,75$). Portanto, alterou-se o modo de seleção final dos dias típicos em relação à metodologia de SATTLER, (1990), elegendo-se como parâmetro de decisão o índice de transparência (K_t). Além disso, o dia típico correspondeu a um dia real e não fictício. A descrição completa do procedimento para determinação dos dias típicos de projeto encontra-se no Apêndice I.

Selecionados os dias típicos de verão e inverno, necessitava-se determinar os valores horários de temperatura e radiação solar, pois dispunha-se apenas de valores diários destes. Para o cálculo das temperaturas horárias, recorreu-se aos coeficientes propostos por RORIZ, (1991), disponíveis no Apêndice II. Já para os valores horários de radiação solar, adotou-se a metodologia proposta por LABAKI, (1995). Para automatização e agilidade dos cálculos necessários, foi concebida a planilha eletrônica de cálculo, de nome “RADISOL”. A mesma foi utilizada para cálculo da radiação solar horária, em superfícies horizontais e verticais, em suas diversas orientações. É importante lembrar que os cálculos de radiação solar devem ser realizados sempre com base no tempo solar da localidade, no caso, para a cidade de Campinas.

4.2 Coeficientes de transmissão de calor de superfícies internas (h_i) e externas (h_e) para Campinas

O uso de valores padronizados na literatura para h_i e h_e é prática corrente nos cálculos em conforto térmico. Entretanto, fatores climáticos e termofísicos influem na formulação destes coeficientes, tornando-os particulares conforme o material e a região climática em estudo. No que se refere aos materiais, fatores como a emissividade de onda longa e a rugosidade de suas superfícies alteram os valores destes coeficientes. Quanto ao aspecto climático, parâmetros como a velocidade

do vento e a rugosidade do entorno também alteram estes valores. Além disso, valores para superfícies horizontais (telhados) e verticais (paredes) devem ser diferenciados, uma vez que a velocidade do vento segundo uma ou outra destas superfícies varia. Deve-se levar em consideração, adicionalmente, a altura em questão destas superfícies. Por último, diferencia-se também valores para o dia típico de inverno e de verão, pois a velocidade média do vento é distinta.

A influência destes fatores no cálculo de h_i é mínima, pois no microclima interno da edificação a velocidade do ar é próxima de zero. Neste caso, pode haver generalização dos valores constantes em literatura para h_i . Neste trabalho, adotou-se os valores sugeridos por RIVERO, (1986), constantes da TABELA IV.1, no Apêndice IV.

Como visto, a velocidade do vento exerce maior influência sobre h_e . Para os cálculos neste trabalho, levou-se em consideração estes fatores, obtendo-se valores particulares de h_e para Campinas. As velocidades médias dos ventos para Campinas foram obtidas de uma série de dados do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), compreendendo o período de 1956 a 1996. Estes valores foram diferenciados segundo o período de verão e inverno. Adicionalmente, diferenciou-se as velocidades segundo características do entorno e da altura da superfície em questão, recorrendo-se à fórmula de DAVENPORT, (1967) apud SODHA *et alii*, (1986). Adotou-se o método contido em DREYFUS, (1960), para cálculo de todos os valores de h_e , para superfícies de rugosidade média, diferenciados pelo tipo (horizontal ou vertical), pela estação (verão e inverno), pela exposição da superfície ao vento (branda, normal e severa) e pela emissividade ($\epsilon = 0,90; 0,20$ e $0,05$). A descrição destes critérios, e dos passos para obtenção destes valores de h_e encontra-se no Apêndice IV.

4.3 Cálculo da temperatura sol-ar para os dias típicos de verão e inverno

Determinados os dias típicos de verão e inverno, já com valores calculados de temperaturas e radiação solar incidente em superfície horizontal, calculou-se os valores horários da temperatura sol-ar conforme equação 3.1. Pôde-se, então, obter a representação gráfica da temperatura sol-ar em função do tempo solar para os dias típicos de verão e inverno.

Desejava-se obter a representação matemática desta curva (equação 3.48), por meio de análise de Fourier. A literatura recomenda dois harmônicos para convergência da curva da temperatura sol-ar em superfícies horizontais (THRELKELD, 1970). Por sua vez, as variações da temperatura sol-ar em superfícies verticais exigiram oito harmônicos para a sua convergência. O procedimento de análise harmônica, adotado para o cálculo dos coeficientes da equação 3.48, segue aquele sugerido por ALFORD *et alii*, (1939). Este processo encontra-se descrito no Apêndice III, e foi automatizado através de planilhas eletrônicas.

Com os coeficientes ⁸ da equação 3.48 determinados, obteve-se as equações representativas para cálculo da temperatura sol-ar em superfície horizontal, e verticais nas diversas orientações, para o dia típico de verão e de inverno para a cidade de Campinas.

4.4 Transmissão de calor em regime periódico e a inércia térmica

Há diversos métodos que solucionam a equação de condução de calor de Fourier, através de condições de contorno apropriadas. Para problemas complexos, como a análise da condução de calor em três dimensões, recorre-se ao método dos elementos finitos, necessitando-se de computadores com grande capacidade de cálculo. No entanto, assumindo-se soluções periódicas, foi possível conduzir uma pesquisa causal entre as variáveis que influem na inércia térmica, empregando-se micro-computadores e planilhas eletrônicas para solução dos procedimentos numéricos adotados.

Como já visto na seção 4.2, as variações da intensidade de radiação solar e da temperatura do ar externo podem ser expandidas através de séries de Fourier no tempo, com uma frequência ω . Para a apreciação da transmissão de calor em regime periódico, solucionou-se a equação unidimensional de condução de calor (equação 3.50) através de condições de contorno apropriadas nas faces interna e externa do fechamento. Além dos coeficientes já obtidos, através da expansão da temperatura sol-ar por séries de Fourier, necessitou-se ainda de novos parâmetros e coeficientes para compor a equação da densidade de fluxo de calor.

⁸ Os coeficientes que interessam ser determinados e parametrizados, além do conhecimento de $t_{sa,m}$ no período considerado, são: $t_{sa,n}$; ω_n e Ψ_n ($n = 1, 2, \dots$).

Um dos parâmetros é a transmitância térmica para transmissão de calor em regime permanente, obtida pela equação 3.55. Os outros parâmetros necessários estão relacionados com o fenômeno da inércia térmica em fechamentos. Necessita-se calcular o ângulo de atraso, ou deslocamento angular, e também o fator de amortecimento da amplitude da onda de calor, ambos para o número de harmônicos considerados. Eles são obtidos pelas equações 3.61 e 3.64, respectivamente.

Dada a extensão dos cálculos necessários para obtenção dos coeficientes no número de harmônicos considerado, criou-se uma planilha eletrônica de cálculo, de nome “TRANSCALOR”. Análises quantitativas entre parâmetros climáticos e termofísicos, e suas influências na propagação da onda de calor, foram automatizadas e agilizadas pelo “TRANSCALOR”.

Para a visualização do efeito da inércia térmica de um fechamento sobre a variação periódica da densidade do fluxo de calor, representou-se graficamente duas curvas. Uma delas considerando-se a capacidade de armazenamento de calor pelo fechamento e a outra desprezando-se esta capacidade. A capacidade de armazenamento de calor foi desprezada, igualando-se o ângulo de fase a zero e o fator de amortecimento a um. Pôde-se afirmar então que a curva que desconsidera a capacidade de armazenamento de calor pelo fechamento encontrava-se em fase com a temperatura sol-ar.

Através deste procedimento, obteve-se a forma das equações para cálculo da densidade de fluxo de calor em fechamento horizontal para Campinas. De forma análoga, utilizou-se a equação 3.54 para cálculo da temperatura da superfície interna da parede, considerando-se sua variação periódica.

Devido à preponderância do “período quente” no contexto climático de Campinas, optou-se por desenvolver os exemplos numéricos para o dia típico de verão. Adicionalmente, considerou-se os fechamentos em estudo em posição horizontal (telhados), dada a maior incidência de radiação solar nos mesmos durante o transcorrer do dia.

4.5 Desempenho de técnicas de resfriamento passivo

Dado o interesse desta pesquisa no estudo de técnicas passivas de resfriamento, investigou-se alguns meios de redução de cargas térmicas em edificações locais. Técnicas de resfriamento passivo podem atenuar o pico de energia necessário, diminuindo a potência de equipamentos de resfriamento térmico ativo, bem como o período pelo qual ele é geralmente requerido. Como técnicas de resfriamento passivo, enfocou-se o processo de redução de transmissão de calor através destes fechamentos, e também o processo de redução da absorção de radiação solar. Para a redução da transmissão de calor investigou-se o uso de isolamento térmico e incorporação de câmaras de ar aos fechamentos. Para redução da absorção de radiação solar, investigou-se a influência cromática na face externa de fechamentos opacos.

Consta na literatura (GIVONI, 1981), que o posicionamento do isolante térmico na face externa do fechamento é mais efetivo, sob o ponto de vista da redução de carga térmica. No entanto, sob o aspecto econômico, o isolante deve apresentar um valor ótimo de espessura. Qualquer incorporação adicional de isolante não acarretará um maior benefício térmico ao fechamento. Paredes e coberturas que possuem uma câmara de ar em seu interior também apresentam bom comportamento térmico passivo, uma vez que a mesma age como barreira à passagem do calor.

A condução de calor através de paredes e coberturas é diretamente proporcional à diferença de temperatura entre as superfícies interna e externa. Com o intuito de diminuir-se o fluxo de calor conduzido, necessita-se, portanto, que a temperatura da superfície externa seja reduzida. Uma das maneiras de se reduzir esta temperatura é minimizar a absorção de radiação solar por esta superfície. Para isso, a cor da superfície externa é um parâmetro decisivo a este respeito. Descreve-se, a seguir, a metodologia adotada na abordagem de cada uma destas técnicas.

4.5.1 Cor da superfície externa

Investigou-se com o “TRANSCALOR” a influência da absorptância (α) na densidade de fluxo de calor através de uma placa homogênea de concreto (C). Utilizou-se o mesmo procedimento

constante da seção 4.3. Procedeu-se então a uma análise da diminuição do efeito da cor externa do fechamento, conforme aumentou-se a resistência e a capacidade térmica volumétrica do fechamento de concreto.

Esta técnica de resfriamento cromático busca investigar o processo de absorção e reflexão da radiação solar incidente durante o dia no fechamento, e a emissão de radiação de onda longa durante a noite. Esperou-se comprovar analiticamente que o efeito da variação da cor externa é maior em fechamentos de pouca inércia térmica, conforme afirmado por GIVONI, (1981). Simulou-se a relação entre as cores branca ($\alpha = 0,2$) e cinza ($\alpha = 0,7$) para placas de concreto com espessuras de 5 cm e 20 cm. Maiores detalhes sobre o método numérico encontram-se no EXEMPLO 4, seção 5.5.

4.5.2 Isolantes térmicos

A questão dos isolantes térmicos foi abordada buscando-se comprovar analiticamente que a colocação de isolante na face externa de uma placa de concreto (IC) é térmica e energeticamente mais eficiente do que colocando-o na face interna da placa (CI). Esta premissa é conhecida pela literatura, porém, sua comprovação analítica forneceu dados quantitativos, antes inexistentes para o contexto local. Detalhes numéricos desta questão encontram-se no EXEMPLO 5, seção 5.6.

Uma outra questão abordada foi a determinação de uma espessura ótima de isolante, em relação à placa de concreto, com vistas à obtenção de maior eficiência energética para o fechamento (IC). Recorda-se que a eficiência energética é entendida aqui como a atenuação dos picos de densidade periódica do fluxo de calor, uma vez que eles determinam o dimensionamento de eventual equipamento de condicionamento térmico artificial (SODHA *et alii*, 1979). Relacionou-se a espessura do isolante (l) com a espessura total do fechamento (L). Utilizou-se as relações $l = 0,25L$; $l = 0,5L$ e $l = 0,75L$ para espessuras totais (L) de 5 cm, 10 cm e 15 cm. A inferência sobre a faixa de espessura ótima do isolante pode ser consultada no EXEMPLO 6, seção 5.6. Para a realização dos cálculos necessários, incorporou-se ao “TRANSCALOR” as equações para fechamentos compostos por duas camadas, que constam na seção 3.4.3.1.

4.5.3 Câmaras de ar

Buscou-se comprovar, analiticamente, a atenuação da densidade de fluxo de calor pela incorporação de câmara de ar entre duas placas de concreto (CAC). Apesar do efeito atenuante das câmaras de ar ser conhecido na literatura, pôde-se obter dados quantitativos para o contexto local. Procurou-se comparar o fechamento (CAC) com uma placa homogênea de concreto (C) com a mesma espessura total, descontando-se a câmara de ar. O EXEMPLO 7, seção 5.7, ilustra numericamente esta questão.

Desejou-se comprovar analiticamente a atenuação dos picos de densidade periódica de fluxo de calor, conforme diminuía-se a espessura da placa externa de concreto no fechamento (CAC). Utilizou-se nesta questão, e na anterior, o método do fechamento homogêneo equivalente, (seção 3.4.3.3). SODHA *et alii*, (1980) abordaram esta questão, porém desenvolveram uma expressão analítica própria para a equação da densidade de fluxo de calor. Nesta pesquisa, optou-se pelo método do fechamento homogêneo equivalente, pois possibilita a redução de fechamentos compostos complexos a um equivalente homogêneo, não sendo necessária, portanto, a dedução de uma expressão de fluxo de calor para cada caso considerado. Detalhes sobre a solução numérica desta questão encontram-se no EXEMPLO 8, seção 5.7. Em seguida apresenta-se os resultados obtidos, bem como os exemplos numéricos mencionados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir apresenta-se os resultados obtidos com referência aos objetivos da pesquisa. É mostrada a relação de dias quentes e frios, em seus diversos níveis, que serviu de base para seleção dos dias típicos de verão e inverno. São apresentados os resultados referentes aos dados de radiação e temperatura obtidos para os dias típicos de verão e inverno, e também a reprodução dos valores periódicos de temperatura sol-ar através de séries de Fourier. São também incluídos gráficos de densidade de fluxo de calor através de fechamentos opacos homogêneos, para o dia típico de verão, e demonstra-se o fenômeno da inércia térmica. Mostra-se também a influência da cor, da incorporação de isolantes térmicos, bem como de câmaras de ar ao fechamento opaco. São incluídos exemplos numéricos, com o intuito de demonstrar as possibilidades de aplicação prática.

5.1 Dias típicos de verão e inverno representativos de Campinas, SP

Os dias referentes aos diversos percentis, que nortearam a escolha dos dias típicos de verão e inverno, correspondentes aos passos 18 e 19 do procedimento de cálculo para dias típicos (Apêndice I) são dados a seguir (TABELAS 5.1 e 5.2, respectivamente):

TABELA 5.1: Percentis referentes ao grupo de “dias quentes - verão”

Percentil	Dia
1,0%	24/12/1997
2,5%	19/12/1999
5,0%	09/11/1996
10,0%	11/01/1998

TABELA 5.2: Percentis referentes ao grupo de “dias frios - inverno”

Percentil	Dia
1,0%	31/05/1999
2,5%	12/08/2000
5,0%	17/06/1997
10,0%	30/05/1998

São reproduzidas, a seguir, as tabelas representativas dos dias típicos de verão e inverno, em seus diversos níveis (TABELAS 5.3 a 5.10). O procedimento de cálculo encontra-se no Apêndice I. As tabelas são apresentadas segundo os seguintes parâmetros⁹:

n = ordem do dia no ano

data = data relativa ao dia selecionado entre os 1.827 dias do período considerado (1996-2000)

t_{comp} = temperatura compensada ($^{\circ}\text{C}$)

s = número de horas de insolação diária (h)

δ = declinação solar ($^{\circ}$)

K_t = índice de transparência (adimensional)

H_t = radiação total incidente em uma superfície horizontal (W/m^2)

I_{md} = radiação média diária em uma superfície horizontal (W/m^2)

$t_{\text{sa}}(\alpha=0,4)$ = temperatura sol-ar, absorvância 0,4 ($^{\circ}\text{C}$)

$t_{\text{sa}}(\alpha=0,7)$ = temperatura sol-ar, absorvância 0,7 ($^{\circ}\text{C}$)

São destacados os dias escolhidos nos respectivos percentis, bem como as médias dos diversos parâmetros em questão.

⁹ As tabelas apresentam apenas os parâmetros relevantes à sequência dos cálculos de transmissão de calor em regime periódico.

TABELA 5.3: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 10%

n	Data	t_{comp}	s	δ	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}	t_{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m²	W/m²	0,4	0,7
49	18/2/99	25,6	9,5	-12,3493	0,6654	7.270,58	302,94	30,4	34,1
57	26/2/00	25,8	9,3	-9,4977	0,6620	7.049,79	293,74	30,4	34,0
22	22/1/00	25,6	9,0	-19,9709	0,6296	7.275,73	303,16	30,5	34,1
316	12/11/97	26,6	6,2	-18,3246	0,5136	5.832,49	243,02	30,5	33,4
32	1/2/98	25,3	10,3	-17,5721	0,6895	7.844,18	326,84	30,5	34,5
65	6/3/99	26,0	9,2	-6,4665	0,6633	6.851,94	285,50	30,6	34,0
11	11/1/98	25,0	11,3	-21,9264	0,7221	8.438,49	351,60	30,6	34,8
43	12/2/99	25,2	11,0	-14,3375	0,7265	8.070,15	336,26	30,6	34,6
352	18/12/99	25,2	10,6	-23,4151	0,6895	8.109,52	337,90	30,6	34,7
73	14/3/98	26,0	10,0	-3,3130	0,7058	7.039,73	293,32	30,6	34,2
53	22/2/97	26,0	9,0	-10,9494	0,6461	6.973,18	290,55	30,6	34,1
311	7/11/98	25,7	9,6	-16,9998	0,6607	7.429,96	309,58	30,7	34,4
287	14/10/97	25,8	10,0	-9,0903	0,6939	7.284,27	303,51	30,7	34,3
MÉDIAS		25,7	9,6	-14,2	0,67	7.343,85	305,99	30,6	34,2

TABELA 5.4: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 5%

n	Data	t_{comp}	s	δ	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}	t_{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m²	W/m²	0,4	0,7
277	4/10/98	26,5	10,5	-5,2558	0,7243	7.304,61	304,36	31,3	35,0
339	5/12/99	25,5	12,0	-22,5486	0,7497	8.763,78	365,16	31,3	35,7
331	27/11/99	26,3	9,8	-21,4520	0,6604	7.663,20	319,30	31,4	35,2
348	14/12/98	27,2	7,1	-23,2718	0,5446	6.397,64	266,57	31,4	34,6
355	21/12/99	25,9	11,0	-23,4499	0,7060	8.307,62	346,15	31,4	35,6
18	18/1/99	26,6	9,0	-20,7687	0,6281	7.293,35	303,89	31,5	35,1
314	9/11/96	25,9	11,6	-17,8104	0,7444	8.421,65	350,90	31,5	35,7
315	10/11/96	25,8	11,8	-18,0702	0,7523	8.527,30	355,30	31,5	35,7
36	5/2/97	26,5	9,7	-16,4629	0,6661	7.518,53	313,27	31,5	35,3
255	12/9/98	27,1	10,4	3,5604	0,7394	6.668,21	277,84	31,5	34,9
23	23/1/00	26,0	11,2	-19,7565	0,7229	8.342,71	347,61	31,6	35,7
303	30/10/97	27,3	7,7	-14,6231	0,5831	6.435,49	268,15	31,6	34,8
38	7/2/98	26,9	8,8	-15,8787	0,6285	7.064,16	294,34	31,6	35,1
MÉDIAS		26,4	10,0	-16,6	0,68	7.592,94	316,37	31,5	35,3

TABELA 5.5: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 2,5%

n	Data	t_{comp}	s	δ	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}	t_{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m²	W/m²	0,4	0,7
336	2/12/98	26,5	11,5	-22,1864	0,7298	8.510,13	354,59	32,2	36,4
355	21/12/98	26,9	10,3	-23,4499	0,6770	7.966,15	331,92	32,2	36,2
312	7/11/96	26,9	10,9	-17,2751	0,7157	8.065,31	336,05	32,2	36,3
347	13/12/98	26,3	12,4	-23,2188	0,7647	8.979,20	374,13	32,2	36,7
360	26/12/97	27,2	9,5	-23,3691	0,6440	7.577,96	315,75	32,3	36,0
364	30/12/97	27,0	10,5	-23,1800	0,6859	8.065,35	336,06	32,4	36,4
353	19/12/99	27,0	10,6	-23,4337	0,6895	8.110,64	337,94	32,4	36,5
22	22/1/98	26,8	11,5	-19,9709	0,7350	8.494,25	353,93	32,4	36,7
5	5/1/98	26,5	12,2	-22,6664	0,7578	8.889,68	370,40	32,4	36,9
21	21/1/99	27,9	8,0	-20,1793	0,5871	6.792,97	283,04	32,4	35,8
70	11/3/97	27,6	10,5	-4,5061	0,7259	7.340,70	305,86	32,4	36,1
320	16/11/98	26,9	11,5	-19,2873	0,7366	8.423,44	350,98	32,5	36,7
24	24/1/98	27,2	10,3	-19,5363	0,6853	7.898,70	329,11	32,5	36,4
MÉDIAS		27,0	10,7	-20,2		8.085,73	336,91	32,3	36,4

TABELA 5.6: Caracterização de dias típicos de verão, 1% - Percentil 1%

n	Data	t_{comp}	s	δ	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}	t_{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m²	W/m²	0,4	0,7
25	25/1/96	27,6	9,9	-19,3102	0,6689	7.698,16	320,76	32,7	36,5
306	2/11/97	27,3	11,6	-15,5493	0,7497	8.335,92	347,33	32,9	37,0
92	1/4/00	28,5	10,1	4,3159	0,7270	6.558,17	273,26	32,9	36,2
342	8/12/98	27,0	12,3	-22,8507	0,7615	8.918,74	371,61	32,9	37,4
2	2/1/98	27,7	10,0	-22,9463	0,6656	7.819,02	325,79	32,9	36,8
19	19/1/99	27,2	12,2	-20,5783	0,7630	8.850,08	368,75	33,1	37,5
358	24/12/97	27,8	10,5	-23,4222	0,6854	8.065,47	336,06	33,1	37,2
313	9/11/97	27,5	11,9	-17,5454	0,7578	8.556,72	356,53	33,2	37,4
30	30/1/96	27,8	11,1	-18,0959	0,7224	8.248,45	343,69	33,2	37,4
31	31/1/98	28,0	10,4	-17,8366	0,6932	7.900,67	329,19	33,3	37,2
361	27/12/97	27,8	11,3	-23,3322	0,7187	8.456,48	352,35	33,4	37,6
29	29/1/96	27,6	12,2	-18,3497	0,7686	8.790,71	366,28	33,5	37,9
337	3/12/98	27,7	12,0	-22,3137	0,7503	8.757,03	364,88	33,5	37,9
MÉDIAS		27,6	11,2	-18,3	0,73	8.227,36	342,81	33,1	37,2

TABELA 5.7: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 10%

n	Data	t _{comp}	s	δ	K _t	H _t	I _{md}	t _{sa}	t _{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m ²	W/m ²	0,4	0,7
141	21/5/99	15,5	8,0	20,0800	0,6604	4.430,87	184,62	18,4	20,6
149	29/5/97	16,1	5,8	21,5518	0,5502	3.562,30	148,43	18,4	20,2
303	30/10/98	16,6	0,0	-14,6231	0,2500	2.759,00	114,96	18,4	19,8
160	8/6/96	15,3	9,7	22,9056	0,7563	4.730,43	197,10	18,5	20,8
213	31/7/96	15,1	9,3	17,9980	0,7214	5.037,69	209,90	18,5	21,0
144	24/5/97	17,2	0,8	20,6781	0,2912	1.925,99	80,25	18,5	19,4
150	30/5/98	17,3	0,9	21,7076	0,2966	1.913,10	79,71	18,5	19,5
201	19/7/96	15,3	9,8	20,6971	0,7546	4.961,54	206,73	18,6	21,0
111	21/4/99	15,5	7,0	11,4878	0,5926	4.751,14	197,96	18,6	21,0
166	14/6/96	15,6	9,2	23,3013	0,7314	4.526,27	188,59	18,6	20,9
131	10/5/96	17,2	1,0	17,7103	0,3006	2.128,41	88,68	18,6	19,7
155	3/6/96	15,7	8,7	22,3894	0,7026	4.454,16	185,59	18,6	20,8
159	8/6/98	15,7	9,2	22,8158	0,7299	4.576,30	190,68	18,7	21,0
MÉDIAS		16,0	6,1	17,6	0,56	3.827,48	159,48	18,5	20,4

TABELA 5.8: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 5%

n	Data	t _{comp}	s	δ	K _t	H _t	I _{md}	t _{sa}	t _{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m ²	W/m ²	0,4	0,7
166	15/6/99	15,5	2,1	23,3013	0,3599	2.227,17	92,80	16,9	18,0
165	14/6/99	16,0	0,0	23,2525	0,2500	1.549,23	64,55	17,0	17,8
150	29/5/00	15,0	4,4	21,7076	0,4780	3.082,58	128,44	17,0	18,5
167	16/6/97	14,0	9,2	23,3432	0,7315	4.521,76	188,41	17,0	19,3
166	15/6/97	16,1	0,0	23,3013	0,2500	1.547,15	64,46	17,1	17,9
176	25/6/98	14,4	8,0	23,4087	0,6689	4.123,93	171,83	17,1	19,2
168	17/6/97	15,5	3,0	23,3782	0,4071	2.513,62	104,73	17,2	18,4
171	20/6/97	16,2	0,0	23,4417	0,2500	1.540,82	64,20	17,2	17,9
241	28/8/00	15,8	0,0	8,9860	0,2500	2.072,35	86,35	17,2	18,2
212	31/7/99	14,7	6,0	18,2539	0,5546	3.851,37	160,47	17,2	19,1
149	29/5/98	16,1	0,4	21,5518	0,2707	1.752,69	73,03	17,2	18,1
214	2/8/98	16,0	0,3	17,7367	0,2652	1.862,27	77,59	17,2	18,2
140	20/5/99	14,7	6,2	19,8687	0,5677	3.827,63	159,48	17,3	19,2
MÉDIAS		15,4	3,0	20,9	0,41	2.651,74	110,5	17,1	18,4

TABELA 5.9: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 2,5%

n	Data	t _{comp}	s	δ	K _t	H _t	I _{md}	t _{sa}	t _{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m ²	W/m ²	0,4	0,7
150	30/5/97	14,0	4,8	21,7076	0,4987	3.216,23	134,01	16,1	17,7
201	19/7/00	15,0	0,0	20,6971	0,2500	1.643,73	68,49	16,1	16,9
220	8/8/97	14,9	0,2	16,0618	0,2600	1.891,01	78,79	16,1	17,1
182	30/6/96	13,5	7,3	23,1408	0,6316	3.918,31	163,26	16,1	18,1
193	11/7/96	12,9	9,8	22,0138	0,7587	4.836,03	201,50	16,1	18,5
160	9/6/97	12,9	10,1	22,9056	0,7772	4.861,02	202,54	16,1	18,6
225	12/8/00	14,2	3,0	14,5346	0,3992	2.992,80	124,70	16,1	17,6
174	22/6/00	14,3	4,1	23,4427	0,4647	2.863,29	119,30	16,2	17,6
145	25/5/97	15,0	0,5	20,8653	0,2758	1.815,80	75,66	16,2	17,1
255	11/9/96	14,3	1,4	3,5604	0,3159	2.848,62	118,69	16,2	17,6
151	31/5/97	13,8	6,3	21,8569	0,5767	3.705,49	154,40	16,2	18,1
277	4/10/99	14,7	0,0	-5,2558	0,2500	2.521,23	105,05	16,4	17,6
157	6/6/99	15,4	0,0	22,6160	0,2500	1.575,59	65,65	16,4	17,2
MÉDIAS		14,2	3,7	17,5	0,44	2.976,09	124,00	16,2	17,7

TABELA 5.10: Caracterização de dias típicos de inverno, 1% - Percentil 1%

n	Data	t _{comp}	s	δ	K _t	H _t	I _{md}	t _{sa}	t _{sa}
–	dd/mm/aa	°C	hs	graus	–	W/m ²	W/m ²	0,4	0,7
194	12/7/96	11,4	4,4	21,8715	0,4782	3.058,46	127,44	13,4	14,9
202	20/7/00	12,8	0,5	20,5044	0,2757	1.820,89	75,87	14,0	14,9
200	18/7/00	13,0	1,0	20,8837	0,3015	1.974,10	82,25	14,3	15,3
202	21/7/97	14,0	0,0	20,5044	0,2500	1.651,06	68,79	15,1	15,9
204	22/7/96	11,7	10,3	20,1008	0,7785	5.189,03	216,21	15,1	17,7
222	10/8/97	11,4	10,6	15,4646	0,7798	5.739,53	239,15	15,2	18,0
151	31/5/99	13,2	4,4	21,8569	0,4782	3.072,42	128,02	15,2	16,7
254	10/9/96	14,0	0,0	3,9586	0,2500	2.241,53	93,40	15,4	16,6
191	10/7/98	14,0	2,0	22,2787	0,3540	2.242,12	93,42	15,4	16,6
206	24/7/00	13,6	3,6	19,6735	0,4342	2.922,67	121,78	15,5	17,0
205	23/7/00	14,6	0,0	19,8901	0,2500	1.674,39	69,77	15,7	16,6
198	16/7/00	14,0	3,2	21,2382	0,4153	2.696,41	112,35	15,7	17,1
171	20/6/99	15,0	0,0	23,4417	0,2500	1.540,82	64,20	16,0	16,7
MÉDIAS		13,2	3,1	19,4	0,41	2.755,65	114,82	15,1	16,5

Os dias típicos de verão e inverno para a cidade de Campinas foram selecionados segundo o índice de transparência (K_t). Os percentis foram examinados e chegou-se aos maiores valores de K_t nos percentis de 1%, tanto para verão como para inverno, razão pela qual os dias típicos foram selecionados nestes níveis. Assegurou-se o comportamento periódico da temperatura externa e da radiação solar (dias claros), necessário aos cálculos subseqüentes, através da seleção de dias com K_t igual ou superior a 0,75 (LIU e JORDAN, 1960). Da série de 1.827 dias, 171 dias apresentaram K_t igual ou superior a 0,75, o que equivale a dizer que aproximadamente 9% dos dias da série de 5 anos adotada podem ser considerados claros.

TABELA 5.11: Dia típico de verão selecionado no percentil 1%

DIA TÍPICO DE VERÃO							
n	data	t_c	h.i.	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}^1
–	–	°C	h	–	W/m ²	W/m ²	°C
29	29/01/96	27,6	12,2	0,7686	8.790,71	366,28	33,5

¹ temperatura sol-ar correspondente a uma absorvância solar da superfície externa de 0,4 (cinza claro)

TABELA 5.12: Dia típico de inverno selecionado no percentil 1%

DIA TÍPICO DE INVERNO							
n	data	t_c	h.i.	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}^1
–	–	°C	h	–	W/m ²	W/m ²	°C
204	22/07/96	11,7	10,3	0,7785	5.189,03	216,21	15,1

¹ temperatura sol-ar correspondente a uma absorvância solar da superfície externa de 0,4 (cinza claro)

5.2 Comportamento periódico da temperatura externa e da radiação solar em superfícies horizontais homogêneas

Os resultados apresentados a seguir (TABELA 5.13) restringem-se ao dia típico de verão. De posse do dia típico de verão (TABELA 5.11), calculou-se os valores horários da temperatura externa (t_e), conforme RORIZ, (1991). Obteve-se então os valores horários das radiações difusa (I_d), direta (I_b) e total (I_t), conforme seção 3.3.3. Ressalta-se que todos os cálculos são efetuados em função do tempo solar. Para converter-se o tempo solar ao tempo local, sugere-se as EQUAÇÕES 3.2, 3.3 e 3.4.

TABELA 5.13: Valores horários da temperatura externa e da radiação solar em suas componentes difusa, direta e total, em superfície horizontal, dia típico de verão

Tsolar	ω graus	r_d	r_t	I W/m ²	I_d W/m ²	I_b W/m ²	t_e °C
12	180	-0,0915	-0,0321	—	—	—	25,0
11	165	-0,0879	-0,0320	—	—	—	23,8
10	150	-0,0772	-0,0309	—	—	—	22,8
9	135	-0,0603	-0,0277	—	—	—	22,0
8	120	-0,0383	-0,0205	—	—	—	21,5
7	105	-0,0126	-0,0079	—	—	—	21,2
6	90	0,0149	0,0107	94,11	19,61	74,50	21,5
5	75	0,0424	0,0345	303,42	55,85	247,57	22,2
4	60	0,0681	0,0614	539,85	89,61	450,24	23,7
3	45	0,0901	0,0881	774,75	118,61	656,14	25,8
2	30	0,1071	0,1109	974,97	140,86	834,11	28,4
1	15	0,1177	0,1262	1.109,70	154,84	954,86	31,0
0	0	0,1213	0,1316	1.157,22	159,61	997,61	32,8
1	15	0,1177	0,1262	1.109,70	154,84	954,86	33,7
2	30	0,1071	0,1109	974,97	140,86	834,11	34,0
3	45	0,0901	0,0881	774,75	118,61	656,14	33,7
4	60	0,0681	0,0614	539,85	89,61	450,24	33,2
5	75	0,0424	0,0345	303,42	55,85	247,57	32,5
6	90	0,0149	0,0107	94,11	19,61	74,50	31,6
7	105	-0,0126	-0,0079	—	—	—	30,7
8	120	-0,0383	-0,0205	—	—	—	29,6
9	135	-0,0603	-0,0277	—	—	—	28,5
10	150	-0,0772	-0,0309	—	—	—	27,5
11	165	-0,0879	-0,0320	—	—	—	26,3
12	180	-0,0915	-0,0321	—	—	—	25,0

A FIGURA 5.1 apresenta as variações horárias da temperatura externa para o dia típico de verão de Campinas. Nota-se que a temperatura mínima ocorre um pouco antes do nascer do sol, enquanto que a máxima se verifica a duas horas e meia após o meio-dia solar. As variações típicas das radiações difusa, direta e total também podem ser verificadas. O valor máximo da radiação solar direta ocorre ao meio-dia solar, correspondendo a aproximadamente 1.157 W/m^2 .

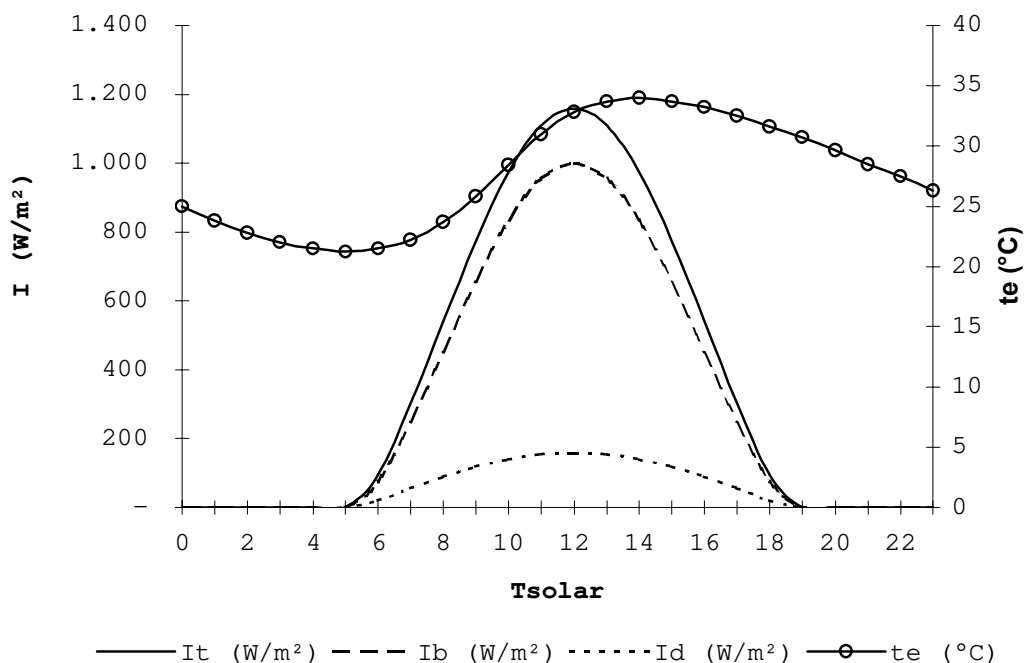


FIGURA 5.1: Valores horários da temperatura externa e da radiação solar em suas componentes difusa, direta e total, em superfície horizontal, dia típico de verão

5.3 Dados da temperatura sol-ar para o dia típico de verão

Os dados de temperatura externa e de radiação solar total mostrados na seção anterior permitem o cálculo dos valores horários da temperatura sol-ar, conforme EQUAÇÃO 3.1. Os valores obtidos da temperatura sol-ar para o dia típico de verão são apresentados na TABELA 5.14 e representados graficamente na FIGURA 5.2.

Modelou-se matematicamente a curva periódica da temperatura sol-ar através de séries de Fourier. Como já mencionado anteriormente, dois harmônicos são normalmente suficientes para convergência da variação periódica da temperatura sol-ar sobre uma superfície horizontal. O procedimento para análise harmônica adotado para o cálculo dos coeficientes da EQUAÇÃO 3.48 foi adaptado de ALFORD *et alii*, (1939), e é descrito detalhadamente no Apêndice III.

TABELA 5.14: Valores horários de temperatura sol-ar em superfície horizontal para o dia típico de verão, $\alpha = 0,4, 0,7$ e $0,9$, $h_c = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\delta R = 63 \text{ W/m}^2$

Tsolar	t _e (°C)	I	t _{sa} (°C)	t _{sa} (°C)	t _{sa} (°C)
	(°C)	(W/m ²)	$\alpha=0,4$	$\alpha=0,7$	$\alpha=0,9$
0	25,0	–	22,4	22,4	22,4
1	23,8	–	21,2	21,2	21,2
2	22,8	–	20,2	20,2	20,2
3	22,0	–	19,4	19,4	19,4
4	21,5	–	18,9	18,9	18,9
5	21,2	–	18,6	18,6	18,6
6	21,5	94,11	20,6	21,9	22,8
7	22,2	303,42	25,2	29,3	32,1
8	23,7	539,85	31,0	38,4	43,3
9	25,8	774,75	37,4	48,0	55,1
10	28,4	974,97	43,6	57,0	65,9
11	31,0	1.109,70	48,7	63,9	74,0
12	32,8	1.157,22	51,3	67,2	77,8
13	33,7	1.109,70	51,4	66,6	76,7
14	34,0	974,97	49,2	62,6	71,5
15	33,7	774,75	45,3	55,9	63,0
16	33,2	539,85	40,5	47,9	52,8
17	32,5	303,42	35,5	39,6	42,4
18	31,6	94,11	30,7	32,0	32,9
19	30,7	–	28,1	28,1	28,1
20	29,6	–	27,0	27,0	27,0
21	28,5	–	25,9	25,9	25,9
22	27,5	–	24,9	24,9	24,9
23	26,3	–	23,7	23,7	23,7

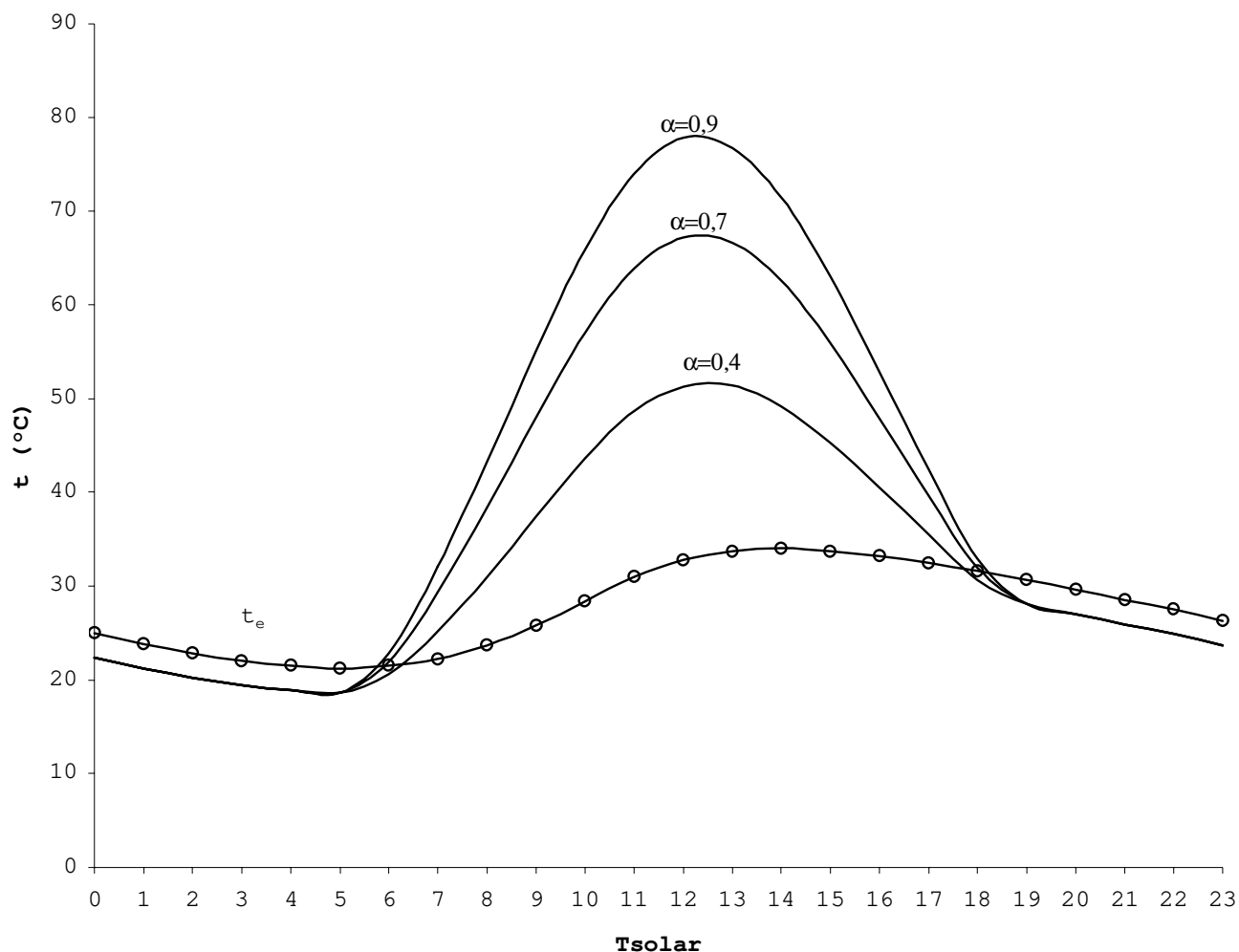


FIGURA 5.2: Variação periódica da temperatura do ar externo e da temperatura sol-ar para o dia típico de verão em superfície horizontal

Os valores para a temperatura sol-ar reproduzidos através de séries de Fourier são mostrados na TABELA 5.15 e representados graficamente pela FIGURA 5.3.

TABELA 5.15: Valores horários de temperatura sol-ar em superfície horizontal para o dia típico de verão, e valores por séries de Fourier, absortância $\alpha = 0,4$

Tsolar	t_{sa}	1° harm	2° harm
	(°C)	(°C)	(°C)
0	22,4	20,9	25,8
1	21,2	20,0	24,4
2	20,2	20,0	22,8
3	19,4	21,0	21,3
4	18,9	22,8	20,6
5	18,6	25,3	21,3
6	20,6	28,4	23,5
7	25,2	31,8	27,4
8	31,0	35,4	32,7
9	37,4	38,8	38,5
10	43,6	41,9	44,0
11	48,7	44,4	48,4
12	51,3	46,1	51,0
13	51,4	47,0	51,4
14	49,2	47,0	49,7
15	45,3	46,0	46,4
16	40,5	44,2	42,1
17	35,5	41,7	37,6
18	30,7	38,6	33,7
19	28,1	35,2	30,8
20	27,0	31,6	28,9
21	25,9	28,2	27,8
22	24,9	25,1	27,3
23	23,7	22,6	26,7

As equações representativas obtidas para o cálculo da temperatura sol-ar para o dia típico de verão de Campinas foram:

Série de Fourier com 1 harmônico (θ é o número de horas a partir da meia-noite solar):

$$t_{sa} = 31,7 + 14,8 \cos(15\theta - 200) \quad (5.1)$$

Série de Fourier com 2 harmônicos (θ é o número de horas a partir da meia-noite solar):

$$t_{sa} = 31,7 + 14,8 \cos(15\theta - 200) + 5,5 \cos(30\theta - 3) \quad (5.2)$$

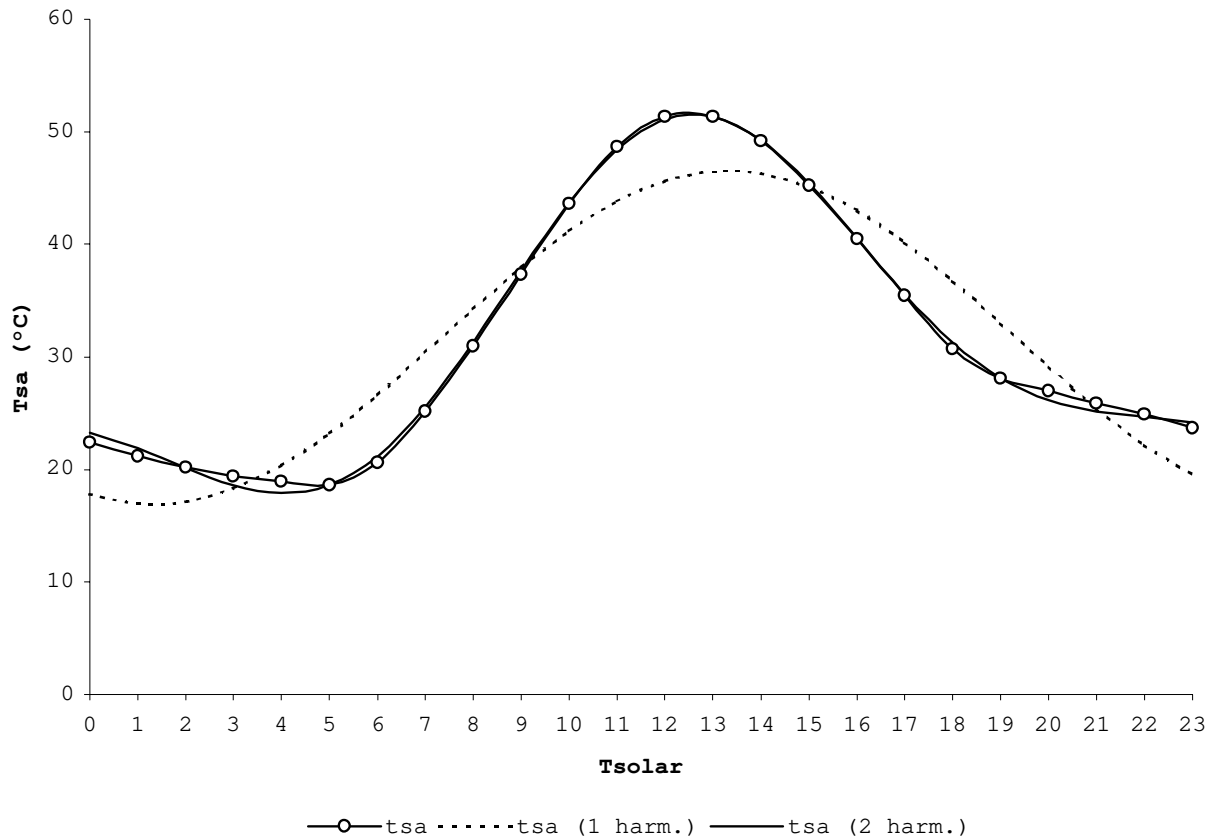


FIGURA 5.3: Convergência da temperatura sol-ar e sua representação através de séries de Fourier com um e dois harmônicos, dia típico de verão (superfície horizontal, $\alpha = 0,4$)

Nota-se pela FIGURA 5.3 que 2 harmônicos são suficientes para uma boa convergência da curva da t_{sa} obtida por série de Fourier e a curva da t_{sa} real. A TABELA 5.16 mostra as constantes necessárias para determinação da equação analítica da temperatura sol-ar em superfície horizontal para o dia típico de verão, contendo dois harmônicos (EQUAÇÕES 5.1 e 5.2).

TABELA 5.16: Coeficientes para as equações da temperatura sol-ar obtidas por análise de Fourier ($\alpha = 0,4$)

Período do ano	$t_{sa,m}$ (°C)	$t_{sa,1}$ (°C)	ψ_1 (°)	$t_{sa,2}$ (°C)	ψ_2 (°)
Dia típico de verão	31,7	14,8	200	5,5	3

5.4 Transmissão de calor em regime periódico e inércia térmica em fechamentos opacos homogêneos

Considera-se a seguir o fenômeno da transmissão de calor em regime periódico através de um fechamento horizontal composto de um material homogêneo. A temperatura da superfície interna do fechamento pode ser calculada através da EQUAÇÃO 3.54. Já a densidade de fluxo de calor é obtida pela EQUAÇÃO 3.63, enquanto que os parâmetros de amortecimento e atraso da onda térmica, relacionados à inércia térmica, podem ser calculados pelas EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, opta-se por demonstrá-los através de exemplos numéricos.

EXEMPLO 1:

A cobertura de um edifício é composta por uma laje de concreto de 20 cm de espessura, e foi pintada de cinza claro (absortância à radiação solar 0,4, emissividade 0,9). A temperatura no interior da edificação é de 26 °C e mantida constante. Para o dia típico de verão de Campinas, qual será:

- a densidade de fluxo de calor através da laje ao longo deste dia ?*
- a densidade de fluxo de calor se a capacidade de armazenamento de calor da parede for desprezada ?*

Solução a:

Para o fechamento em questão, temos:

$h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$, exposição normal, $v = 3,3 \text{ m/s}$ (Apêndice IV)

$h_i = 6,30 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ (Apêndice IV)

para o concreto, têm-se (ABNT, 1998):

$$\rho = 2.200 \text{ kg/m}^3, \lambda = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} = 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$$

cálculo da difusividade térmica do fechamento (EQUAÇÃO. 3.58):

$$\alpha_d = \frac{\lambda}{\rho c}$$

$$\alpha_d = \frac{1,75}{0,28 \times 2.200} = 0,0028 \text{ m}^2/\text{h}$$

cálculo da transmitância térmica (EQUAÇÃO 3.55):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{21,9} + \frac{0,20}{1,74} + \frac{1}{6,30}} \Rightarrow U = 3,14 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

pela EQUAÇÃO 3.45:

$$\omega_1 = 2\pi / 24 = 15^\circ / \text{h} = 0,2618 \text{ rad/h}$$

$$\omega_2 = 2 \times \omega_1 = 30^\circ / \text{h} = 0,5236 \text{ rad/h}$$

pela EQUAÇÃO 3.57:

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{0,2618}{2 \times 0,0029}} \Rightarrow \sigma_1 = 6,79 \text{ m}^{-1}$$

$$\sigma_2 = \sqrt{2} \times \sigma_1 = 9,60 \text{ m}^{-1}$$

$$\sigma_1 d = 6,79 \times 0,20 = 1,36 \text{ rad} = 77,9^\circ$$

$$\sigma_2 d = 9,60 \times 0,20 = 1,92 \text{ rad} = 110,0^\circ$$

pela EQUAÇÃO 3.59, tem-se:

$$Y_1 = 0,5774$$

pela EQUAÇÃO 3.60:

$$Z_1 = 7,4221$$

De maneira semelhante, obtém-se:

$$Y_2 = -5,8942$$

$$Z_2 = 8,4746$$

pela EQUAÇÃO 3.61, têm-se:

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{7,4221}{0,5774} \right) \Rightarrow \varphi_1 = 86^\circ \text{ ou } 266^\circ$$

$$\sin 86^\circ > 0 \therefore = \text{sinal } Z_1$$

$$\cos 86^\circ > 0 \therefore = \text{sinal } Y_1$$

$$\text{então, } \varphi_1 = 86^\circ$$

analogamente, $\varphi_2 = 125^\circ$

pela EQUAÇÃO 3.56:

$$V_1 = \frac{21,9 \times 6,30}{6,79 \times 1,75 \sqrt{0,5774^2 + 7,4221^2}} \Rightarrow V_1 = 1,5602 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

analogamente, $V_2 = 0,7956 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

pela EQUAÇÃO 3.64, calcula-se:

$$\mu_1 = \frac{1,5602}{3,14} \Rightarrow \mu_1 = 0,50$$

de maneira semelhante, $\mu_2 = 0,25$

Os coeficientes da temperatura sol ar já calculados para o dia típico de verão de Campinas são obtidos da TABELA 5.16. Finalmente podemos obter a equação da densidade de fluxo de calor, segundo a forma da EQUAÇÃO 3.63. Sua forma final é:

$$q_i = 3,14[5,7 + 7,4 \cos(15\theta - 286) + 1,38 \cos(30\theta - 128)] \quad (5.3)$$

Solução b:

Desconsiderando-se a capacidade de armazenamento do fechamento, têm-se: $\mu_n = 1,00$ e $\phi_n = 0$. Equivale a dizer que q_i está em fase com a temperatura sol-ar. Então a equação para q_i se reduz a:

$$q_i = 3,14[5,7 + 14,8 \cos(15\theta - 200) + 5,5 \cos(30\theta - 3)] \quad (5.4)$$

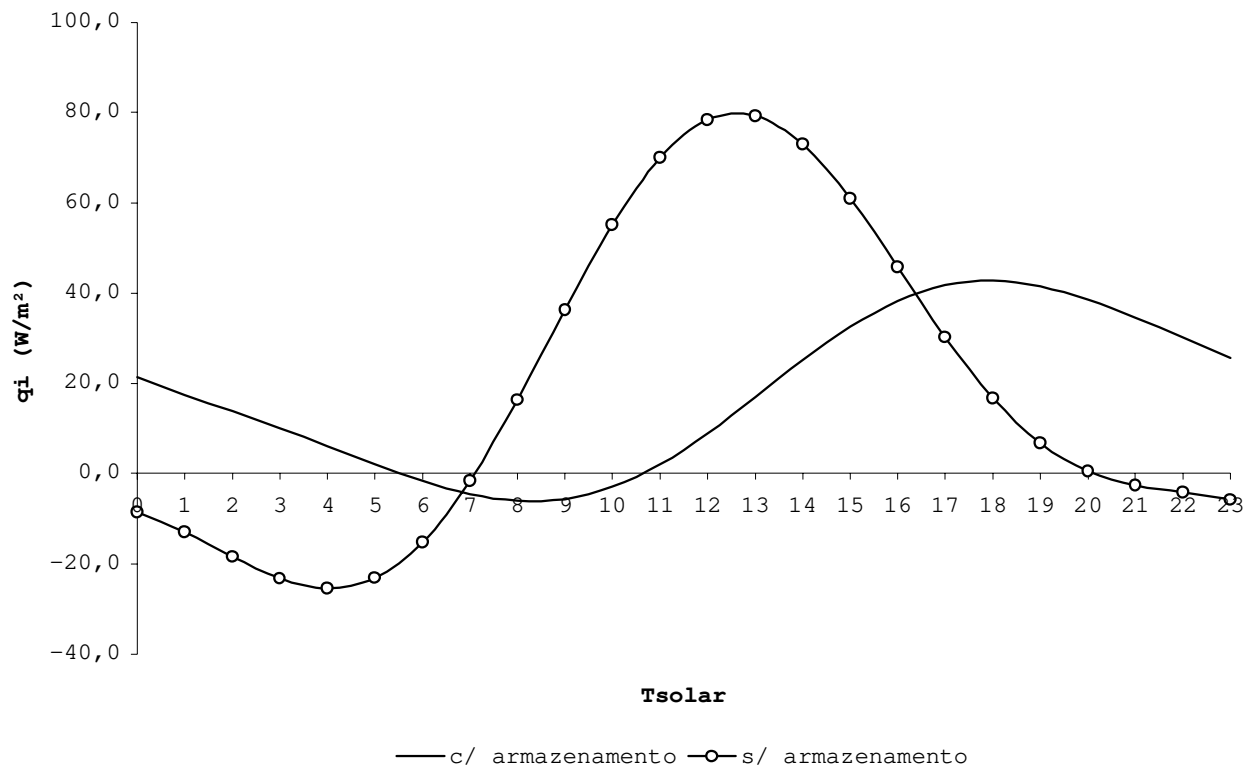


FIGURA 5.4: Solução gráfica para o EXEMPLO 1

O atraso da curva B em relação à curva A foi de 5,7 h pela figura acima. O valor do ângulo de atraso para o primeiro harmônico foi $\phi_1 = 86^\circ/15^\circ/\text{h} = 5,73 \text{ h}$, bem próximo ao obtido pela FIGURA 5.4. A figura acima mostra também que o valor máximo de q_i considerando-se a capacidade de armazenamento de calor do fechamento correspondeu a 54% do valor máximo de q_i quando se desconsiderou esta capacidade.

EXEMPLO 2: Obter a densidade de fluxo de calor instantâneo, 4h após o meio-dia solar, através da laje do EXEMPLO 1, mantendo-se as mesmas condições.

Solução: a densidade de fluxo de calor através da laje do EXEMPLO 1 é dada pela EQUAÇÃO 5.3:

então,

$$q_i = 3,14[5,7 + 7,4 \cos(15 \times 16 - 286) + 1,38 \cos(30 \times 16 - 128)]$$

$$q_i = 38,3 \text{ W/m}^2$$

EXEMPLO 3: Obter a equação para a variação periódica da temperatura da superfície interna da laje do EXEMPLO 1, mantendo-se as mesmas condições. Calcular também o valor instantâneo da temperatura da superfície interna da parede 4h após o meio-dia solar, e a representação gráfica da variação de $t_{s,i}$ e $t_{s,a}$.

Solução: a temperatura da superfície interna de um fechamento é dada pela EQUAÇÃO 3.54:

então,

$$t_{s,i} = 26 + \frac{1}{6,3} [3,14(31,7 - 26) + 1,5602 \times 14,8 \cos(15\theta - 200 - 86) + 0,7956 \times 5,5 \cos(30\theta - 3 - 125)]$$

$$t_{s,i} = 26 + [2,8 + 3,7 \cos(15\theta - 286) + 0,7 \cos(30\theta - 128)] \quad (5.5)$$

o valor instantâneo de $t_{s,i}$, 4h após o meio-dia solar foi: (utilizou-se 16h pois a contagem do tempo se inicia a partir da meia-noite solar)

$$t_{s,i} = 26 + [2,8 + 3,7 \cos(15 \times 16 - 286) + 0,7 \cos(30 \times 16 - 128)], \text{ então } t_{s,i} = 32,1^\circ\text{C}$$

A representação gráfica da temperatura da superfície interna da laje foi confrontada com a temperatura sol-ar para o dia típico de verão em superfície horizontal. Sua forma é mostrada na FIGURA 5.5, notando-se o atraso da temperatura da superfície interna em relação à temperatura sol-ar:

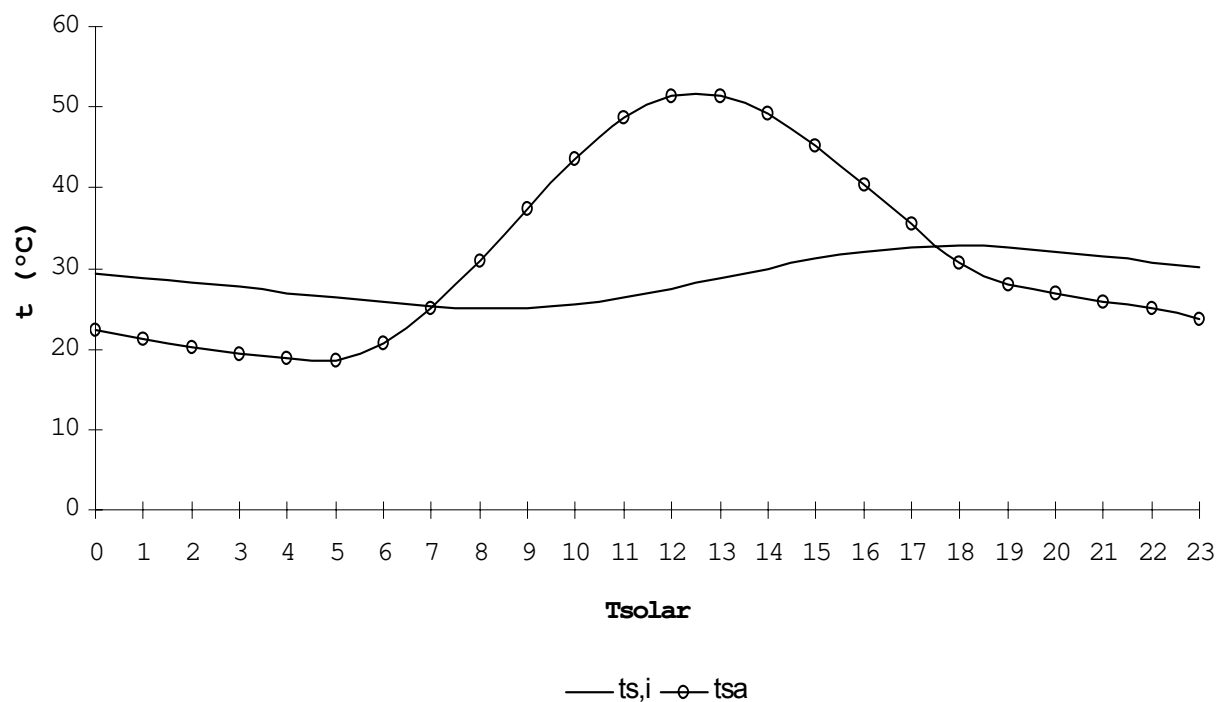


FIGURA 5.5: Valores periódicos da temperatura na superfície interna para a laje do EXEMPLO 1 e a temperatura sol-ar

5.5 Influência cromática sobre a transmissão de calor em fechamentos opacos

Estudou-se a influência da cor na transmissão de calor através de um fechamento opaco homogêneo (placa de concreto). A temperatura da superfície interna do fechamento pode ser calculada através da EQUAÇÃO 3.54. Já a densidade de fluxo de calor é obtida pela EQUAÇÃO 3.63. A influência da cor foi investigada através da absorvância à radiação solar da face externa do fechamento. Desejou-se investigar também a diminuição da influência da absorvância, à medida que aumenta-se a espessura do fechamento. Para maior clareza, demonstra-se estes resultados através de um exemplo numérico.

EXEMPLO 4: *Demonstrar a influência da absorvância à radiação solar da face externa de uma placa de concreto horizontal, emissividade 0,9. Mostrar graficamente a relação entre as cores branca ($\alpha=0,2$) e cinza ($\alpha=0,7$), com as placas de concreto assumindo espessuras de 5 cm e 20 cm. Considerar o dia típico de verão de Campinas, e que a temperatura interna é mantida constante em 26 °C.*

Para o fechamento em questão, temos:

$$h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}, \text{ exposição normal, } v = 3,3 \text{ m/s}$$

$$h_i = 6,30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

para a placa de concreto em questão, considerar:

$$\rho_c = 2.243 \text{ kg/m}^3, \lambda_c = 1,73 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c_c = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ ou } 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}.$$

O processo de cálculo segue o EXEMPLO 1 e foi automatizado na planilha eletrônica “TRANSCALOR”:

A transmitância térmica U apresentou os seguintes valores (EQUAÇÃO 3.55):

$$\text{Para a placa de 5 cm, } U = 4,29 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Para a placa de 20 cm, } U = 3,13 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Os coeficientes para a temperatura sol-ar, absorptância 0,2 (branco), obtidos para o dia típico de verão de Campinas foram (TABELA 5.17):

TABELA 5.17: Coeficientes para temperatura sol-ar, obtidos por análise harmônica, $\alpha=0,2$ (branco)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
$t_{sa,m}$	28,4	–
$t_{sa,n}$	10,1	3,3
Ψ_n	210°	6°

A equação em função do tempo θ para a temperatura sol-ar (EQUAÇÃO 3.48), submetida à análise de Fourier para dois harmônicos (superfície horizontal), para o dia típico de Campinas, absorptância 0,2 (branco) assume a forma:

$$t_{sa} = 28,4 + [10,1 \cos(15\theta - 210) + 3,3 \cos(30\theta - 6)]$$

Os coeficientes para a temperatura sol-ar, absorptância 0,7 (cinza), obtidos para o dia típico de verão de Campinas foram (TABELA 5.18):

TABELA 5.18: Coeficientes para temperatura sol-ar, obtidos por análise harmônica, $\alpha=0,7$ (cinza)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
$t_{sa,m}$	36,7	–
$t_{sa,n}$	22,2	8,6
Ψ_n	193°	2°

A equação para a temperatura sol-ar, absorptância 0,7 (cinza), assume a forma:

$$t_{sa} = 36,7 + [22,2 \cos(15\theta - 193) + 8,6 \cos(30\theta - 2)]$$

Os coeficientes de amortecimento e atraso da onda de calor, para a placa com espessura 5 cm, obtidos pelo “TRANSCALOR” foram (TABELA 5.19):

TABELA 5.19: Coeficientes de amortecimento e atraso obtidos pelo “TRANSCALOR”, d = 5cm

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	20,2°	37,4°
μ_n	0,950	0,835

Para a placa com espessura 20 cm os coeficientes são (TABELA 5.20):

TABELA 5.20: Coeficientes de amortecimento e atraso obtidos pelo “TRANSCALOR”, d = 20cm

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	86,9°	126,6°
μ_n	0,488	0,247

A equação em função do tempo θ para a densidade de fluxo de calor (EQUAÇÃO 3.63) (superfície horizontal), para o dia típico de Campinas, absortância 0,2 (branco) assume a forma:

Para d = 5cm:

$$q_i = 4,29[(28,4 - 26) + 0,95 \cdot 10,1 \cos(15\theta - 230,2) + 0,835 \cdot 3,3 \cos(30\theta - 43,4)]$$

Para d = 20cm:

$$q_i = 3,13[(28,4 - 26) + 0,488.10,1 \cos(15\theta - 296,9) + 0,247.3,3 \cos(30\theta - 132,6)]$$

A equação em função do tempo θ para a densidade de fluxo de calor (EQUAÇÃO 3.63) (superfície horizontal), para o dia típico de Campinas, absortância 0,7 (cinza) assume a forma:

Para $d = 5\text{cm}$:

$$q_i = 4,29[(36,7 - 26) + 0,95.22,2 \cos(15\theta - 213,2) + 0,835.8,6 \cos(30\theta - 39,4)]$$

Para $d = 20\text{cm}$:

$$q_i = 3,13[(36,7 - 26) + 0,488.22,2 \cos(15\theta - 279,9) + 0,247.8,6 \cos(30\theta - 128,6)]$$

Portanto, já com as equações para as quatro situações diferentes determinadas, representou-se graficamente a variação no tempo da densidade de fluxo de calor para cada caso (FIGURA 5.6):

Os valores máximos de densidade de fluxo de calor obtidos para a placa na cor branca foram:

$$\begin{aligned} q_{\text{máx}} &= 59,9 \text{ W/m}^2 \text{ para } d = 5\text{cm}, \\ q_{\text{máx}} &= 23,0 \text{ W/m}^2 \text{ para } d = 20\text{cm}. \end{aligned}$$

Os valores máximos de densidade de fluxo de calor obtidos para a placa na cor cinza foram:

$$\begin{aligned} q_{\text{máx}} &= 165,0 \text{ W/m}^2 \text{ para } d = 5\text{cm}, \\ q_{\text{máx}} &= 70,9 \text{ W/m}^2 \text{ para } d = 20\text{cm}. \end{aligned}$$

Pela FIGURA 5.6 nota-se a influência da cor sobre a densidade de fluxo de calor sendo atenuada, conforme aumentou-se a espessura da placa de concreto. Essa constatação analítica confirmou resultados experimentais obtidos em Haifa por GIVONI, (1981).

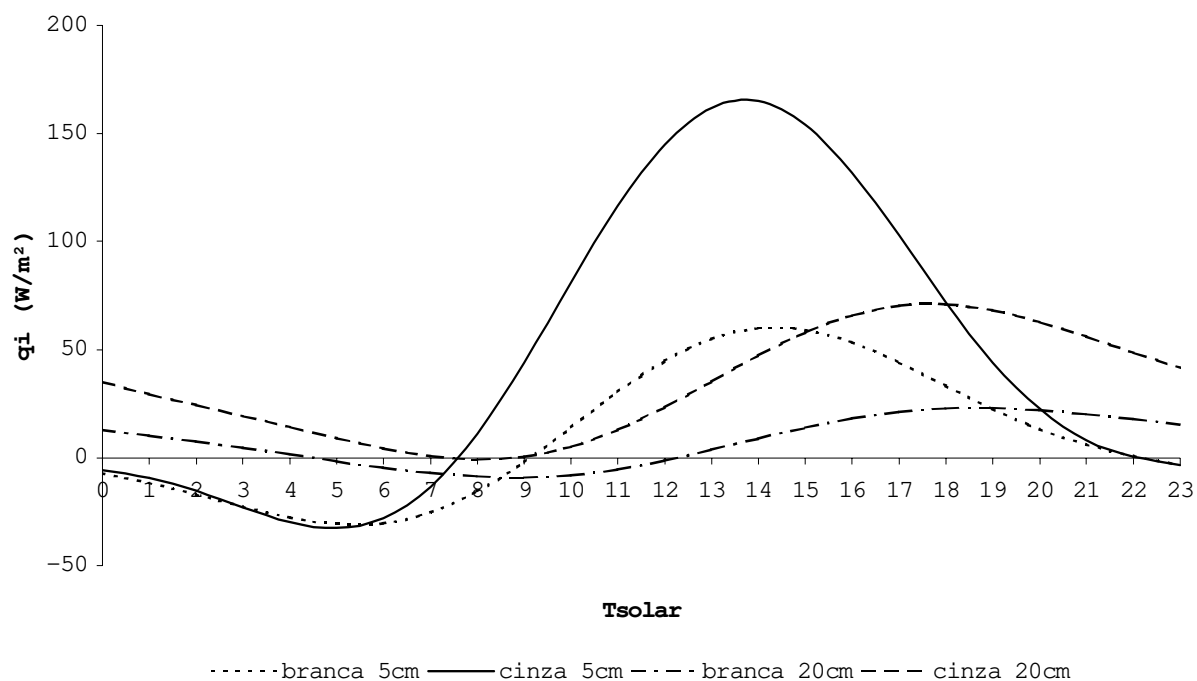


FIGURA 5.6: Relação entre cores e espessura de uma placa de concreto do EXEMPLO 4

A placa de concreto de 5cm, quando alterada de cinza para branco, apresentou uma redução na amplitude da onda de calor de 105,1 W/m² (de 165,0 W/m² para 59,9 W/m²). Porém, aumentando-se a espessura da placa para 20 cm, quando alterada de cinza para branco, a mesma registrou uma redução de 47,9 W/m² (de 70,9 W/m² para 23,0 W/m²). Nota-se, porém, que a queda percentual foi igual a 64% e 68%, respectivamente. Pôde-se inferir, em números absolutos, que a influência cromática na transmissão de calor em fechamentos opacos de edificações adquire maior importância em estruturas com menor espessura. Provavelmente o aumento da espessura passa a suplantear o efeito da cor na densidade de fluxo de calor, neste caso.

5.6 Transmissão de calor em fechamentos opacos compostos por isolantes térmicos

Considera-se agora o estudo analítico de um fechamento composto, constituído por duas placas (no caso isolante térmico-concreto ou concreto-isolante térmico), chamados a partir daqui de IC ou CI, respectivamente. O fechamento é caracterizado pelos planos $x_1 < x < x_2$ e $x_2 < x < x_3$, respectivamente. Como já visto na seção 3.4.3, o plano $x=x_1$ está exposto às variações cíclicas da temperatura do ar externo e da radiação solar. Já o plano $x=x_3$ está em contato com o ar do cômodo, que é mantido a temperatura constante t_i . Considera-se a seguir alguns exemplos numéricos obtidos com a planilha eletrônica “TRANSCALOR”, baseadas nas equações de MACKEY e WRIGHT, (1946), constantes da seção 3.4.3.1 da presente pesquisa.

EXEMPLO 5: *Demonstrar graficamente a influência do posicionamento do isolamento térmico na parte interna de um fechamento horizontal (configuração CI) e na sua parte externa (configuração IC) na densidade de fluxo de calor e na temperatura da superfície externa do fechamento para os dois casos. O fechamento é constituído por uma placa de concreto de 10 cm de espessura e por uma placa de poliuretano extrudado de 2 cm, atuando como isolante térmico. A análise deve ser conduzida para o dia típico de verão de Campinas, sendo que a temperatura interna do ambiente é mantida constante em 26 °C. A face externa do fechamento, seja na configuração CI ou IC, possui uma absorvância à radiação solar de 0,7 e emissividade 0,9.*

Configuração CI (isolante térmico por dentro):

Para o fechamento em questão, temos:

$h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, exposição normal, $v = 3,3 \text{ m/s}$ (Apêndice IV)

$h_i = 6,30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Apêndice IV)

para o concreto, têm-se (ABNT, 1998):

$\rho_c = 2.200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_c = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c_c = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ou $0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$.

para a placa de poliuretano extrudado, têm-se (ABNT, 1998):

$\rho_i = 35 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_i = 0,03 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c_i = 1,67 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ou $0,46 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$.

Cálculo da difusividade térmica das placas (EQUAÇÃO 3.58):

Placa de concreto (externa): $\alpha_{de} = 0,0028 \text{ m}^2/\text{h}$

Placa de poliuretano extrudado: $\alpha_{di} = 0,0019 \text{ m}^2/\text{h}$

Cálculo da transmitância térmica (EQUAÇÃO 3.55):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{21,9} + \frac{0,1}{1,75} + \frac{0,02}{0,03} + \frac{1}{6,3}} = 1,08 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Pela EQUAÇÃO 3.45:

$$\omega_1 = 2\pi/24 = 15^\circ/\text{h} = 0,2618 \text{ rad/h}$$

$$\omega_2 = 2 \times \omega_1 = 30^\circ/\text{h} = 0,5236 \text{ rad/h}$$

Os valores a seguir (TABELA 5.21), foram obtidos pela planilha eletrônica “TRANSCALOR” (fechamentos compostos 2 camadas) para agilização dos cálculos necessários (TABELA 5.21 pelas EQUAÇÕES 3.71 a 3.95, 3.97 e 3.98 e TABELA 5.22 pelas EQUAÇÕES 3.96 e 3.99).

TABELA 5.21: Valores obtidos pela planilha eletrônica “TRANSCALOR”

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
P ₁	0,2877	0,2877
P ₂	0,1676	0,2371
P ₃	0,0399	0,0564
T ₂	0,6788	0,9600
T ₃	0,5424	0,7671
C ₁	1,0280	1,0557
C ₂	0,9718	0,9433
C ₃	0,1692	0,2415

Cont. TABELA 5.21

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
C_4	0,1661	0,2326
D_1	1,4243	1,7716
D_2	0,5050	-0,0541
D_3	0,7781	1,2265
D_4	0,5698	0,6391
g_c	0,1923	0,1923
g_d	0,4345	0,4088
r_c	10,4024	10,4098
r_d	5,3117	7,7679
s_c	-0,2965	-0,5931
s_d	-4,1469	-8,6688
A_1	0,1339	0,2702
A_2	10,4033	10,4050
B_1	1,4514	3,6511
B_2	-3,4702	-6,0379
B_3	4,9156	5,8464
B_4	-1,0246	-3,7706
B_5	177,5894	321,2037
B_6	88,5036	342,58

TABELA 5.22: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR”

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	52,4°	79,4°
μ_n	0,123	0,078

TABELA 5.23: Valores obtidos para a equação da temperatura sol-ar para o dia típico de verão, através de análise harmônica (2 harmônicos) ($\alpha = 0,7$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
$t_{sa,m}$	36,7 °C	–
$t_{sa,n}$	22,2	8,6
ψ_n	193°	2°

Portanto, a equação obtida para a variação temporal e periódica para a densidade de fluxo de calor através do fechamento (configuração CI) foi (EQUAÇÃO 3.69):

$$q_i = 11,6 + 6,3[2,7 \cos(15\theta - 245,4) + 0,7 \cos(30\theta - 81,4)]$$

Já a equação obtida para a variação temporal e periódica para a temperatura na superfície interna do fechamento (configuração CI) foi (EQUAÇÃO 3.70):

$$t_{si} = 27,8 + [2,7 \cos(15\theta - 245,4) + 0,7 \cos(30\theta - 81,4)]$$

Configuração IC (isolante térmico por fora):

Repetiu-se o procedimento anterior. Os coeficientes para a temperatura sol-ar, dia típico de verão de Campinas, já foram calculados e estão na TABELA 5.23. Os demais coeficientes, obtidos pelo “TRANSCALOR” (resumidos), para a configuração IC, são apresentados na TABELA 5.24, e foram calculados pelas EQUAÇÕES 3.96 e 3.99.

TABELA 5.24: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR”

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	75,1°	95,4°
μ_n	0,069	0,036

Então, a equação obtida para a variação temporal e periódica para a densidade de fluxo de calor através do fechamento (configuração IC) foi (EQUAÇÃO 3.69):

$$q_i = 11,6 + 6,3[1,5\cos(15\theta - 268,1) + 0,3\cos(30\theta - 97,4)]$$

Por sua vez, a equação obtida para a variação temporal e periódica para a temperatura na superfície interna do fechamento (configuração IC) foi (EQUAÇÃO 3.70):

$$t_{si} = 27,8 + [1,5\cos(15\theta - 268,1) + 0,3\cos(30\theta - 97,4)]$$

Colocando-se as equações para densidade de fluxo de calor e para temperatura superficial interna das duas configurações (CI e IC) em forma gráfica, obteve-se

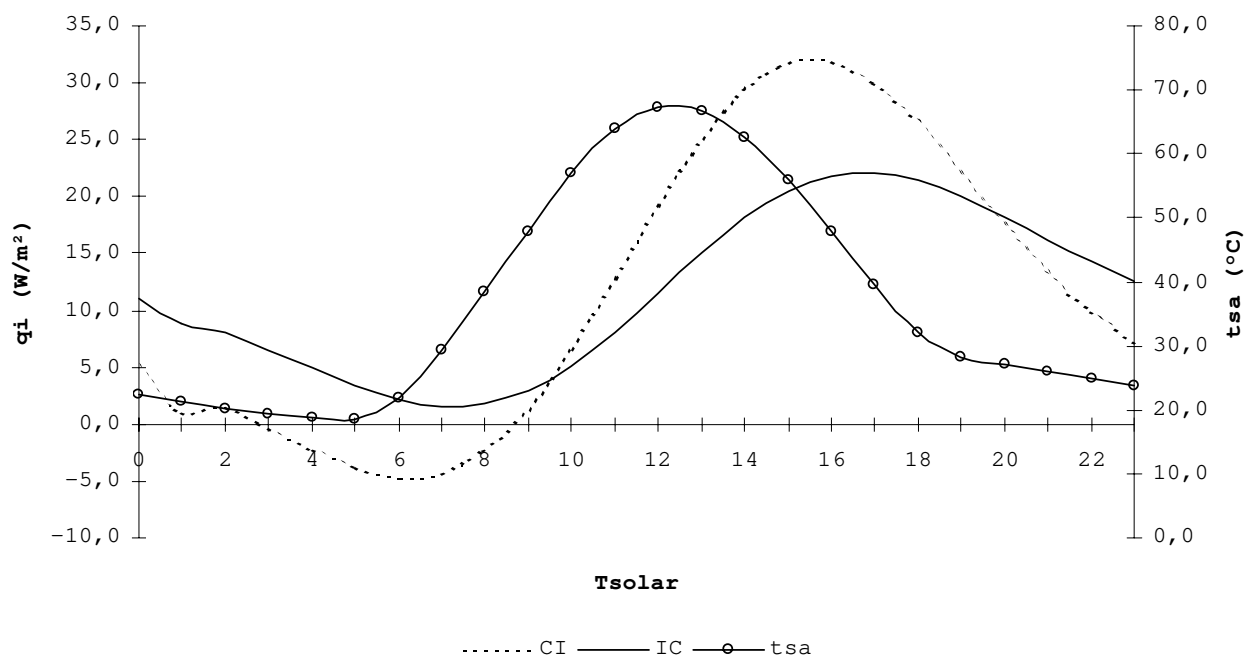


FIGURA 5.7: Densidade de fluxo de calor para as configurações CI e IC do EXEMPLO 5

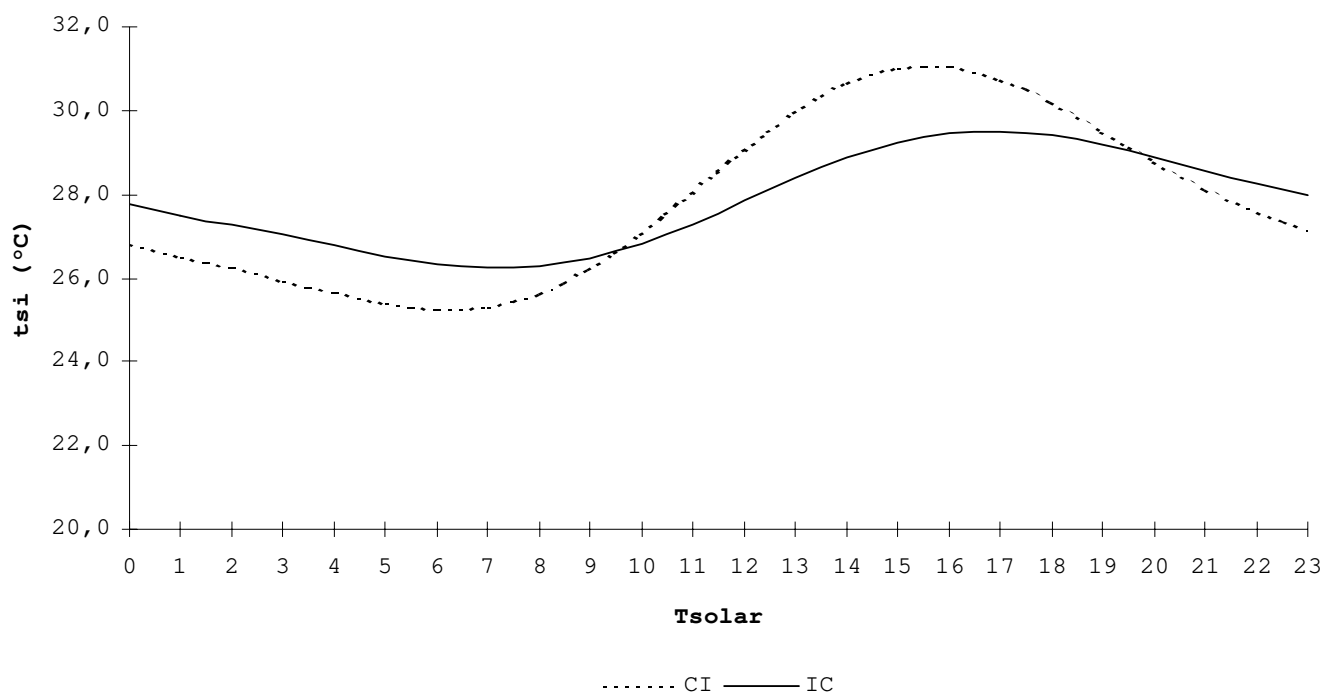


FIGURA 5.8: Temperatura na superfície interna para as configurações CI e IC do EXEMPLO 5

Nota-se pela FIGURA 5.7 o desempenho superior quando o isolante térmico foi posicionado na parte externa do fechamento (configuração IC). A curva da temperatura solar possibilitou a determinação do atraso da onda de calor quando atravessando o fechamento em cada uma das configurações (CI e IC). No caso da configuração CI, o atraso térmico foi de 3,5 h, enquanto que na configuração IC de 5 h. Já, no que tange ao amortecimento da onda térmica, a configuração CI apresentou uma densidade máxima de fluxo de calor de 31,9 W/m², já a configuração IC, 22,1 W/m². Infere-se então, que o posicionamento do isolante térmico na parte externa do fechamento possibilitou uma redução de carga térmica de aproximadamente 31% em relação ao isolante colocado na parte interna do fechamento.

As curvas da temperatura na superfície interna do fechamento, na FIGURA 5.8, mostraram, para a configuração CI, um valor máximo de 31,1 °C, e um mínimo de 25,3 °C. Já a configuração IC apresentou um valor máximo de 29,5 °C e um mínimo de 26,2 °C. Nota-se também que a amplitude

entre os valores máximos e mínimos para a configuração CI é de 5,8 °C e para a IC foi de 3,3 °C. Esta informação permitiu inferir que a menor amplitude da configuração IC a qualificou como sendo um fechamento térmica e energeticamente mais eficiente que CI, uma vez que o dimensionamento de um eventual equipamento de condicionamento térmico artificial seria menos potente que o equipamento para a configuração CI.

Como visto, o isolante térmico, posicionado na face externa do fechamento IC, possibilitou um melhor comportamento térmico e maior eficiência energética que o fechamento CI. Cabe agora investigar a influência da espessura (l) do isolante térmico com relação à espessura total do fechamento (L), para a configuração IC. Foram investigadas as relações $l = 0,25L$, $l = 0,5L$ e $l = 0,75L$. Para melhor compreensão, optou-se por demonstrar o exposto em exemplo numérico.

EXEMPLO 6: *Demonstrar graficamente a influência da espessura (l) do isolante térmico com relação à espessura total (L) de um fechamento IC. Analisar essa relação para espessuras totais $L = 5\text{cm}$, $L = 10\text{cm}$ e $L = 15\text{cm}$. Analisar também a possibilidade de se obter uma inferência relacionando a espessura do isolamento térmico utilizada e a eficiência energética do fechamento em estudo. Utilizar os dados do EXEMPLO 5.*

Para o fechamento em questão, tem-se:

$h_e = 21,9 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, exposição normal, $v = 3,3 \text{ m/s}$ (Apêndice IV)

$h_i = 6,30 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (Apêndice IV)

para o concreto, têm-se (ABNT, 1998):

$\rho_c = 2.200 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_c = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c_c = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ou $0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$.

para a placa de poliuretano extrudado, têm-se (ABNT, 1998):

$\rho_i = 35 \text{ kg/m}^3$, $\lambda_i = 0,03 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$, $c_i = 1,67 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ ou $0,46 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$.

Os coeficientes para a temperatura sol-ar para o dia típico de verão de Campinas já foram calculados no EXEMPLO 5, e seus valores podem ser vistos na TABELA 5.23. Os demais coeficientes, para composição da equação de densidade de fluxo de calor para as espessuras totais de 5 cm, 10 cm e 15 cm, foram obtidos por intermédio do “TRANSCALOR” e são apresentados na TABELA 5.25.

TABELA 5.25: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” para as três espessuras totais ($L = 5, 10$ e 15 cm), e para espessuras variáveis de isolante térmico ($l = 0,25L$; $l = 0,5L$ e $l = 0,75L$)

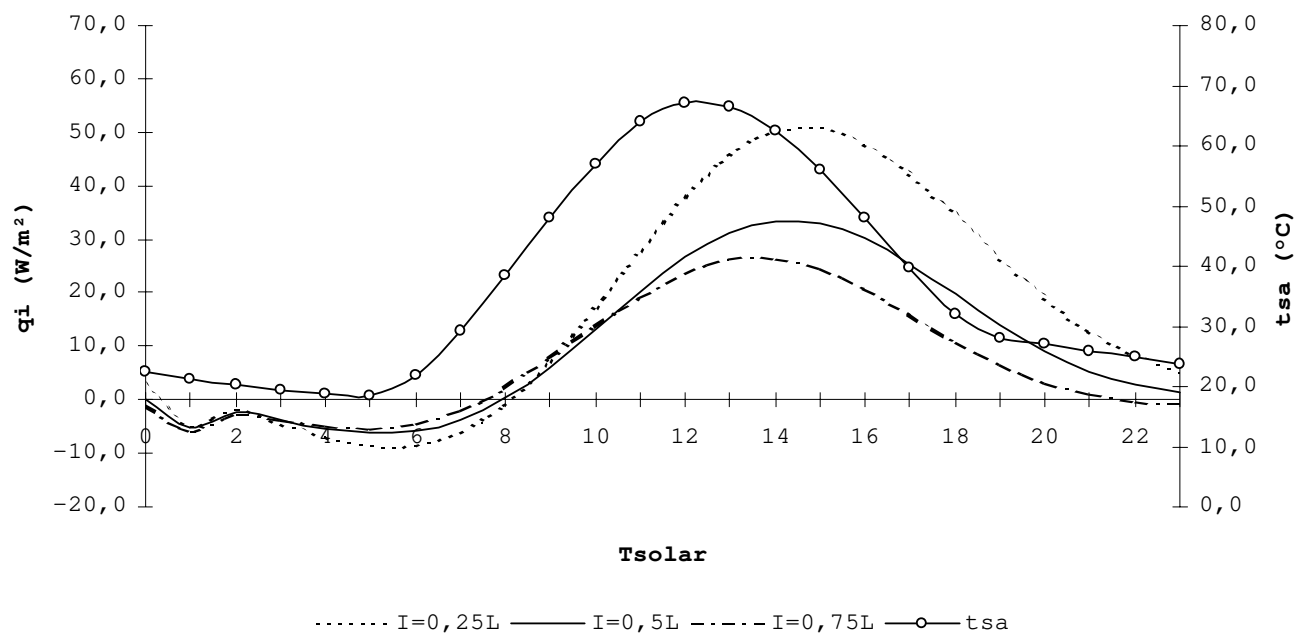
PARÂMETRO	1° HARMÔNICO			2° HARMÔNICO		
$L = 5\text{cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
φ_n	$37,8^\circ$	$30,7^\circ$	$18,7^\circ$	$58,7^\circ$	$51,1^\circ$	$35,0^\circ$
μ_n	0,199	0,132	0,104	0,139	0,101	0,093
U ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	1,56	0,95	0,68			
$L = 10 \text{ cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
φ_n	$65,8^\circ$	$56,9^\circ$	$40,8^\circ$	$85,3^\circ$	$79,5^\circ$	$68,4^\circ$
μ_n	0,073	0,052	0,049	0,040	0,031	0,036
U ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	0,93	0,53	0,37			
$L = 15 \text{ cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
φ_n	$83,2^\circ$	$75,7^\circ$	$63,0^\circ$	$105,1^\circ$	$100,9^\circ$	$-80,8^\circ$
μ_n	0,034	0,026	0,028	0,018	0,014	0,017
U ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$)	0,66	0,36	0,25			

As TABELAS 5.23 e 5.25 mostram os coeficientes para obtenção das 9 equações (3 para cada espessura) de densidade de fluxo de calor (EQUAÇÃO 3.69). A forma gráfica destas equações é mostrada nas FIGURAS 5.9, 5.10 e 5.11. Os valores máximos ($q_{\text{máx}}$) e mínimos ($q_{\text{mín}}$) da densidade de fluxo de calor obtidos são mostrados na TABELA 5.26.

TABELA 5.26: Valores máximos ($q_{\text{máx}}$) e mínimos ($q_{\text{mín}}$) da densidade de fluxo de calor para as três espessuras totais ($L = 5, 10$ e 15cm), e para espessuras variáveis de isolante térmico ($l = 0,25L$; $l = 0,5L$ e $l = 0,75L$)

$L = 5 \text{ cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
$q_{\text{máx}}$ (W/m^2)	50,9	33,5	26,5
$q_{\text{mín}}$ (W/m^2)	-8,7	-6,3	-5,8

Cont. TABELA 5.26			
$L = 10 \text{ cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
$q_{\text{máx}} \text{ (W/m}^2\text{)}$	21,4	14,2	12,5
$q_{\text{mín}} \text{ (W/m}^2\text{)}$	-0,5	-1,5	-2,3
$L = 15 \text{ cm}$	$l = 0,25L$	$l = 0,5L$	$l = 0,75L$
$q_{\text{máx}} \text{ (W/m}^2\text{)}$	12,2	7,9	6,4
$q_{\text{mín}} \text{ (W/m}^2\text{)}$	2,0	0,2	-2,0



**FIGURA 5.9: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 5 \text{ cm}$.
Solução gráfica para o EXEMPLO 6**

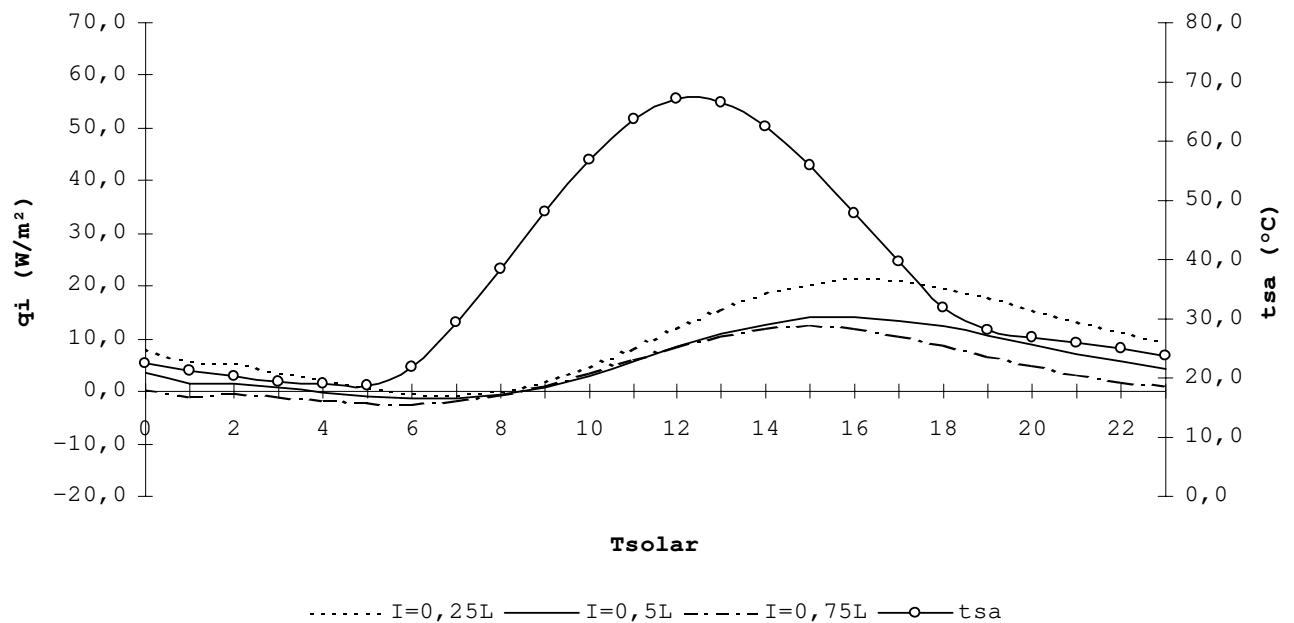


FIGURA 5.10: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 10$ cm.
Solução gráfica para o EXEMPLO 6

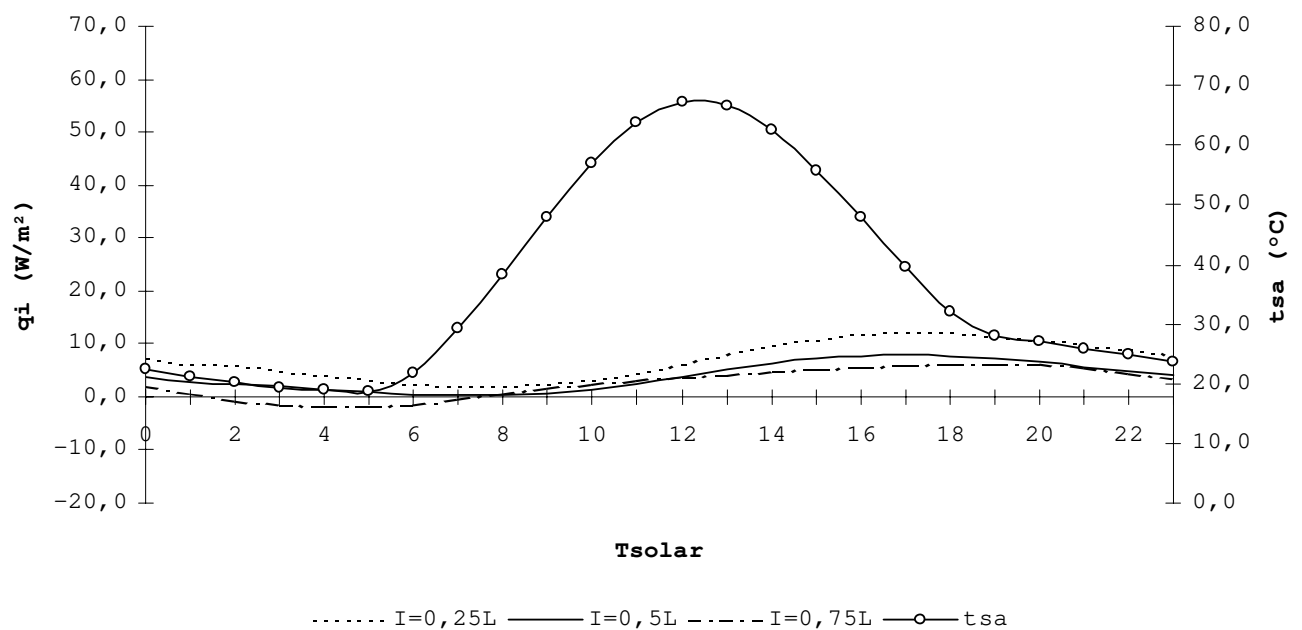
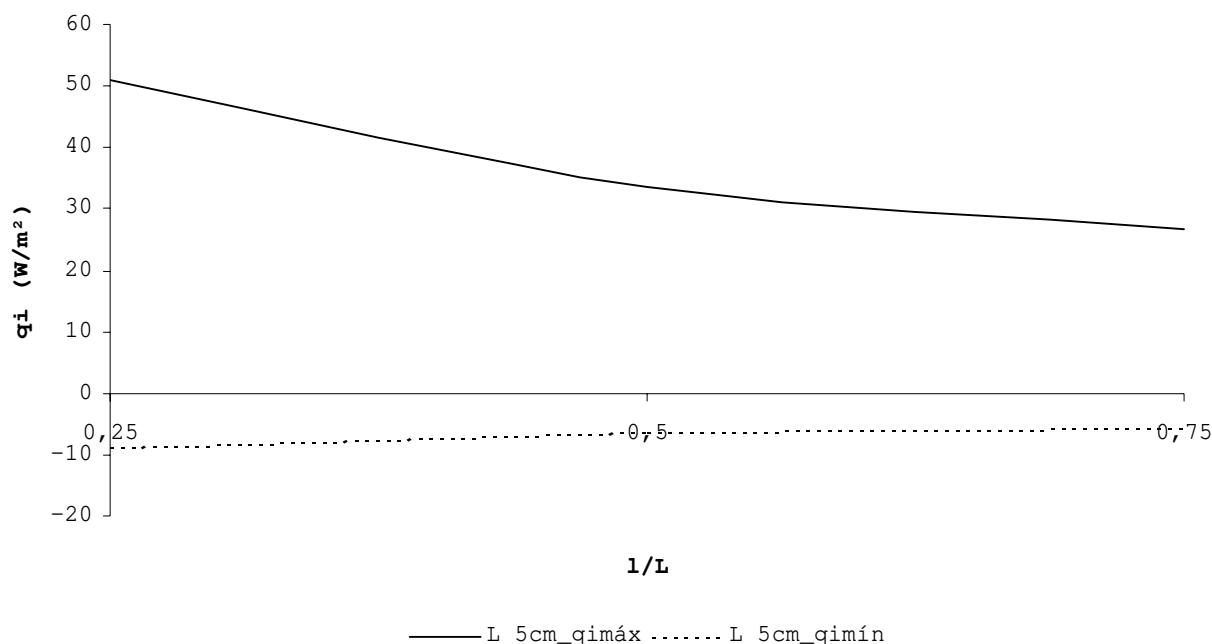


FIGURA 5.11: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 15$ cm.
Solução gráfica para o EXEMPLO 6

Percebe-se pela TABELA 5.26 e pelas FIGURAS 5.9, 5.10 e 5.11 que houve uma atenuação maior da onda térmica conforme alterou-se a espessura do isolante de $0,25L$ para $0,5L$ (da ordem de 34%), para as três espessuras totais. A alteração da espessura de isolante de $0,5L$ para $0,75L$ não trouxe tanta atenuação, variando, porém, conforme a espessura total: 21% para $L = 5\text{ cm}$, 12% para $L = 10\text{ cm}$ e 19% para $L = 15\text{ cm}$. Comparou-se graficamente também a razão de atenuação da amplitude de $q_{\text{máx}}$ e $q_{\text{mín}}$ para as espessura total $L = 5\text{ cm}$, dada na FIGURA 5.11.



**FIGURA 5.12: Densidade de fluxo de calor para espessura total $L = 5\text{ cm}$.
Solução gráfica para o EXEMPLO 6**

Do ponto de vista da eficiência energética do fechamento, pôde-se afirmar que a atenuação dos picos máximos e mínimos da densidade de fluxo de calor pode levar à concepção de instalações de condicionamento térmico artificial mais brandas, tendo em vista a redução de carga térmica proporcionada. A FIGURA 5.12 mostra que, para um fechamento IC de espessura total 5 cm, a

espessura do isolante tendo sido alterada de 0,25L para 0,5L proporcionou uma atenuação sensível da amplitude entre $q_{\text{máx}}$ e $q_{\text{mín}}$. A partir de aproximadamente 0,6L a amplitude continuou caindo, porém não mais na mesma proporção. Esta constatação permitiu inferir que a espessura ótima do isolante para o fechamento IC em estudo, do ponto de vista de sua eficiência energética, para o dia típico de verão de Campinas, encontra-se na faixa de 0,5L a 0,6L. Maiores espessuras de isolante térmico não acrescentam maiores benefícios significativos.

5.7 Transmissão de calor em fechamentos opacos compostos por câmaras de ar

Estuda-se nesta seção um fechamento opaco composto, constituído por duas placas de concreto, intermediadas por uma câmara de ar, chamado a partir daqui de CAC. Utilizou-se o método do fechamento homogêneo equivalente constante da seção 3.4.3.3. Para o cálculo da resistência térmica equivalente da câmara de ar, pode-se utilizar os valores constantes na ABNT, 1998. Lembra-se que o produto ($\lambda \rho c$) da câmara de ar deve ser igualado a zero, conforme recomendação do método aludido. Para melhor compreensão do método, optou-se por apresentá-lo através de exemplos numéricos.

EXEMPLO 7: *Comparar graficamente a curva periódica da densidade de fluxo de calor de um fechamento opaco constituído de uma placa de concreto de espessura 15 cm (C) e de um fechamento opaco constituído de concreto-câmara de ar-concreto (CAC). As placas de concreto têm 7,5 cm cada uma, e a câmara de ar não ventilada, 5 cm de espessura. Considerar o dia típico de verão de Campinas, superfície horizontal, e uma absorptância à radiação solar de 0,9. A temperatura do ambiente interno é mantida constante em 26 °C.*

Para o dia típico de verão de Campinas, os coeficientes da temperatura sol-ar obtidos pelo “TRANSCALOR” são apresentados na TABELA 5.27 ($\alpha = 0,9$). Não foram expostos todos os passos de cálculo por se tratar de método já apresentado na seção 5.3. Os valores horários da temperatura sol-ar para o dia típico de verão de Campinas, podem ser consultados na TABELA 5.14.

TABELA 5.27: Valores obtidos para a equação da temperatura sol-ar para o dia típico de verão, através de análise harmônica (2 harmônicos) ($\alpha = 0,9$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
$t_{sa,m}$	40,0 °C	–
$t_{sa,n}$	27,2	10,8
ψ_n	191°	2°

Para a placa de concreto (C), espessura 15 cm, obteve-se:

Para a placa de concreto homogênea, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. Os valores para o amortecimento e o atraso da onda de calor, obtidos pelo “TRANSCALOR”, foram obtidos pelas EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente. Seus valores são apresentados na TABELA 5.28.

TABELA 5.28: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” (C)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	68,9°	102,3°
μ_n	0,611	0,347
U (W/m ² °C)	3,45	

A equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para a placa de concreto homogênea C, espessura 15 cm, foi:

$$q_i = 3,45[14 + 16,6 \cos(15\theta - 260) + 3,7 \cos(30\theta - 104)]$$

Para a placa concreto-câmara de ar-concreto (CAC), obteve-se:

Cálculo do fechamento homogêneo equivalente, segundo procedimento da seção 3.4.3.3:

Placa de concreto externa:

para o concreto na face externa, adotou-se:

$$\rho_e = 2.400 \text{ kg/m}^3, \lambda_e = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c_e = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ ou } 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}.$$

$$(d/\lambda)_e = 0,043 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$(\lambda\rho c)_e = 1176 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

para a câmara de ar não ventilada:

$$(d/\lambda)_m = 0,18 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W (ABNT, 1998)}$$

$(\lambda\rho c)_m = 0$ (conforme convenção do método do fechamento equivalente homogêneo para as câmaras de ar).

para o concreto na face interna, adotou-se:

$$\rho_i = 2.400 \text{ kg/m}^3, \lambda_i = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c_i = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ ou } 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}.$$

$$(d/\lambda)_i = 0,043 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$(\lambda\rho c)_i = 1176 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

Cálculo da resistência térmica equivalente (EQUAÇÃO 3.127)

$$(d/\lambda)_E = 0,043 + 0,18 + 0,043 = 0,266 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Cálculo do produto $(\lambda\rho c)$ equivalente (EQUAÇÕES 3.128 a 3.130):

$$A = \frac{1,1(0,043)(1176) + 0}{0,266} \therefore A = 209,1 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

$$B = \frac{1176[(0,043) - 0,1(0,043) - 0,1(0,18)]}{0,266} \therefore B = 91,5 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

$$(\lambda\rho c)_E = A + B = 300,6 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

Um material que apresenta um produto ($\lambda \rho c$) similar a 300,6 é o tijolo de barro. Necessita-se agora determinar a espessura e a massa específica aparente deste fechamento homogêneo equivalente composto por um tijolo de barro que equivale ao fechamento composto CAC.

Para um tijolo de barro, tem-se (ABNT, 1998):

$$\lambda = 0,9 \text{ W/m } ^\circ\text{C e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$$

Portanto, a massa específica aparente será:

$$\rho = \frac{300,6}{0,9 \cdot 0,26} \therefore \rho = 1284,6 \text{ kg/m}^3$$

Como a resistência equivalente obtida para o fechamento composto foi $0,266 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, obteve-se a espessura do fechamento homogêneo composto de tijolo de barro:

$$(d/\lambda)_E = 0,266, \text{ então}$$

$$d = 0,9 \cdot 0,266 = 0,24 \text{ m}$$

Portanto, o fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, será um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1284,6 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,9 \text{ W/m } ^\circ\text{C e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$$

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. A TABELA 5.29 apresenta os valores obtidos para o amortecimento e atraso da onda de calor, obtidos pelo “TRANSCALOR” Foram utilizadas as EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente.

TABELA 5.29: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” (CAC)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	89,7°	137,1°
μ_n	0,539	0,272
U (W/m ² °C)	2,12	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura solar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.29, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC, representado pelo fechamento homogêneo equivalente:

$$q_i = 2,12[14 + 14,7 \cos(15\theta - 281) + 2,9 \cos(30\theta - 139)]$$

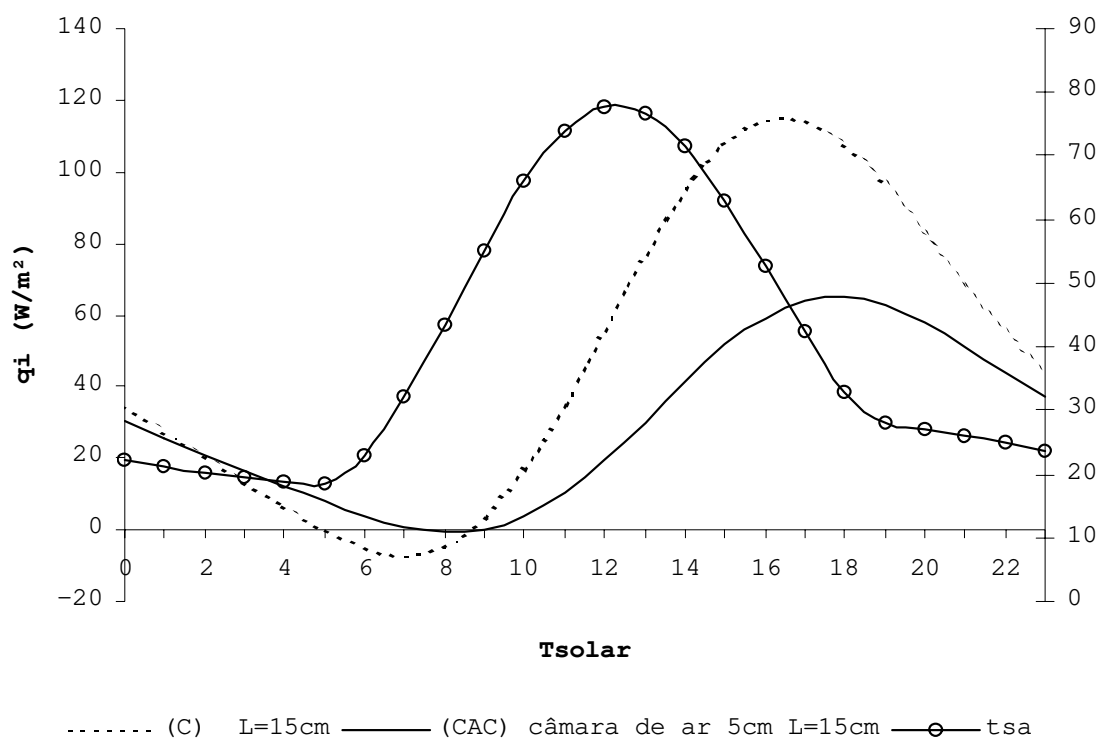


FIGURA 5.13: Densidade de fluxo de calor para o fechamento (C) e para o (CAC) com câmara de ar não ventilada. Solução gráfica para o EXEMPLO 7

Conforme a FIGURA 5.13, o fechamento CAC apresentou um valor máximo de densidade de fluxo de calor ($q_{\text{máx}}$) de 65,1 W/m², enquanto que para a placa de concreto homogênea, este valor atingiu 114,7 W/m². Portanto, a simples adição de uma câmara de ar não ventilada entre duas placas de concreto de 7,5 cm cada uma (fechamento CAC) proporcionou uma atenuação de 43% no valor máximo da densidade de fluxo de calor, e conseqüentemente na carga térmica de pico. No que se refere ao atraso da onda de calor, obteve-se para o fechamento CAC 6h, e para a placa homogênea de concreto (C), 4,6h. Nota-se, portanto, que o fechamento CAC proporciona um atraso adicional de 1,4h em relação ao fechamento C. Pode-se inferir que a incorporação de uma câmara de ar intermediária entre duas placas de concreto (CAC) aumentou a eficiência energética com relação a um fechamento homogêneo de concreto de mesma espessura.

EXEMPLO 8: *Utilizando o método do fechamento homogêneo equivalente, comprovar que a atenuação dos valores máximos e mínimos da densidade de fluxo de calor para um fechamento CAC aumenta, conforme se diminui a espessura da placa de concreto em contato com o ar exterior, mantendo-se a espessura total de concreto ($L = a + b$) (SODHA et alii, 1980). As placas de concreto somadas têm sempre 10 cm, e a câmara de ar não ventilada, 5 cm de espessura. Considerar o dia típico de verão de Campinas, superfície horizontal, e uma absorvância à radiação solar de 0,9. A temperatura do ambiente interno é mantida constante em 26 °C.*

$$L = a + b = 10\text{cm}$$

Deseja-se estabelecer a relação entre a espessura da placa externa de concreto (a), a espessura total das placas de concreto ($L = a + b$) e a influência sobre as densidades máximas de fluxo de calor. Portanto, investigou-se as seguintes relações: $a/L \rightarrow 0$; $a/L = 0,25$; $a/L = 0,5$; $a/L = 0,75$; $a/L \rightarrow 1$ (indicou-se nos casos extremos $a/L \rightarrow 0$ ou $a/L \rightarrow 1$, pois as placas mais delgadas têm que possuir uma espessura mínima, compatível com as necessidades estruturais do fechamento em questão).

CASO $a/L = 0$: ($a = 0$; $b = 0,1 \text{ m}$)

Cálculo do fechamento homogêneo equivalente, segundo procedimento da seção 3.4.3.3:

Placa de concreto externa:

para o concreto na face externa, adotou-se:

$$\rho_e = 2.400 \text{ kg/m}^3, \lambda_e = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c_e = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ ou } 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}.$$

$$(a/\lambda)_e = 0 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$(\lambda\rho c)_e = 1176 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

para a câmara de ar não ventilada:

$$(d/\lambda)_m = 0,18 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W (ABNT, 1998)}$$

$(\lambda\rho c)_m = 0$ (conforme convenção do método do fechamento equivalente homogêneo para as câmaras de ar).

para o concreto na face interna, adotou-se:

$$\rho_i = 2.400 \text{ kg/m}^3, \lambda_i = 1,75 \text{ W/m } ^\circ\text{C}, c_i = 1 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C} \text{ ou } 0,28 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}.$$

$$(b/\lambda)_i = 0,057 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$(\lambda\rho c)_i = 1176 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

Cálculo do produto $(\lambda\rho c)$ equivalente (EQUAÇÕES 3.128 a 3.130):

$$A = \frac{1,1(0,057)(1176)+0}{0,237} \therefore A = 311,1 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

$$B = \frac{1176[(0) - 0,1(0,057) - 0,1(0,18)]}{0,237} \therefore B < 0 \therefore B = 0 \text{ (Notar que o termo entre colchetes é}$$

negativo, e, conforme convenção do método do fechamento homogêneo equivalente, o termo inteiro entre colchetes deve ser igualado a zero.

$$(\lambda\rho c)_E = A + B = 311,1 \text{ (W)}^2 \text{ h/ (m}^2 \text{ } ^\circ\text{C)}^2$$

Um material que apresenta um produto ($\lambda \rho c$) similar a 311,1 é o tijolo de barro. Necessita-se agora determinar a espessura e a massa específica aparente deste fechamento homogêneo equivalente composto por um tijolo de barro que equivale ao fechamento composto CAC.

Para um tijolo de barro, tem-se (ABNT, 1998):

$$\lambda = 0,9 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \text{ e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}$$

Portanto, a massa específica aparente será:

$$\rho = \frac{311,1}{0,9 \cdot 0,26} \therefore \rho = 1329,6 \text{ kg/m}^3$$

Como a resistência equivalente obtida para o fechamento composto foi $0,237 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$, obteve-se a espessura do fechamento homogêneo composto de tijolo de barro:

$$(d/\lambda)_E = 0,237, \text{ então}$$

$$d = 0,9 \cdot 0,237 = 0,21 \text{ m}$$

Portanto, o fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, será um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1329,6 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,9 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \text{ e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}, d = 0,21 \text{ m}.$$

Para o dia típico de verão de Campinas, os coeficientes da temperatura sol-ar obtidos pelo “TRANSCALOR” já foram apresentados na TABELA 5.27 ($\alpha = 0,9$).

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da

densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. Os valores para o amortecimento e atraso da onda de calor, obtidos pelas EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente, e calculados pelo “TRANSCALOR” são apresentados na TABELA 5.30.

TABELA 5.30: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L \neq 0$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	79,3°	122,6°
μ_n	0,604	0,328
U ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)	2,28	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura solar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.30, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC ($a/L \rightarrow 0$), representado pelo fechamento homogêneo equivalente de tijolo de barro:

$$q_i = 2,28[14 + 16,4 \cos(15\theta - 270) + 3,5 \cos(30\theta - 125)]$$

Como o processo de cálculo é repetitivo para os demais casos, indicou-se apenas os resultados finais para cada um deles.

CASO $a/L = 0,25$: ($a = 0,025 \text{ m}$; $b = 0,075 \text{ m}$)

O fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, encontrado foi um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1289,6 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,7 \text{ W/m } ^\circ C \text{ e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ C, d = 0,17 \text{ m.}$$

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63.

A TABELA 5.31 apresenta os valores de amortecimento e atraso da onda de calor. Estes valores foram obtidos pelo “TRANSCALOR”, através das EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente.

TABELA 5.31: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,25$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	67,7°	108,0°
μ_n	0,692	0,412
U (W/m ² °C)	2,24	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura sol-ar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.31, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC ($a/L=0,25$), representado pelo fechamento homogêneo equivalente de tijolo de barro:

$$q_i = 2,24[14 + 18,8 \cos(15\theta - 259) + 4,4 \cos(30\theta - 110)]$$

CASO $a/L = 0,50$: ($a = 0,05$ m ; $b = 0,05$ m)

O fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, encontrado foi um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1090,7 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,7 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \text{ e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}, d = 0,17 \text{ m}.$$

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. Os valores para o amortecimento e atraso

da onda de calor, obtidos pelas EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente, e calculados pelo “TRANSCALOR” são apresentados na TABELA 5.32.

TABELA 5.32: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,50$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	59,4°	97,4°
μ_n	0,752	0,480
U (W/m ² °C)	2,24	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura sol-ar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.32, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC ($a/L=0,50$), representado pelo fechamento homogêneo equivalente de tijolo de barro:

$$q_i = 2,24[14 + 20,5 \cos(15\theta - 250) + 5,2 \cos(30\theta - 99)]$$

CASO $a/L = 0,75$: ($a = 0,075$ m ; $b = 0,025$ m)

O fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, encontrado foi um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1063,2 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,7 \text{ W/m } ^\circ\text{C} \text{ e } c = 0,26 \text{ Wh/kg } ^\circ\text{C}, d = 0,17 \text{ m}.$$

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. A TABELA 5.33 apresenta os valores de amortecimento e atraso da onda de calor. Estes valores foram obtidos pelo “TRANSCALOR”, através das EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente.

TABELA 5.33: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L = 0,75$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	58,2°	95,8°
μ_n	0,761	0,490
$U \text{ (W/m}^2 \text{ °C)}$	2,24	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura solar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.33, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC ($a/L=0,75$), representado pelo fechamento homogêneo equivalente de tijolo de barro:

$$q_i = 2,24[14 + 20,7 \cos(15\theta - 249) + 5,3 \cos(30\theta - 98)]$$

CASO $a/L \cdot 1$: ($a = 0,1 \text{ m}$; $b = 0$)

O fechamento homogêneo equivalente ao fechamento composto CAC, encontrado foi um fechamento opaco homogêneo composto de tijolo de barro, com as seguintes propriedades termofísicas:

$$\rho = 1063,2 \text{ kg/m}^3, \lambda = 0,7 \text{ W/m °C e } c = 0,26 \text{ Wh/kg °C, } d = 0,17 \text{ m.}$$

Para o fechamento homogêneo de tijolo de barro, utilizou-se o mesmo método constante do EXEMPLO 1, razão pela qual apresentou-se apenas os coeficientes necessários ao cálculo da densidade de fluxo de calor através da EQUAÇÃO 3.63. Os valores para o amortecimento e atraso da onda de calor, obtidos pelas EQUAÇÕES 3.64 e 3.61, respectivamente, e calculados pelo “TRANSCALOR” são apresentados na TABELA 5.34.

TABELA 5.34: Valores obtidos para o amortecimento e o atraso da onda de calor pelo “TRANSCALOR” ($a/L \cdot 1$)

PARÂMETRO	1° HARMÔNICO	2° HARMÔNICO
φ_n	58,2°	95,8°
μ_n	0,761	0,490
U (W/m ² °C)	2,24	

Utilizando-se os coeficientes da temperatura solar na TABELA 5.27 e os coeficientes da TABELA 5.34, obteve-se a equação para cálculo da densidade de fluxo de calor para o fechamento CAC ($a/L \rightarrow 1$), representado pelo fechamento homogêneo equivalente de tijolo de barro:

$$q_i = 2,24[14 + 20,7 \cos(15\theta - 249) + 5,3 \cos(30\theta - 98)]$$

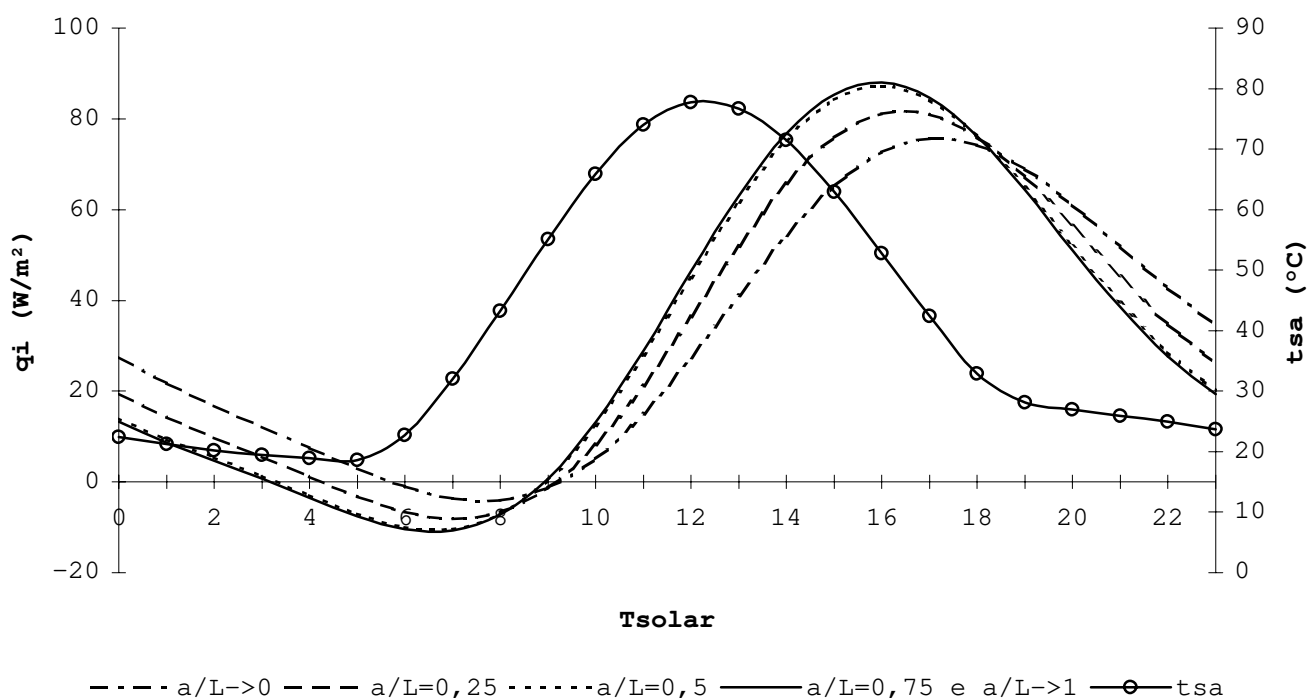


FIGURA 5.14: Variação horária da densidade de fluxo de calor através do fechamento CAC, segundo diferentes relações de a/L . Solução gráfica para o EXEMPLO 8

Conforme FIGURA 5.14, a relação $a/L \rightarrow 0$ apresentou a maior atenuação das amplitudes máximas ($q_{\text{máx}}$) e mínimas ($q_{\text{mín}}$) da curva de densidade de fluxo de calor. A menor atenuação foi obtida com as relações $a/L = 0,75$ e $a/L \rightarrow 1$, que apresentaram o mesmo padrão de comportamento. A relação $a/L \rightarrow 0$ apresentou um valor máximo de $75,6 \text{ W/m}^2$, enquanto que a relação $a/L \rightarrow 1$ apresentou $88,0 \text{ W/m}^2$. Portanto a atenuação de $q_{\text{máx}}$ foi de 14% a favor da relação $a/L \rightarrow 0$. Obteve-se, portanto, através da utilização do método do fechamento homogêneo equivalente, proposto por MACKEY e WRIGHT, (1946) as mesmas conclusões obtidas por SODHA *et alii*, (1980), que utilizou uma expressão analítica para a densidade de fluxo de calor. Inferiu-se, portanto, que a configuração CAC com a espessura mínima da placa de concreto em contato com o ar externo, obedecendo exigências estruturais do fechamento, apresentou o melhor desempenho térmico em termos de eficiência energética (maior atenuação dos picos máximos e mínimos da onda de calor).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa teve como objetivo precípua a descrição analítica da inércia térmica de fechamentos opacos, enquanto fenômeno físico, para a cidade de Campinas, SP. Através de soluções periódicas para a equação da condução de calor proposta por Fourier, obteve-se expressões para a densidade de fluxo de calor e para a temperatura na superfície interna de fechamentos opacos. Estas expressões foram implementadas em micro-computador (AMD K6-2 350Mhz, 64 Mb RAM) na forma de planilhas eletrônicas, possibilitando a análise da influência quantitativa de parâmetros climáticos e termofísicos sobre o fenômeno da inércia térmica.

O modelo de transmissão de calor em regime periódico foi capaz de simular a influência de diversos parâmetros climáticos e termofísicos sobre a inércia térmica. Tendo em vista as suposições assumidas pelo método, concluiu-se que as soluções periódicas para a equação da condução de calor estão próximas de descrever o comportamento natural do fenômeno físico. Como visto, a teoria da transmissão de calor em regime periódico impõe uma dependência temporal consistente de parâmetros meteorológicos, em especial da radiação solar. Do ponto de vista da aplicabilidade das soluções periódicas no desenvolvimento de projetos de engenharia, a descrição do comportamento médio do fenômeno é um aspecto desejável, fato esse que compensa a inabilidade do método em prever o efeito de variações meteorológicas erráticas, e não periódicas, ao longo do dia.

Dias típicos de projeto, selecionados com base em seu índice de transparência (K_d) superiores a 0,75, garantiram o comportamento periódico dos parâmetros meteorológicos incorporados à temperatura sol-ar. A convergência da temperatura sol-ar, representada por séries de Fourier, com a sua forma natural, exigiu dois harmônicos para as superfícies horizontais (coberturas) e oito harmônicos para as verticais (paredes). O processo de análise harmônica, necessário à determinação dos coeficientes, foi implementado em planilhas eletrônicas e possibilitou a análise da

influência sobre a onda de calor de parâmetros como a absorvância à radiação solar (cor) da face externa de fechamentos.

As hipóteses formuladas basearam-se em relações quantitativas com pouco, ou nenhum, conhecimento analítico na literatura, notadamente para o contexto local. A prova e tentativa de refutação das hipóteses conduziu às seguintes conclusões:

- Utilizando-se o modelo de transmissão de calor em regime periódico, comprovou-se que a influência da absorvância adquire maior importância em fechamentos opacos com menor inércia térmica (EXEMPLO 4). Neste sentido, inferiu-se que o efeito da cor da superfície externa do fechamento na onda térmica é inversamente proporcional à sua resistência e à sua capacidade térmica volumétrica.

- Foi possível determinar uma faixa ideal para a espessura de isolante térmico, de forma a atenuar os picos máximos e mínimos de carga térmica (EXEMPLO 6). Neste caso, a espessura ideal do isolante situou-se na faixa de 50% a 60% da espessura total de um fechamento IC (isolante – concreto) de 5 cm de espessura. Maiores espessuras de isolante térmico não trazem benefícios térmicos e energéticos significativos, além de serem antieconômicas.

- A espessura mínima possível, em termos estruturais, da placa de concreto em contato com o ar externo de um fechamento CAC (concreto – câmara de ar – concreto) garantiu o melhor desempenho em termos de eficiência energética (EXEMPLO 8). A utilização do método do fechamento homogêneo equivalente, associado às soluções periódicas, confirmou os resultados de SODHA *et alii*, (1980). Este melhor desempenho térmico e energético do sistema, conforme a espessura da placa em contato com o ar externo tende a zero, enseja uma possível analogia física com sistemas de fachadas ventiladas (MENDES e BARTH, 1999).

Tradicionalmente, os fechamentos opacos têm sido concebidos com base em valores de transmitância térmica total U , sob regime permanente. Este parâmetro, isoladamente, não contempla os aspectos dinâmicos do comportamento da onda térmica, o que torna possível afirmar que, não obstante dois fechamentos apresentarem o mesmo valor de U , em regime permanente, seus desempenhos térmicos e energéticos podem ser diferentes. O parâmetro U representa um índice

isolado para a seleção de fechamentos opacos, porém, não constitui um indicador de desempenho energético completo (CATANI e GOODWIN, (1976), RUDOY e DOUGALL, (1979), HOPKINS *et alii*, (1979). Por este motivo, a seleção de componentes construtivos deve levar em consideração aspectos adicionais, quais sejam: seu efeito sobre a carga térmica de resfriamento, e de aquecimento se for o caso, sua consequência sobre o dimensionamento de eventual equipamento de condicionamento térmico ativo e também sua capacidade de nivelamento dos picos de carga térmica (“peak load leveling”). Surge a necessidade, então, da utilização de modelos dinâmicos, como o aqui apresentado, para a determinação do desempenho energético de sistemas construtivos alternativos, quando estes são comparados através de diversas soluções de projeto e de suas características termofísicas e dimensionais.

As principais inferências obtidas com esta pesquisa foram as seguintes:

- Benefícios energéticos são possíveis de serem obtidos através do uso da inércia térmica em fechamentos opacos externos de edificações locais.
- Estes benefícios se dão primariamente no amortecimento e deslocamento dos picos de carga térmica.
- Estes benefícios dependem da localização da edificação, de características construtivas e de projeto e também de seu regime de operação.
- Os benefícios da inércia térmica são potencializados em locais onde há flutuação diária da temperatura externa em relação à temperatura no interior da edificação, uma vez que neste caso há a inversão no sentido do fluxo térmico. Neste caso é possível associar um valor “efetivo” para a transmitância térmica U que é ainda menor que os valores tradicionais sob regime permanente constantes em literatura. Pesquisas neste sentido vêm sendo conduzidas pelo “Oak Ridge National Laboratory”, nos Estados Unidos.
- A inércia térmica não deve ser entendida como uma propriedade relacionada exclusivamente ao fechamento opaco. O entendimento deste fenômeno, em fechamentos opacos, pressupõe um enfoque sistêmico que inclui o contexto climático onde a edificação está inserida, as

propriedades termofísicas e dimensionais do fechamento, as variáveis associadas ao projeto, como a cor da superfície externa, o período de utilização e regime de operação da edificação, entre outros. A questão da incorporação ou não da inércia térmica aos fechamentos opacos de edificações como técnica passiva de conforto térmico e de eficiência energética ficará aberta à discussão, até que estudos analíticos de recomendações de padronização, contemplando a relevância ou não de seu uso sob as diferentes condições regionais do país, estejam disponíveis. Esta pesquisa procurou trazer esta questão para discussão, e contribuir para que estudos adicionais sejam encorajados.

A título de desenvolvimento futuro desta pesquisa, sugere-se os seguintes tópicos:

- Utilização do método da caixa quente protegida para estudo do fenômeno da inércia térmica. Recomenda-se proceder a análise mantendo-se a temperatura na câmara externa constante (regime permanente) e também variando esta temperatura através de um ciclo pré-determinado (regime dinâmico).

- Uma vez que a inércia térmica depende da localização da edificação, e mesmo da orientação do fechamento, recomenda-se o estudo analítico do fenômeno em outras regiões. Estudos de padronização e recomendações regionais de sistemas construtivos que utilizem a inércia térmica como técnica solar passiva são necessários para o projetista de edificações.

- Estudos relacionando os benefícios econômicos e energéticos obtidos com a adoção da inércia térmica como técnica solar passiva em fechamentos opacos de diversas regiões do país.

- Comparação do efeito da inércia térmica nas técnicas vernaculares de construção e nos sistemas construtivos atuais, buscando inferências à eficiência energética.

- Estudos aprofundados de técnicas solares passivas utilizando-se as soluções periódicas apresentadas neste trabalho. Para o contexto climático local, o estudo de meios de resfriamento passivo adquire maior importância. Exemplos destas técnicas são: resfriamento evaporativo, controle da onda térmica por isolantes térmicos e câmaras de ar, túneis sob o solo, entre outras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 1998.
- AKUTSU, M., SATO, N., PEDROSO, N. G. **Desempenho térmico de edificações habitacionais e escolares.** IPT: São Paulo, 1987
- ALFORD, J. S., RYAN, J. E., URBAN, F. O. Effect of heat storage and variation in outdoor temperature and solar intensity on heat transfer through walls. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 45, p. 369-396, 1939.
- ALUCCI, M. P. **Recomendações para adequação de uma edificação ao clima, no estado de São Paulo.** São Paulo, 1981, 2v. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, USP, 1981.
- ASHRAE **Handbook of fundamentals.** American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers, Inc. New York, 1989.
- CATANI, M. J., GOODWIN, S. E. Heavy building envelopes and dynamic thermal response. **ACI Journal (American Concrete Institute)**, v. 73, n. 2, 1976.
- CHVATAL, K. M. S. **A prática do projeto arquitetônico em Campinas, SP e diretrizes para o projeto de edificações adequadas ao clima.** Campinas, 1998. 173p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 1998.
- DAVENPORT, A. G. The dependence of wind loads on meteorological parameters. **Proceedings...** Symposium; Wind effects on buildings and structures, v. 1, Ottawa, 1967.
- DREYFUS, J. **Le confort dans l'habitat en pays tropical.** Ed. Eyrolles: Paris, 1960.
- DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** 2.ed. New York: John Wiley, 1991.
- GIVONI, B. **Man, Climate and architecture.** 2.ed. Applied Science Publishers: London, 1981.

- GOULART, S. V. G. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Florianópolis, 1993, 111p. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 1993.
- HAY, J. E., DAVIS, J. A. Calculation of the solar radiation incident on a inclined surface. **Proceedings...**First Canadian Solar Radiation Data Workshop, p. 59-72, 1980.
- HOPKINS, V., CROSS, G., ELLIFRITT, D. Comparing the thermal performances of buildings of high and low masses. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 85, p. 885-902, 1979.
- JOHNSON, H. A. Periodic heat transfer at the inner surface of a homogeneous wall. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 54, p. 143-164, 1948.
- KLUCHER, T. M. Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces. **Solar Energy**, v. 23, p. 111-114, 1979.
- LABAKI, L. C. Tratamento de dados climáticos de Campinas, SP, para análise de desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE AMBIENTES, 1995, São Paulo. **Anais...** São Paulo, NUTAU-USP, 1995, p. 355-365.
- LIU, B. Y. H., JORDAN, R. C. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. **Solar Energy**, v. 4, n. 3, p.1-19, 1960.
- MACKEY, C. O., WRIGHT, L.T. Summer comfort factors as influenced by the thermal properties of building materials. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 49, p. 148-174, 1943.
- MACKEY, C. O., WRIGHT, L.T. Periodic heat flow – homogeneous walls or roofs. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 50, p. 293-312, 1944.
- MACKEY, C. O., WRIGHT, L.T. Periodic heat flow – composite walls or roofs. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 52, p. 283-296, 1946.
- MENDES, R. J. K., BARTH, F. Análise do desempenho térmico de fachadas ventiladas com tijolos cerâmicos segundo o projeto de norma brasileira – desempenho térmico de edificações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO e II ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1999, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 1999. CD-ROM.
- PAPST, A. L. **Uso de inércia térmica em clima subtropical : estudo de caso em Florianópolis-SC**. Florianópolis, 1999. 165p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 1999.
- REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. **Solar Energy**, v. 45, n. 9, p. 9-17, 1990.

- RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. D. C. Luzatto Editora: Porto Alegre, 1986.
- RORIZ, M. **Conforto térmico e economia de energia de edificações: um modelo simplificado de avaliação**. São Carlos/SP, 1991.
- RUDOY, W., DOUGALL, R. Effects of the thermal mass on heating and cooling load in residences. **American Society of Heating and Ventilating Engineers**, v. 85, p. 903-917, 1979.
- SATTLER, M. A. Dias típicos para o projeto térmico de edificações para Porto Alegre. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 1º, 1990, Gramado. **Anais...** Porto Alegre, 1991, p.127-132.
- SODHA, M. S., KAUSHIK, S. C., TIWARI, G. N., GOYAL, I. C., MALIK, M. A. S., KHATRY, A. K. Optimum distribution of insulation inside and outside the roof. **Building and Environment**, v. 14, p. 47 – 52, 1979.
- SODHA, M. S., SETH, A. K., KAUSHIK, S. C. Periodic heat transfer through a hollow concrete slab: optimum placement of the air gap. **Applied Energy**, v. 6, p. 113 – 123, 1980.
- SODHA, M. S., BANSAL, N.K., BANSAL, P. K., KUMAR, A., MALIK, M. A. S. **Solar passive building: science & design**. Pergamon press: Oxford, v. 2, 1986.
- THRELKELD, J. L. **Thermal environmental engineering**. 2.ed. Prentice-Hall: New Jersey, 1970.

APÊNDICE I: PROCEDIMENTO PARA A DETERMINAÇÃO DE DIAS TÍPICOS DE PROJETO (VERÃO E INVERNO)

O procedimento adotado para a definição dos dias típicos de projeto é descrito, passo a passo, a seguir:

1. Procedência dos dados:

Instituto Agronômico de Campinas (IAC), seção de climatologia agrícola.

2. Local:

Campinas, SP (estação experimental do IAC)

Latitude: 22°53' S

Longitude: 47°05' O

Altitude: 669 metros

3. Período coberto:

5 anos: 01/01/1996 a 31/12/2000, sendo:

1996: 366 dias

1997: 365 dias

1998: 365 dias

1999: 365 dias

2000: 366 dias

Total: 1.827 dias

4. Para cada um dos 1.827 dias, obteve-se a temperatura máxima e a mínima.

5. Calculou-se a média aritmética entre estes dois parâmetros, chegando à temperatura média diária (t_{md}).

6. Dispõe-se de horas de insolação para cada um dos 1.827 dias. Adotou-se a temperatura sol-ar (t_{sa}) como parâmetro de referência, conforme sugerido em SATTLER, 1990.
7. Procedeu-se ao cálculo da radiação solar total diária (H_t) em superfície horizontal, a partir dos dados disponíveis de insolação diária, conforme procedimento descrito na seção 3.3.3.
8. Dividindo-se H_t por 24 (período de vinte e quatro horas), obteve-se a radiação solar média diária para cada um dos 1.827 dias (I_{md}).
9. Calculou-se a temperatura sol-ar para cada um dos 1.827 dias através da equação 3.1.
10. Adotou-se para o cálculo da t_{sa} , no passo 9, uma absorptância (α) de 0,4 e para o coeficiente de superfície (h_c) adotou-se $25 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$.
11. Ordenou-se os 1.827 dias segundo as temperaturas sol-ar.
12. Selecionou-se 15% dos 1.827 dias entre aqueles com temperaturas sol-ar mais elevadas, totalizando um conjunto de 275 dias.
13. De forma análoga selecionou-se 275 dias, agora entre aqueles com temperaturas sol-ar mais baixas.
14. Para cada um dos grupos de dias acima caracterizados nos passos 12 e 13, obteve-se as temperaturas às 7, 14 e 21 horas, e calculou-se a temperatura compensada (t_c) da seguinte forma:

$$t_c = \frac{t(7h) + t(14h) + 2 * t(21h)}{4} \text{ (valor comparável à temperatura média diária)}$$

15. Recalculou-se a temperatura sol-ar para os dois grupos de dias acima (550 dias), agora adotando-se a temperatura compensada t_c como temperatura média diária, entrando-se com este valor na equação 3.1.
16. Os dias com temperatura sol-ar mais elevadas foram classificados em um período iniciando em 10/09 e findando em 15/04. Aos dias incluídos neste período deu-se o nome de “Dias Quentes”. No período analisado (1996 a 2000) foram assim caracterizados:
1996: 219 dias

1997 a 1999: $218 \times 3 = 654$ dias

2000: 219 dias

totalizando: 1.092 dias quentes.

Ordenou-se os dias quentes segundo as temperaturas sol-ar, no período acima.

17. Analogamente, os dias com temperaturas sol-ar mais baixas foram classificados em um período iniciando em 16/04 e findando em 12/11. Este conjunto de dias foi denominado “Dias Frios”, assim caracterizado:

5 anos x 211 dias = 1.055 dias frios.

18. Com base na ordenação dos dias quentes e frios foram determinados os percentis, ou níveis, de 1,0; 2,5; 5,0 e 10%. Por exemplo:

O percentil de 2,5% relativo a dias quentes caracteriza o dia cuja temperatura sol-ar é excedida somente por 2,5% do conjunto de dias quentes. Assim, no caso, como foram definidos 1.092 dias quentes, o percentil de 2,5% caracteriza o dia cuja temperatura sol-ar é excedida por 27 dias ($1.092 \times 2,5\%$).

19. De forma idêntica, o percentil 5% relativo a dias frios identifica o dia cuja temperatura sol-ar excede 5% dos dias frios. Assim, no caso, como foram definidos 1.055 dias frios, o percentil de 5% caracteriza o dia cuja temperatura sol-ar é excedida por 53 dias ($1.055 \times 5\%$).

20. Dias quentes:

Percentil	Dia
1,0%	24/12/1997
2,5%	19/12/1999
5,0%	09/11/1996
10,0%	11/01/1998

21. Dias frios:

Percentil	Dia
1,0%	31/05/1999
2,5%	12/08/2000
5,0%	17/06/1997
10,0%	30/05/1998

22. Para cada nível (1,0%; 2,5%; 5,0%; 10,0%), e tanto para os dias quentes como para os frios, foram determinados os dias cujas temperaturas sol-ar se encontravam próximas àquela do dia caracterizando os percentis acima. Desta maneira, foram selecionados os dias cujas temperaturas sol-ar situavam-se imediatamente acima e abaixo da temperatura sol-ar do dia de referência, e dentro de um intervalo representando 1% do número de dias do conjunto (0,5% abaixo e 0,5% acima). Assim, na caracterização dos dias típicos de verão, foram considerados, além dos dias de referência aos percentis, os 6 dias ($1.092 \times 0,5\%$) com temperatura sol-ar imediatamente inferiores e superiores ao dia de referência do percentil considerado.
23. De forma semelhante, os dias de inverno foram definidos como segue: 6 dias acima e 6 dias abaixo do dia de referência ($1.055 \times 0,5\%$).
24. O parâmetro de seleção para o dia típico de verão e inverno é o índice de transparência K_t ($>0,75$) para que o dia seja considerado praticamente claro. Observou-se os índices de transparência para cada um dos dias que compunham cada percentil, e tomou-se o maior deles para os dias quentes, e o maior para os dias frios. O dia representativo do período frio correspondeu ao mês de agosto. Optou-se pela escolha do segundo dia frio com maior índice de transparência, agora no mês de julho, por ser mais representativo do período frio da região.

25. Os dias selecionados foram:

DIA TÍPICO DE VERÃO							
n	data	t_c	h.i.	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}
29	29/01/96	27,6	12,2	0,7686	8.790,71	366,28	33,5

DIA TÍPICO DE INVERNO							
n	data	t_c	h.i.	K_t	H_t	I_{md}	t_{sa}
204	22/07/96	11,7	10,3	0,7785	5.189,03	216,21	15,1

onde,

$n = n^\circ$ de ordem do dia no ano

t_c = temperatura compensada ($^\circ\text{C}$)

h.i.= número de horas de insolação diária

K_t = índice de transparência

H_t = radiação solar total diária em superfície horizontal (W/m^2)

I_{md} = radiação solar média diária em superfície horizontal (W/m^2)

t_{sa} = temperatura sol-ar ($^\circ\text{C}$)

APÊNDICE II: PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA VARIAÇÃO HORÁRIA DA TEMPERATURA DO AR EXTERIOR

O conjunto de dados climáticos obtido para a pesquisa não possui a variação horária da temperatura do ar exterior. Dispõe-se apenas de registros de temperaturas às 7, 14 e 21h, bem como das máximas e mínimas diárias. Recorreu-se ao procedimento proposto por RORIZ, (1991), para obtenção da variação horária da temperatura exterior. Este procedimento é descrito a seguir:

A variação horária da temperatura do ar exterior é dada aproximadamente pela seguinte expressão:

$$t(h) = \text{MAX} - B(h) \times (\text{MAX} - \text{MIN}) \quad (\text{II.1})$$

onde:

$t(h)$ = temperatura no momento “h”,

MAX = temperatura máxima externa no período considerado,

MIN = temperatura mínima externa no período considerado,

$B(h)$ = fator multiplicador para o momento “h”, segundo TAB. II.1.

TABELA II.1: Fatores multiplicadores para o momento “h”

Hora:	01	02	03	04	05	06	07	08
B (h) :	0,800	0,875	0,936	0,980	1,000	0,975	0,920	0,805
Hora:	09	10	11	12	13	14	15	16
B (h) :	0,635	0,427	0,225	0,097	0,025	0,000	0,020	0,060
Hora:	17	18	19	20	21	22	23	24
B (h) :	0,120	0,185	0,255	0,340	0,428	0,510	0,600	0,700

APÊNDICE III: ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SOL-AR

Conforme descrito na seção 4.3, necessita-se obter a representação matemática da temperatura sol-ar através de séries de Fourier. A solução, incluindo dois harmônicos, é apresentada na TAB. III.1 e segue o procedimento sugerido por ALFORD *et alii*, (1939):

- Coluna 1: apresenta os valores do tempo solar,
- Coluna 2: contém os valores da temperatura sol-ar para o dia típico de verão (TAB. 5.14),
- Coluna 3: mostra os valores para $\omega_1 \theta$ em graus, onde $\omega_1 = 15^\circ/\text{h}$ (equação 3.45). O tempo solar zero corresponde à meia-noite solar,
- Coluna 4: contém o cosseno do valor da coluna 3,
- Coluna 5: apresenta o valor da coluna 2 multiplicada pela coluna 4,
- Coluna 6: contém o seno do valor da coluna 3,
- Coluna 7: apresenta o valor da coluna 2 multiplicada pela coluna 6,
- O valor de t_{sam} é obtido através da média aritmética dos valores da coluna 2 (equação 3.42),
- O coeficiente a_1 é obtido somando-se os valores da coluna 5 e dividindo-se por 12 (equação 3.43),
- Obtém-se o coeficiente b_1 somando-se os valores da coluna 7 e dividindo-se por 12 (equação 3.44),
- O ângulo ψ_n é dado pela equação 3.49, devendo-se atentar para o quadrante no qual está inserido,
- As colunas 8 a 12 são uma repetição do procedimento para determinação do segundo harmônico, onde $\omega_2 = 2 \times \omega_1 = 30^\circ/\text{h}$.

TABELA III.1: ANÁLISE HARMÔNICA DA TEMPERATURA SOL-AR (dia típico de verão – $\alpha = 0,4$ – $\delta r = 63 \text{ w/m}^2$)

		1° harmônico					2° harmônico				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Tsolar	t _{sa} (°C)	$\omega_1 \theta$	$\cos \omega_1 \theta$	t _{sa} .cos $\omega_1 \theta$	sen $\omega_1 \theta$	t _{sa} .sen $\omega_1 \theta$	$\omega_2 \theta$	$\cos \omega_2 \theta$	t _{sa} .cos $\omega_2 \theta$	sen $\omega_2 \theta$	t _{sa} .sen $\omega_2 \theta$
0	22,4	0	1,000	22,4	0,000	0,0	0	1,000	22,4	0,000	0,0
1	21,2	15	0,966	20,5	0,259	5,5	30	0,866	18,4	0,500	10,6
2	20,2	30	0,866	17,5	0,500	10,1	60	0,500	10,1	0,866	17,5
3	19,4	45	0,707	13,7	0,707	13,7	90	0,000	0,0	1,000	19,4
4	18,9	60	0,500	9,5	0,866	16,4	120	-0,500	-9,5	0,866	16,4
5	18,6	75	0,259	4,8	0,966	18,0	150	-0,866	-16,1	0,500	9,3
6	20,6	90	0,000	0,0	1,000	20,6	180	-1,000	-20,6	0,000	0,0
7	25,2	105	-0,259	-6,5	0,966	24,3	210	-0,866	-21,8	-0,500	-12,6
8	31,0	120	-0,500	-15,5	0,866	26,8	240	-0,500	-15,5	-0,866	-26,8
9	37,4	135	-0,707	-26,4	0,707	26,4	270	0,000	0,0	-1,000	-37,4
10	43,6	150	-0,866	-37,8	0,500	21,8	300	0,500	21,8	-0,866	-37,8
11	48,7	165	-0,966	-47,0	0,259	12,6	330	0,866	42,2	-0,500	-24,3
12	51,3	180	-1,000	-51,3	0,000	0,0	360	1,000	51,3	0,000	0,0
13	51,4	195	-0,966	-49,6	-0,259	-13,3	30	0,866	44,5	0,500	25,7
14	49,2	210	-0,866	-42,6	-0,500	-24,6	60	0,500	24,6	0,866	42,6
15	45,3	225	-0,707	-32,0	-0,707	-32,0	90	0,000	0,0	1,000	45,3
16	40,5	240	-0,500	-20,2	-0,866	-35,0	120	-0,500	-20,2	0,866	35,0
17	35,5	255	-0,259	-9,2	-0,966	-34,2	150	-0,866	-30,7	0,500	17,7
18	30,7	270	0,000	0,0	-1,000	-30,7	180	-1,000	-30,7	0,000	0,0
19	28,1	285	0,259	7,3	-0,966	-27,2	210	-0,866	-24,3	-0,500	-14,1
20	27,0	300	0,500	13,5	-0,866	-23,4	240	-0,500	-13,5	-0,866	-23,4
21	25,9	315	0,707	18,3	-0,707	-18,3	270	0,000	0,0	-1,000	-25,9
22	24,9	330	0,866	21,6	-0,500	-12,5	300	0,500	12,5	-0,866	-21,6
23	23,7	345	0,966	22,9	-0,259	-6,1	330	0,866	20,5	-0,500	-11,9
760,7		-166,2					65,3				
t _{sa,m} 31,7		a ₁		-13,9	b ₁		-5,1	a ₂		5,4	b ₂ 0,3
				t _{sa,1}		14,8			t _{sa,2}		5,5
				$\psi_{1,1}$		20			$\psi_{2,1}$		3
				$\psi_{1,2}$		200			$\psi_{2,2}$		183
		ψ_1		200			ψ_2		3		
$\omega_1 = \frac{2\pi}{24}$		$\omega_n = n \omega_1$		$t_{sa,m} = \frac{1}{24} \int_0^{24} t_{sa} d\theta$		$a_n = \frac{1}{12} \int_0^{24} t_{sa} \cos \omega_n \theta d\theta$	$b_n = \frac{1}{12} \int_0^{24} t_{sa} \sin \omega_n \theta d\theta$		ω_1		15
									ω_2		30

APÊNDICE IV: COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO DE CALOR DE SUPERFÍCIES INTERNAS (h_i) E EXTERNAS (h_e) PARA CAMPINAS

Apresenta-se a seguir o método de cálculo e critérios adotados para utilização de coeficientes de transmissão de calor em superfícies internas (h_i) e externas (h_e) para Campinas, SP. É prática comum o uso de valores padronizados na literatura para h_i e h_e nos cálculos em conforto térmico. Porém, a formulação destes coeficientes sofre a influência de fatores climáticos e termofísicos, tornando-os únicos conforme o material e a região climática em estudo. No que se refere aos materiais, fatores como a emissividade de onda longa e a rugosidade de suas superfícies alteram os valores destes coeficientes. Com relação ao contexto climático, parâmetros como a velocidade do vento e a rugosidade do entorno também alteram estes valores. Adicionalmente, valores para superfícies horizontais (telhados) e verticais (paredes) devem ser diferenciados, uma vez que a velocidade do vento segundo uma ou outra destas superfícies varia. Deve-se levar em consideração, além disso, a altura destas superfícies. Finalmente, diferenciou-se também valores para o dia típico de inverno e de verão, pois a velocidade média do vento, para um ou outro caso, varia.

IV.1 Coeficiente de transmissão de calor de superfícies internas (h_i)

Conforme exposto acima, parâmetros como emissividade e rugosidade da superfície de materiais, e vento e rugosidade do entorno influenciam o cálculo dos coeficientes de superfície. No entanto, o coeficiente h_i restringe-se ao microclima interno, onde a velocidade do vento é próxima de zero. Pode-se inferir que a influência destes fatores no cálculo de h_i é mitigada, sendo razoável supor que valores obtidos pela literatura podem ser generalizados neste caso. Adotou-se nesta pesquisa os valores preconizados por RIVERO, (1986), dados na TABELA IV.1.

TABELA IV.1: Valores de h_i adotados para Campinas

h_i ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)		
Posição do fechamento e sentido do fluxo	Emissividade (ϵ)	h_i
Vertical (fluxo em dois sentidos)	0,90	8,3
	0,20	4,2
	0,05	3,3
Horizontal (fluxo ascendente)	0,90	9,1
	0,20	5,3
	0,05	4,3
Horizontal (fluxo descendente)	0,90	6,3
	0,20	2,5
	0,05	1,7

IV.2 Coeficiente de transmissão de calor de superfícies externas (h_e)

Obteve-se a velocidade média do vento para Campinas, segundo uma série de dados do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), de 1956 a 1996. Para diferenciação entre o período de verão e inverno, obteve-se os seguintes resultados médios:

Verão: velocidade média do vento $v = 1,9 \text{ m/s}$ (SE), medida a 3 m do solo.

Inverno: velocidade média do vento $v = 2,1 \text{ m/s}$ (SE) medida a 3 m do solo.

Para o cálculo da velocidade do vento, segundo características do entorno e da altura da superfície em questão, recorreu-se a DAVENPORT, (1967) apud SODHA *et alii*, (1986).

$$v = v_m \left(\frac{h}{h_m} \right)^{r_p} \text{ (m/s)} \quad (\text{IV.1})$$

onde:

v = velocidade do vento na altura h (m/s)

v_m = velocidade do vento na altura h_m (m/s)

r_p = fator de rugosidade do entorno

sendo:

$r_p = 0,15$ para campo aberto plano

$r_p = 0,29$ para cidades pequenas e subúrbios

$r_p = 0,45$ para áreas edificadas em centros urbanos

Para Campinas, as variáveis já disponíveis são $h_m = 3 \text{ m}$ e $r_p = 0,45$.

Utilizou-se a seguir o método contido em DREYFUS, (1960) para cálculo de h_e . De posse das velocidades médias do vento, para verão e inverno, calculou-se as velocidades segundo diferentes alturas de superfícies horizontais e verticais. Dividiu-se a exposição ao vento destas superfícies como segue:

Exposição branda: $h = 3 \text{ m}$ (correspondente a uma residência térrea)

Exposição normal: $h = 10 \text{ m}$ (correspondente ao 3º andar de um edifício)

Exposição severa: $h = 60 \text{ m}$ (correspondente aos andares superiores de um edifício alto)

Admite-se também que a velocidade é atenuada em $2/3$ para o caso das superfícies verticais em relação às horizontais (SODHA *et alii*, 1986). Portanto, para Campinas obteve-se (TABELA IV.2):

TABELA IV.2: Velocidades do vento (m/s) para Campinas

Superfície	Exposição	v – Verão	v – Inverno
Horizontal	branda (3 m)	1,9	2,1
	normal (10 m)	3,3	3,6
	severa (60 m)	7,3	8,1
Vertical	branda (3 m)	1,3	1,4
	normal (10 m)	2,2	2,4
	severa (60 m)	4,9	5,4

Para o cálculo do coeficiente de troca de calor radiante (H_r), utilizou-se (DREYFUS, 1960):

TABELA IV.3: Valores de troca de calor radiante (H_r) ($W/m^2\ ^\circ C$)

Temperatura média ($^\circ C$)	20	30	40	50
H_r	5,8	6,3	7,0	8,1

Levando-se em consideração a emissividade (ϵ) da superfície:

$$h_r = \epsilon H_r \quad (IV.2)$$

Cálculo do coeficiente de convecção térmica para superfícies verticais (h_{cv}) (DREYFUS, 1960):

TABELA IV.4: Valores do coeficiente de convecção térmica para superfícies verticais ($W/m^2\ ^\circ C$)

Diferença de temperatura ($^\circ C$)	2	10	30
h_{cv}	2,3	3,5	4,7

No caso de superfícies horizontais, fluxo ascendente, multiplica-se os valores da TABELA IV.4 por 4/3.

Os valores para convecção forçada (h_{cf}), onde a ação do vento é dominante, são obtidos através de (DREYFUS, 1960):

$$h_{cf} = 4,2v \text{ (W/m}^2\text{)}, v \text{ em (m/s)}$$

Com os cálculos acima, obtém-se h_c através da seguinte equação:

$$h_c = h_r + h_{ct} + h_{cf} \quad (\text{IV.3})$$

Aplicando-se os cálculos acima para Campinas obteve-se os valores de h_c para superfícies horizontais (TABELA IV.5):

TABELA IV.5: Valores do coeficiente de transmissão de calor para superfícies HORIZONTAIS externas h_c (W/m² °C) - Campinas

SUPERFÍCIES HORIZONTAIS			
Exposição	Emissividade (ϵ)	Verão	Inverno
Branda	0,90	16,0	17,5
	0,20	11,6	13,5
	0,05	10,6	12,6
Normal	0,90	21,9	23,8
	0,20	17,5	19,8
	0,05	16,5	18,9
Severa	0,90	38,7	42,7
	0,20	34,3	38,7
	0,05	33,3	37,8

Já para as superfícies verticais, obteve-se (TABELA IV.6):

TABELA IV.6: Valores do coeficiente de transmissão de calor para superfícies VERTICAIS externas h_c (W/m² °C) - Campinas

SUPERFÍCIES VERTICAIS			
Exposição	Emissividade (ϵ)	Verão	Inverno
Branda	0,90	13,9	14,6
	0,20	9,5	10,6
	0,05	8,5	9,7
Normal	0,90	17,2	18,8
	0,20	12,8	14,8
	0,05	11,8	13,9
Severa	0,90	28,6	31,4
	0,20	24,2	27,4
	0,05	23,2	26,5

OBSERVAÇÕES PARA AS TABELAS IV.5 e IV.6:

SUPERFÍCIES HORIZONTAIS

Exposição branda ao vento (Verão: $v = 1,9$ m/s; Inverno: $v = 2,1$ m/s)

Exposição normal ao vento (Verão: $v = 3,3$ m/s; Inverno: $v = 3,6$ m/s)

Exposição severa ao vento (Verão: $v = 7,3$ m/s; Inverno: $v = 8,1$ m/s)

SUPERFÍCIES VERTICAIS

Exposição branda ao vento (Verão: $v = 1,3$ m/s; Inverno: $v = 1,4$ m/s)

Exposição normal ao vento (Verão: $v = 2,2$ m/s; Inverno: $v = 2,4$ m/s)

Exposição severa ao vento (Verão: $v = 4,9$ m/s; Inverno: $v = 5,4$ m/s)

Verão: dados aplicáveis ao dia típico de verão para Campinas, SP

Inverno: dados aplicáveis ao dia típico de inverno para Campinas, SP

Velocidade média do vento obtida de uma série de 1956 a 1996 (IAC - Campinas)

Todos os valores referem-se a superfícies com rugosidade média

Para superfícies muito lisas (vidros) decrescer os valores em 30%

Para superfícies muito rugosas acrescer os valores em 30%