

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA  
TESE DEFENDIDA POR Jorge Recarte  
Henriquez Guerrero E APROVADA PELA  
COMISSÃO JULGADORA EM 28/03/96.

  
ORIENTADOR

**Estudo Numérico e Experimental Sobre**  
**Vidros Térmicos**

Autor : Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUÍDOS

1674845

# Estudo Numérico e Experimental Sobre Vidros Térmicos

Autor : Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail

Curso: Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Dissertação de Mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 1996

S.P. - Brasil

BC
ADA:
unicamp
H395e
Ex.
30/28593
67/96
<input type="checkbox"/> D <input checked="" type="checkbox"/>
25.11.00
19109196

00092518-5

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

H395e

Henríquez Guerrero, Jorge R.  
Estudo numérico e experimental sobre vidros térmicos /  
Jorge R. Henríquez Guerrero.--Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Kamal A. R. Ismail.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Energia solar. 2. Materiais isolantes. 3. Isolamento -  
Calor. I. Ismail, Kamal A. R. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E FLUÍDOS**

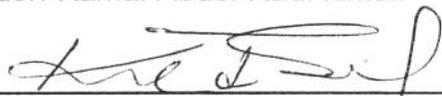
**Dissertação de Mestrado**

# **Estudo Numérico e Experimental Sobre**

## **Vidros Térmicos**

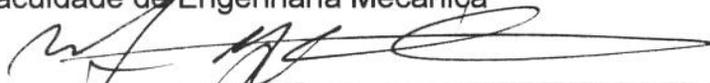
Autor : Jorge Recarte Henríquez Guerrero

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail



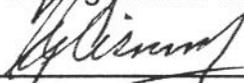
---

Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, Presidente  
Faculdade de Engenharia Mecânica



---

Prof. Dr. Marcelo Moreira Ganzarolli  
Faculdade de Engenharia Mecânica



---

Prof. Dr. Jorge Ivan Cisneros  
Instituto de Física 'Gleb Wataghin'

Campinas, 28 de março de 1996

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho a minha família, e de forma especial a minha avó.

## **Agradecimentos**

Ao meu orientador, professor Kamal, que tem sido um grande mestre e amigo, e de quem tenho aprendido muito.

A minha família, que mesmo estando muito longe, sempre me apoiaram e incentivaram neste longo caminho.

Aos professores, funcionários e colegas do departamento, que contribuíram de forma direta e indireta para que este trabalho se realiza-se, especialmente a minha amiga Mônica e ao técnico Wilton Furquin.

Ao laboratório de ensino de óptica do Instituto de Física da Unicamp, e de forma especial ao professor Dr. Jorge Ivan Cisneros que, gentilmente, sempre esteve prestes a brindar sua valiosa colaboração.

Ao CNPq pela ajuda financeira.

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

H	calor latente, kJ/kg
C	calor específico, kJ/kg K
$\rho$	densidade, kg/m <sup>3</sup>
k	condutividade térmica, W/m K
$h_C$	coeficiente convectivo, W/m <sup>2</sup> K
$h_R$	coeficiente de radiação, W/m <sup>2</sup> K
$T_i$	temperatura na região i, °C
t	tempo, s
S(t)	Interface sólido-líquido, m
Fo	número de fourier , adimensional
Ste <sub>M</sub>	número de Stefan modificado, adimensional
Bi	número de Biot modificado , adimensional
TMF	temperatura de mudança de fase, °C
I	fluxo de calor radiativo, W/m <sup>2</sup>
A <sub>s</sub>	área superficial, m <sup>2</sup>
A	absortância ótica, adimensional
R	refletância ótica, adimensional
T	transmitância ótica, adimensional
I <sub>o</sub>	constante solar, W/m <sup>2</sup>

$E_\lambda$  radiação solar espectral,  $W/m^2 \mu m$

$p$  coeficiente de extinção,  $1/m$

$\Delta$  incremento

### ***Letras Gregas***

$\delta(Fo)$  interface sólido-líquido, adimensional

$\tau$  tempo, adimensional

$\alpha$  difusividade térmica ( $k / \rho C$ ),  $m^2/s$

$\theta$  temperatura, adimensional

$\varepsilon$  emissividade, adimensional

$\sigma$  constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \cdot 10^{-8}$ ),  $W/m^2 K^4$

### ***Subscripts***

$i$  regiões 1, L, S, 3

$1$  região 1 ( vidro externo )

$L$  região fase líquida

$S$  região fase sólida

$3$  região 3 ( vidro interno )

$\lambda$  comprimento de onda,  $\mu m$

$ext$  externo

$int$  interno

## Sumário

1	Introdução	1
2	Revisão da Literatura	5
3	Análise Experimental	16
3.1	Escolha do Material de Mudança de Fase	16
3.1.1	Propriedades gerais do pcm	16
3.1.2	Glicóis de Polietileno (Óxido de Polietileno)	18
3.1.3	Polietileno de ligação Cruzada	19
3.2	Avaliação Experimental das Propriedades óticas	20
3.2.1	Avaliação da Transmitância	22
3.2.2	Avaliação da Refletância	26
3.2.3	Avaliação da Absortância	28
3.2.4	Avaliação da Energia Transmitida	31
4	Formulação Matemática	41
4.1	Painel de Vidro Duplo Preenchido com pcm	42
4.1.1	Adimensionalização das Equações	48
4.2	Painel de Vidro Duplo Preenchido com Ar	51
5	Modelo Numérico	58
5.1	Discretização das Equações para o Painel Vidro Duplo Preenchido com pcm	58
5.2	Discretização das Equações para o Painel Vidro Duplo Preenchido com Ar	74
5.3	Considerações na Simulação Numérica	78

6 Simulação Numérica e Discussões	90
7 Conclusões e Sugestões para Próximos Trabalhos	121
Referências Bibliográficas	122
Apêndice A	129
Apêndice B	134
Apêndice C	144
Apêndice D	146

## Lista de Figuras

2.1	Transmitância calculada em função da espessura do aerogel	10
2.2	Conductância térmica de vidro com aerogel e outros vidros em função do espaçamento	10
2.3	Detalhes das bordas dos vidros (HIT)	11
2.4	Detalhes de esquadro da janela com fluxo de ar	11
2.5	Desvantagem de janela comum	12
2.6	Variação de U em função do fluxo de ar	12
2.7	Coefficiente de sombreamento para várias janelas	13
2.8	Comparação entre medidas e cálculos de coeficientes de ganho de calor solar (SHGC)	13
2.9	Coefficiente de ganho de calor solar (SHGC) calculado, em função do fluxo de ar	14
2.10	Comparação entre previsão e medidas de U para vários vidros	14
2.11	Condução térmica em função do espaçamento para diversos gases	15
3.1	Porta amostra	22
3.2	Câmara de Enchimento	23
3.3	Transmitância de Vidros Comuns	24
3.4	Transmitância para Painel de vidro duplo de 6 mm de espessura e diferentes espaçamentos entre vidros	24
3.5	Transmitância para painel de vidro duplo com espaçamento entre vidros de 3mm preenchido com ar.	25
3.6	Transmitância para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento preenchido com pcm.	26

3.7	Transmitância para painel de vidro duplo de 4 mm de espessura com espaçamento entre vidros de 5mm preenchido com pcm (azul, verde e sem corante).	26
3.8	Refletância para vidro simples de 3mm de espessura	27
3.9	Refletância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm.	27
3.10	Refletância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm.	28
3.11	Refletância para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidro de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm.	28
3.12	Absortância para vidro simples de 3mm de espessura	29
3.13	Absortância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de espessura de 3mm e espaçamento de 3mm.	29
3.14	Absortância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de espessura de 6mm e espaçamento de 3mm.	30
3.15	Absortância para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidro de espessura de 6mm e espaçamento de 3mm.	30
3.16	Vidro comum, simples de 3 mm de espessura	32
3.17	Vidro comum, simples de 4 mm de espessura	33
3.18	Vidro comum, simples de 5 mm de espessura	33
3.19	Vidro comum, simples de 6 mm de espessura	34
3.20	Vidro comum, simples de 8 mm de espessura	34
3.21	Porcentagem de energia transmitida para vidros comuns em função da espessura do vidro.	35
3.22	Sistema vidro duplo de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar.	35
3.23	Sistema vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar.	36
3.24	Sistema vidro duplo de 5mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar.	36
3.25	Sistema vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar.	37

3.26	Sistema vidro duplo de 8mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar.	37
3.27	Porcentagem de energia transmitida em função da espessura do vidro	38
3.28	Comparação entre painéis de vidros simples e duplos.	38
3.29	Porcentagem de energia transmitida para painéis de vidros em função do espaçamento entre vidros (preenchido com ar).	39
3.30	Porcentagem de energia transmitida para painéis de vidros em função do espaçamento entre vidros (preenchido com pcm).	39
3.31	Porcentagem de energia transmitida para painéis de vidros simples e painéis de vidro duplo em função do espaçamento entre vidros ou espaçamento entre eles.	40
4.1	Esquema da janela em estudo	41
4.2	Diagrama esquemático de uma secção da janela com pcm, exposta a radiação solar	42
4.3	Diagrama esquemático de uma secção da janela com ar e exposta a radiação solar	52
5.1	Esquema do problema e notação para as equações de diferenças	59
5.2	Esquema malha móvel	65
5.3	Esquema de malha fixa para a região do vidro externo e interno	74
5.4	Simulação pelo método da absorvância concentrada	79
5.5	Simulação pelo método da absorvância distribuída	80
5.6	Fluxograma do código computacional	83
6.1	Simulação para vidro simples de 3mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	91
6.2	Simulação para vidro simples de 4mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	92
6.3	Simulação para vidro simples de 5mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	93
6.4	Simulação para vidro simples de 6mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho	94

de calor

6.5	Simulação para vidro simples de 8mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	95
6.6	Ganho de calor para vidros simples de diferentes espessuras,	96
6.7	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	97
6.8	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 6mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	98
6.9	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 8mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	99
6.10	Ganho de calor para painéis de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 6mm e espaçamento variável	100
6.11	Simulação para painel de vidro duplo de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	101
6.12	Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	102
6.13	Simulação para painel de vidro duplo de 5mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	103
6.14	Simulação para painel de vidro duplo de 8mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	104
6.15	Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com ar, espaçamento fixo de 3mm e espessura do vidro variável	105
6.16	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	106
6.17	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 6mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	107

6.18	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 8mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	108
6.19	Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 15mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	109
6.20	Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidro de 6mm de espessura e espaçamento variável	110
6.21	Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	111
6.22	Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm-verde; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	112
6.23	Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm-azul; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externas e internas, e ganho de calor	113
6.24	Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com pcm colorido, vidro de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm	114
6.25	Fração de calor ganho pelo meio ambiente interno para vidros simples de diferentes espessuras.	115
6.26	Fração de calor ganho para painel de vidro duplo de 6mm preenchido com ar em função do espaçamento entre vidros.	115
6.27	Fração de calor ganho em função da espessura do vidro, para painel de vidro duplo com espaçamento fixo de 3mm preenchido com ar	116
6.28	Fração de calor ganho para painel de vidro duplo de 6mm de espessura preenchido com material de mudança de fase	116
6.29	Fração de calor ganho para todas as configurações estudadas	117
6.30	Avaliação da fração de energia transmitida para vidros simples segundo dois tipos de critérios.	118
6.31	Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro duplo de 6mm de espessura preenchido com ar, segundo dois tipos de critérios.	119
6.32	Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro duplo com espaçamento fixo de 3mm preenchido com ar, segundo dois tipos de critérios.	119

6.33	Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro de 6mm de espessura preenchido com pcm, segundo dois tipos de critérios.	120
1-A	Malha com seus pontos nodais	129
1-B	ângulos solares e incidência para uma superfície inclinada	138
2-B	Curva interpolada do fator $f$ em função do tempo	143
1-C	Radiação absorvida ao longo da distância $x$	145
2-C	representação da radiação absorvida no nó (i)	145

## **Lista de Tabelas**

3.1	Propriedades Termofísicas dos Etileno Glicóis (SI)	18
3.2	Propriedades Termofísicas do Polietileno Glicol de Ligação Cruzada	20
1-B	Intensidade de radiação solar para o dia 21 de cada mês com base no ano de 1964	135
2-B	Fator $f$ para cada hora do dia	142
3-B	Temperaturas médias (máximas e mínimas) durante um ano para a cidade de Campinas	143

## Resumo

**HENRÍQUEZ**, Jorge Recarte Guerrero, *Estudo Numérico e Experimental Sobre Vidros Térmicos*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996. 147 p. Tese (Mestrado)

Este trabalho apresenta uma abordagem diferente em relação ao conceito de janelas termicamente efetivas, isto é, janelas que reduzem a energia transmitida para dentro ou fora de uma sala. A idéia é usar um painel de vidro duplo preenchido com material de mudança de fase (pcm), cuja temperatura de fusão é determinada por critérios de conforto térmico. A investigação inclui modelamento dos mecanismo de transferência de calor e radiação através do painel, caracterização ótica de janelas convencionais e compostas, e simulação numérica. As amostras incluem vidros comerciais simples de diferentes espessuras e painéis de vidro duplo de diferentes espessuras e espaçamento entre vidros, preenchidos com ar, pcm e finalmente pcm colorido. O modelo é unidimensional transiente e a simulação numérica foi implementada através do método de diferenças finitas na sua forma explícita. Dos resultados da simulação numérica e dos testes de caracterização óticos foram levantadas curvas de ganho térmico, distribuição de temperatura através do painel e evolução da temperaturas da superfícies interna e externas do painel ao longo de um período de 24 horas de forma a verificar o efeito do pcm no desempenho térmico da janela composta.

*Palavras chave:*

Vidro Térmico, Isolamento Térmico com pcm, Modelamento de Vidro Térmico, Análise Térmica de Vidros com pcm.

## Abstract

**HENRÍQUEZ**, Jorge Recarte Guerrero, *Estudo Numérico e Experimental Sobre Vidros Térmicos*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1996, 147 p. Tese (Mestrado)

This work present a new concept for thermally effective windows, that is windows which reduce the energy transfer to and from the internal ambient. This idea behind this concept is to use a pcm fill in the gap between the two glass panels. The fusion temperature of the pcm is selected according to the thermal comfort criterion. The investigation includes modeling of the mechanisms of heat transfer relevant to the window problem, the thermal radiation through the glass panels, the optical characterization of conventional and composite window configurations and finally the numerical simulation of these configurations. Because of the lack of information on the thermal and optical properties of national glass and specially on the composite configuration optical tests were realized to determine the transmittance and reflectivity of simple glass panels of different thicknesses and spacings, air and pcm filled glass panels and finally coloured pcm filled glass panels. The model is a transient one dimensional and the numerical solution is based upon explicit finite difference scheme. the numerical simulations and the optical tests realized allow the determination of the heat gain, the temperature distribution across the glass panels, the outlet and the inlet instantaneous surface temperatures and finally the overall thermal performance of any glass panels including the proposed system.

### *Key words:*

Thermal glass panels, pcm shading panels, modeling of thermal effective panels.

# Capítulo 1

## Introdução

As janelas em prédios representam uma necessidade humana de estabelecer contato visual com o mundo externo e observar as mudanças climáticas externas, relaxação e evitar a monotonia. Além disto, através das janelas se admite a radiação solar para iluminação e aquecimento. As janelas de modo geral são elementos necessários para o melhoramento da estética interna e externa de prédios e residências. Todos estes fatores são importantes e devem ser levados em consideração quando se estuda a possibilidade de gastos energéticos com janelas, seja com aquecimento ou resfriamento interno. Assim na escolha de janelas (portas) devem ser incorporados vários requisitos tais como: arquitetônicos, térmicos, econômicos e humanos. Um projeto que atende estas necessidades de forma adequada representa um projeto ideal que na grande maioria das vezes não é realizado. Por este motivo foram criadas normas técnicas e feitas uma grande quantidade de investigações teóricas, numéricas e experimentais desde 1970 com o objetivo principal de projetar janelas de forma técnica levando em consideração os custos operacionais do conforto térmico dos ocupantes.

A facilidade do vidro para transmitir a radiação solar depende do comprimento de onda da radiação, a composição química e espessura do vidro e o ângulo de incidência. Vidros comuns com incidência zero e espessuras de 2,5 mm têm transmitância de 0,86; de 3mm de 0,84 e de 6mm de 0,78. Geralmente os vidros comuns são opacos à radiação de onda longa emitidos pelas superfícies a temperatura abaixo de 121°C. Esta característica é que realmente viabiliza o efeito “Green House”.

Uma janela energeticamente efetiva deve ser capaz de permitir a iluminação natural suficiente durante o dia sem que, no entanto, cause desconforto devido às perdas térmicas ocorridas durante a noite ou aos ganhos térmicos durante o dia. Infelizmente, os habitantes de prédios altos com grande área de vidros geralmente sofrem tanto de superaquecimento como de ofuscação. Em prédios de escritório modernos com grandes áreas de vidro a otimização é obtida quando se consegue: i) reduzir o ganho solar excessivo, ii) evitar a ofuscação das salas, iii) evitar ou reduzir a carga térmica através das janelas nos períodos mais quentes. Os meios de satisfazer estes requisitos devem ser incluídos nas propostas do prédio na etapa do projeto.

Os sistemas de condicionamento ambiental convencional são geralmente instalados para solucionar os problemas de desconforto térmico induzidos por efeitos solares. Mas isto, necessita de um maior investimento de capital e elevados custos operacionais e de manutenção. Mesmo assim, em um prédio grande um sistema único não representa uma solução adequada, pois de acordo com o trajeto algumas das áreas não serão atendidas de forma satisfatória. Neste caso deve ser adotado necessariamente o conceito de sistemas múltiplos e independentes. Este foi o motivo principal de promover o desenvolvimento tecnológico na área de filmes e pinturas protetoras baratas, mesmo sem ser altamente eficazes e duráveis. Em princípio estes filmes (refletivo, absorvivo ou isolante) podem impedir a transmissão de radiação solar para o espaço interno, impedir a radiação de onda longa das superfícies internas para o ambiente externo e finalmente eliminar a ofuscação, deste modo reduzir a temperatura média interna e ajudar a alcançar um conforto térmico razoável. Infelizmente, no presente, existe uma falta quase total de informações e dados técnicos confiáveis sobre os filmes comerciais desenvolvidos já disponíveis no mercado. Esta falta é sentida de forma mais acentuada pelos grupos externos que trabalham nesta área. Com esta falta não é possível para o projetista prever em termos anuais com certa precisão: os efeitos térmicos, possíveis ganhos energéticos e iluminação natural.

A atmosfera da Terra na realidade funciona como filtro para impedir a transmissão de radiação infravermelha ( $0,7 < \lambda < 3 \mu\text{m}$ ) e a radiação ultravioleta ( $\lambda < 0,4 \mu\text{m}$ ). Esta reduz a insolação máxima recebida numa superfície horizontal para cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ .

A componente ultravioleta degrada e envelhece basicamente tudo: moveis, pinturas, papel, tecidos, etc. e portanto é desejável a eliminação completa deste componente. A insolação também pode provocar superaquecimento na maioria das estações no Brasil, sendo

portanto desejável controlar este componente sem impedir a faixa visível responsável pela iluminação natural ( $0,4 < \lambda < 0,7 \mu\text{m}$ ).

Em climas temperados é necessário evitar o aquecimento solar em alguns períodos do ano, onde ele pode se tornar excessivo, em outros seria desejável um ganho maior de calor livre através da janela sem que ocorresse ofuscação. Neste caso os filmes, assim como a maioria das soluções fixas adotadas até agora, se mostraram inúteis. Existem soluções muito caras e que ainda se encontram em fase laboratorial que podem atender a esta situação como no caso dos filmes eletrocromáticos e termocromáticos em desenvolvimento pela Asahi Glass, Tóquio, Japão. Estes materiais são usados na forma de cristal líquido com fotocélulas externas e internas independentes para controle. Na presença de uma insolação razoável a fotocélula emite um sinal que causa o escurecimento do cristal líquido e conseqüentemente da insolação transmitida. estes filmes devem possibilitar, de forma automática e contínua a variação da taxa de insolação transmitida ao ambiente interno. Entretanto, mesmo quando terminado o seu desenvolvimento o preço previsto é proibitivamente alto para qualquer utilização comercial.

Uma das técnicas que foi utilizada para reduzir o coeficiente global de transferência de calor consiste em usar vidro duplo preenchido com ar ou gás de baixa condutividade térmica. Esta técnica mostrou algumas dificuldades pois o gás deve ser selado entre os vidros. O aquecimento excessivo acidental pode provocar dilatação volumétrica do gás e conseqüentemente quebra do painel. Como alternativa foram estudados vidros duplos com ar escoando entre eles. Isto resolve obviamente o problema de dilatação térmica mas provoca outros.

Por exemplo o vidro neste caso deve ser tratado como parte de um sistema que envolve um ventilador para circulação de ar e um armazenador para remover o calor coletado pelo fluxo de ar. Outras técnicas que utilizam venezianas para controle de radiação que penetra no interior da sala foram testadas. Uma versão utiliza venezianas movidas manualmente entre dois painéis de vidro. Outra técnica utiliza micro-venezianas embutidas num espaço pequeno e que muda de orientação conforme a intensidade da radiação incidente de forma automática. O custo inicial e a durabilidade são fatores determinantes nestes casos. Vidros coloridos foram utilizados nos prédios, especialmente comerciais com o objetivo de melhorar a estética e também reduzir a energia incidente mas, na maioria dos casos, necessita da colagem de filmes refletivos.

A revisão da literatura mostra atividades intensas de pesquisa nos vários níveis, fundamentais e aplicadas, dirigidos por grupos multidisciplinares. A maioria dos trabalhos está ainda em nível laboratorial e outros sem condições a aplicação prática. De fato, existem excelentes modelos para a simulação do desempenho térmico de prédios e sistemas associados. Graças a atuação intensa nesta área que a visão técnica dos arquitetos mudou e agora não é voltada somente a estética mas, também, a funcionalidade é levada em consideração nos projetos modernos. Usando programas computacionais os arquitetos avaliam o conforto humano passivo, a necessidade de janela e qual deve ser sua orientação.

Este trabalho que está sendo reportado aqui representa uma contribuição nova à área de pesquisa em janelas visando uma maior eficácia térmica e ótica, além da simplicidade operacional e de fabricação. Esta técnica, somada ao isolamento térmico das paredes expostas à radiação solar, deve resultar na minimização dos efeitos térmicos e conseqüente redução nos gastos com os equipamentos de condicionamento de ar.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

Em (1983) Rubin e Lampert apresentaram um trabalho que descreve o uso de sílica aerogel para isolamento térmico de janelas. Valores da condutividade térmica obtido usando amostras de aerogel são em torno de  $0,019 \text{ W/m K}$  mas as espessuras necessárias para competir são geralmente maiores. As figuras (2.1) e (2.2) mostram alguns resultados teóricos baseados nas medidas de transmitância.

Alguns problemas com o aerogel são que ele se quebra facilmente, necessita boa vedação, além de proteção mecânica e possível inclusão de  $\text{CO}_2$  ou outro gás de baixa condutividade térmica. Um dos maiores problemas é a dificuldade de fabricação em medidas maiores que as amostras, alguns  $\text{cm}^2$ .

Em 1984 Keller, Grethen e Brader apresentaram um trabalho que descreve o uso de filmes colados nas superfícies internas de vidros duplos ,triplos, etc., ver figura (2.3). O resultado mostra uma redução na condutância térmica, resultando em coeficiente global de troca de calor de  $0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Entretanto os testes mostram certa degradação com o tempo além da necessidade de projetos complicados para juntas dos quadros.

Ripatti (1987), apresentou um estudo detalhado sobre vidros ventilados. Este tipo de conceito gera uma quantidade de calor que deve ser armazenado para outro uso. Esta técnica deve provocar sujeiras nos interiores dos vidros além de necessitar de um sistema de ventilação e um sistema de armazenamento térmico. O tratamento numérico foi feito usando o código computacional TRNSYS. Basicamente a técnica da janela ventilada é uma combinação que utiliza o conceito de coletor solar junto com janela de vidro duplo com veneziana interna

móvel. O custo inicial do sistema é muito alto. As figuras (2.4) a (2.6) mostram os detalhes da janela ventilada. A figura (2.7) mostra um estudo comparativo entre vários tipos de janelas enquanto a figura (2.8) mostra o ganho solar (térmico) em função do fluxo de ar. A figura (2.9) mostra o ganho térmico em função do fluxo de ar para vários tipos de vidros.

Shaviv (1987) apresentou um método analítico para projetar venezianas fixas e móveis. Neste método a janela pode ter qualquer forma e fixa numa parede de qualquer orientação. A idéia é usar um computador para gerar o envelope de uma família de soluções de sombra que satisfaça prescritos de demanda de corta luz. Com base nisto é possível projetar a geometria das venezianas.

Os trabalhos de Rennekamp (1979), Rubin e Collins (1979), e Lowinski (1979) são relacionados aos aspectos experimentais de teste de janelas, avaliação das perdas térmicas e uso de venezianas. No trabalho de Rennekamp (1979) uma discussão crítica das normas ASTM-0236 é apresentado junto com uma versão nova da bancada. No trabalho de Lowinski (1979) foram testados janelas e portas para avaliar o desempenho térmico dos produtos comerciais.

Klem e Keller (1987) apresentaram os resultados de um estudo sobre vidros com um filme de baixa emissividade. Uma redução do valor do coeficiente global de troca de calor  $U$  foi observado. As medidas de longa duração na presença do vento mostraram inconsistência.

Arasteh, Hartman e Rubin (1987) descreveram a verificação experimental da metodologia do código computacional Window 2.0. A figura (2.10) mostra a variação do coeficiente global de troca de calor  $U$  com o espaçamento dos vidros.

Dahlen (1987), apresentou uma investigação sobre vidros de baixa emissividade utilizando filmes depositados em vácuo. Esta técnica está em uso desde 1978. O uso destes filmes resultam na redução da refletância no infravermelho. As camadas depositadas são protegidas por filmes plásticos que estende sua vida útil em cerca de 5 anos.

Uma das técnicas mais utilizadas para reduzir o coeficiente global de troca térmica de vidro é a inclusão de gás entre duas folhas de vidro. Um resultado típico é mostrado na figura (2.11) para vários gases.

Reilly, Arasteh e Rubin (1990) publicaram um trabalho sobre os efeitos térmicos dos gases que absorvem a radiação infravermelha colocados nos painéis de janelas e comparam os resultados do modelo com medidas experimentais. No trabalho foi utilizado um modelo unidimensional com um esquema elementos finitos e volume de controle para calcular a troca térmica através de uma janela horizontal preenchida com o gás absorvente. Na parte experimental a janela foi aquecida pelo topo para eliminar os efeitos convectivos. Os resultados numéricos e experimentais mostram boa concordância e ambos indicam que este sistema implica em uma pequena redução do calor transferido através da janela e portanto tem eficiência baixa na redução do calor transmitido por radiação.

Em 1992 Klems publicou um trabalho interessante sobre o uso da montagem móvel (MoWiTT) de teste de janelas em operação noturna para determinar o coeficiente de troca de calor  $U$ . Os valores obtidos podem ser usados para representar as condições de inverno. O autor confirma a viabilidade deste método de teste para representar as condições de inverno, entretanto o método é complicado e as fontes de erro são diversas.

Elmahdy (1992) apresentou um trabalho no qual faz uma descrição da instalação experimental do Conselho Nacional de Pesquisa do Canadá para teste de janelas e portas. A montagem experimental é compacta de caixa quente com proteção térmica e um sistema de temperatura constante no lado da sala e um gerador de vento do lado externo. O trabalho apresenta também um procedimento de teste e comparação dos resultados com outras montagens. Estes trabalhos experimentais são altamente importantes no sentido de fornecer dados reais sobre os produtos (janelas e portas) que serão utilizados nos prédios permitindo assim a avaliação das cargas térmicas e a alimentação de dados em programas computacionais permitindo uma melhor avaliação da demanda térmica.

Harrison e Dubrous (1992) apresentaram um trabalho que utiliza a instalação de um simulador solar canadense para avaliar o coeficiente  $U$  e o coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) das janelas. Uma descrição detalhada da instalação, método de teste e avaliação dos efeitos e incertezas nas medidas dos valores finais do SHGC e de  $U$  são apresentados.

Arasteh et all (1992) apresentaram um trabalho no qual usaram termografia infravermelha para o estudo de transferencia de calor através de janelas. O campo de temperatura da superfície do espécimen é capturada usando um scanner infravermelho

Einarsrud, Haereid e Wittwer (1993) publicaram um trabalho que reporta as propriedades de um novo sílica xerogel transparente. O novo material tem densidade baixa ( $0,28 \text{ g/cm}^3$ ) e condutividade térmica da ordem de  $0,018 \text{ W/m K}$ . As propriedades térmicas e físicas deste xerogel foram comparadas com o aerogel e outros materiais similares. A vantagem mais importante deste novo material é a facilidade de fabricação uma vez que suas propriedades térmicas e mecânicas são inferiores. Neste trabalho foram feitos também testes de avaliação real em janelas para verificar o seu comportamento operacional e sua resistência aos mecanismos de instalação.

Harrison e Simon (1994) apresentaram um trabalho no qual discutem um método de teste para a determinação do coeficiente de ganho de calor solar usando um simulador de radiação solar. Os resultados são comparados com valores obtidos dos programas computacionais VISION3 e FRAME.

Wright (1995) publicou um trabalho no qual apresenta um sumário e compara alguns métodos para o cálculo de ganho de calor solar. Uma atenção especial é dada aos códigos computacionais de domínio público VISION3 e WINDOW4.1. Detalhes concernentes a propriedades solares óticas e mecanismos de transferência de calor são examinados e discutidos.

Muitas pesquisas de modelagem e numéricas forma desenvolvidas com o objetivo de facilitar o trabalho dos projetistas de grandes edifícios e prédios com relação à previsão do desempenho térmico de equipamentos de controle térmico ambiental.

## 2.1 Modelos mais detalhados

Dentre os modelos mais completos cabe destacar:

**WINDOW 4.0:** um programa feito para PCs de análise térmica de janelas desenvolvido pelo "Windows and Daylighting Group, Building Technologies Program, Energy and Environment Division, Lawrence Berkeley Laboratory, California". Este programa avalia o desempenho em função da temperatura ambiental, velocidade, orientação e localização do vento e a estação do ano. É considerado o programa mais completo disponível no mercado.

**BLAST (US Army Construction and Engineering Research Laboratory):** que é o mais detalhado para modelamento e também inclui simulação para HVAC.

**DOE-2 (US Department of Energy):** no qual o tratamento dado não é muito rigoroso entretanto a simulação do equipamento HVAC é mais completa e as rotinas para o cálculo de iluminação são bem detalhadas.

**ESP (ABACUS, University of Strathclyde):** é o mais detalhado e completo código de simulação térmica para prédios incluindo a simulação do HVAC, fluxo interno de ar além de mostrar a distribuição interna de radiação.

**HTB2 (University of Wales Institute of Science):** que se trata de um código baseado em diferenças finitas incluindo a modelagem do fluxo e simulação de equipamentos HVAC.

**NBSLD (US National Bureau of Standards):** um código mais detalhado para a simulação térmica e modelamento das cargas térmicas em prédios.

**TAS (Amazon Energy, Milton Keynes):** que se baseia no modelo BUILD desenvolvido no Cranfield Institute of Technology e inclui também uma entrada gráfica dos detalhes geométricos do prédio e uma modelagem em regime permanente do equipamento HVAC.

## 2.2 Modelos mais simples

A revisão bibliográfica mostra que existe um número muito grande de programas computacionais para a simulação térmica de prédios e usados como ferramenta de projeto de cálculo. Destes modelos apresentamos quatro dos mais representativos:

**BREDEM (Building Research Establishment):** que é baseado no modelo grau-dia.

**CALPAS (Berkeley Solar Group, Califórnia):** é similar ao modelo SERI-RES permitindo entrada gráfica da geometria do prédio. Ele permite também a combinação de convecção e radiação utilizando-se de intervalos de tempo de uma hora.

**The Solar Load Ratio Method (Los Alamos Scientific Laboratories):** que é baseado nas correlações obtidas do modelo PASOLVE.

**SPIEL (Ecotech Design, Sheffield):** baseado no modelo SCRIBE, possui entrada gráfica para a geometria do prédio mas deficitário em sistemas HVAC e equipamentos.

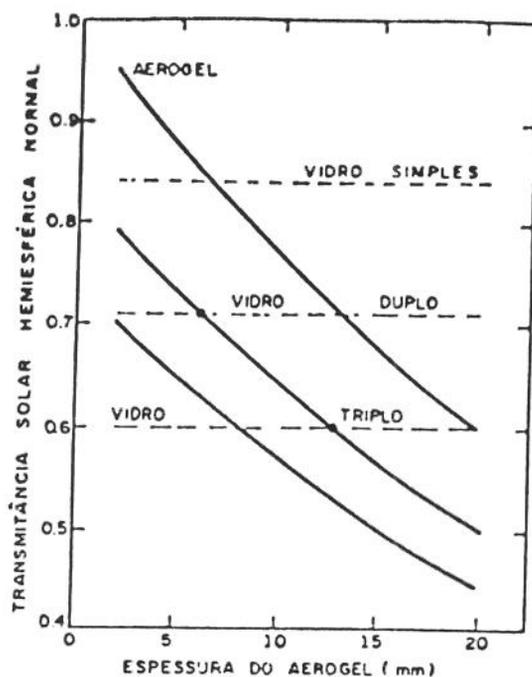


Figura 2.1: Transmitância calculada em função da espessura do aerogel

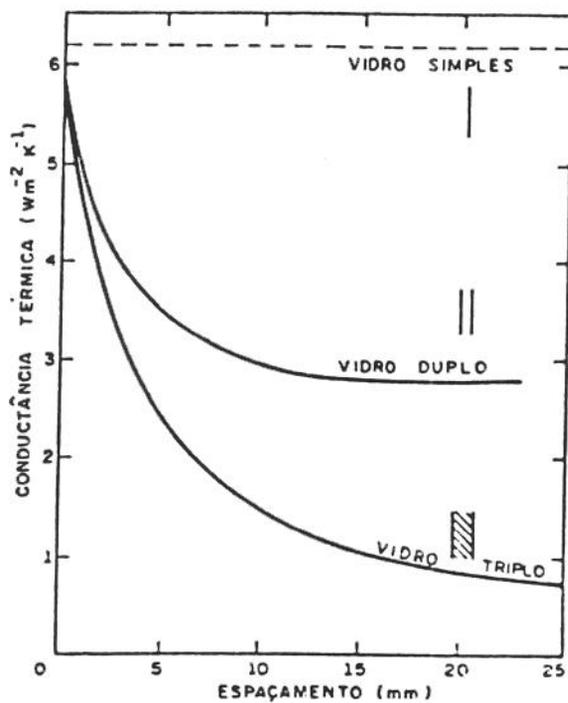
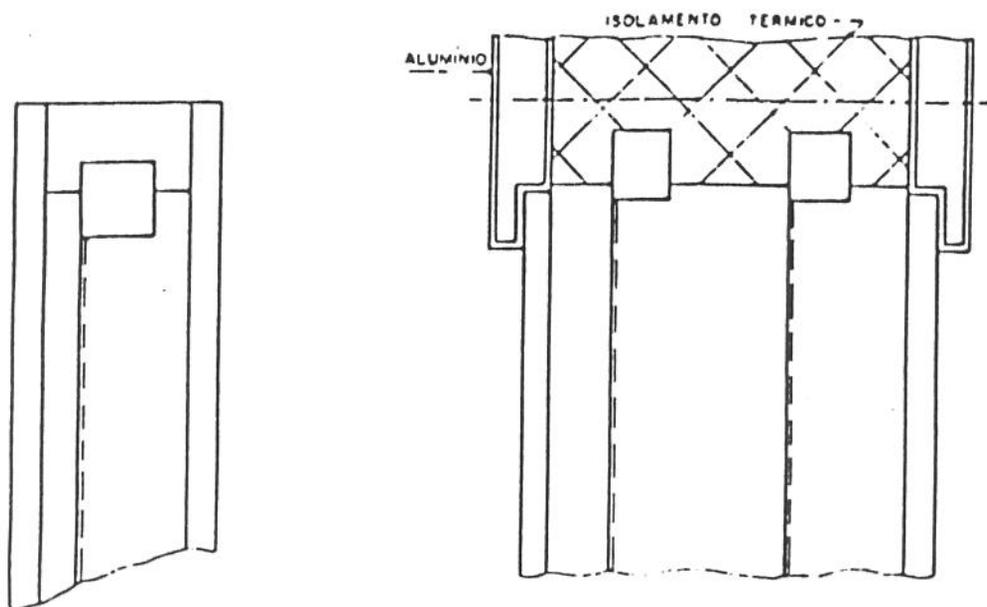
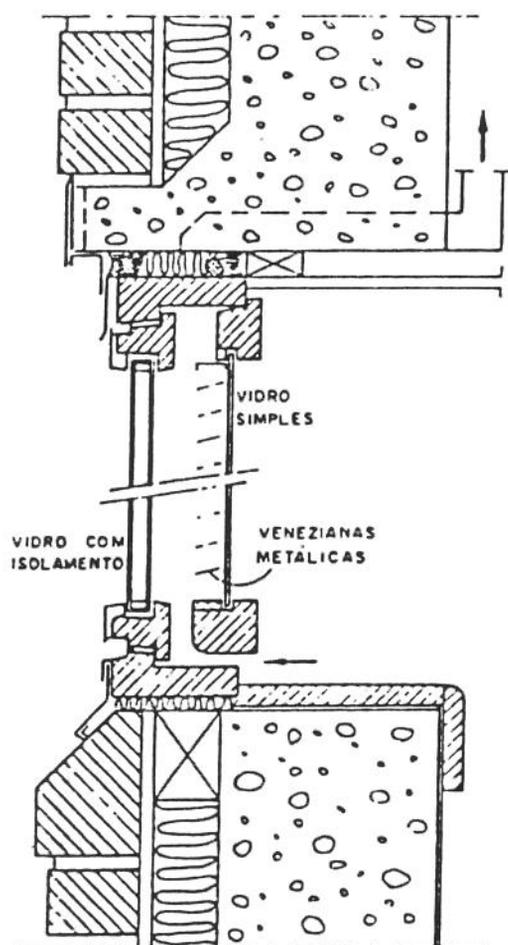


Figura 2.2: Condutância térmica de vidro com aerogel e outros vidros em função do espaçamento



**Figura 2.3:** Detalhes das bordas dos vidros (HIT)



**Figura 2.4:** Detalhes de esquadro de janela com fluxo de ar

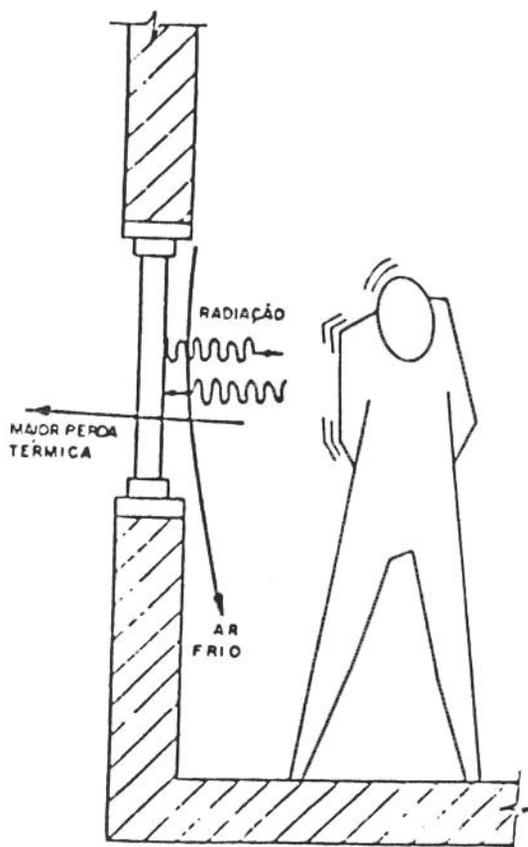


Figura 2.5: Desvantagem de janela comum

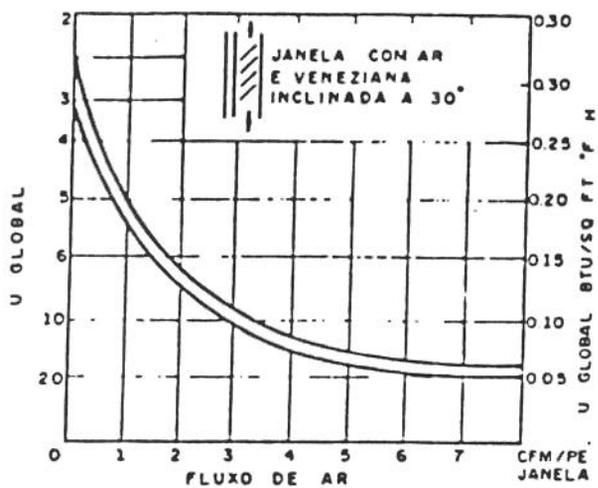


Figura 2.6: Variação de U em função do fluxo de ar

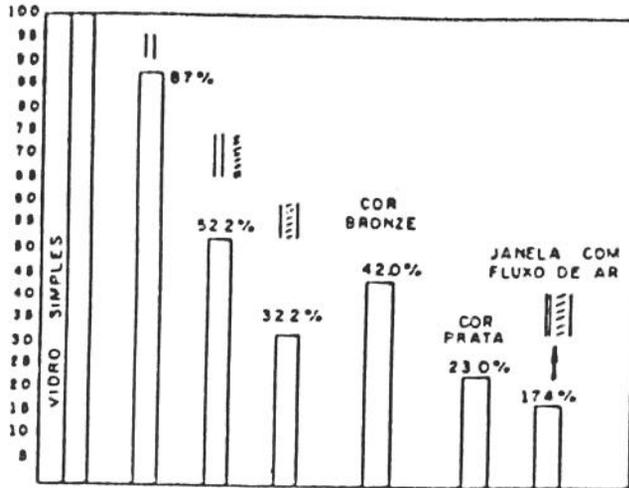


Figura 2.7: Coeficiente de sombreamento para varias janelas

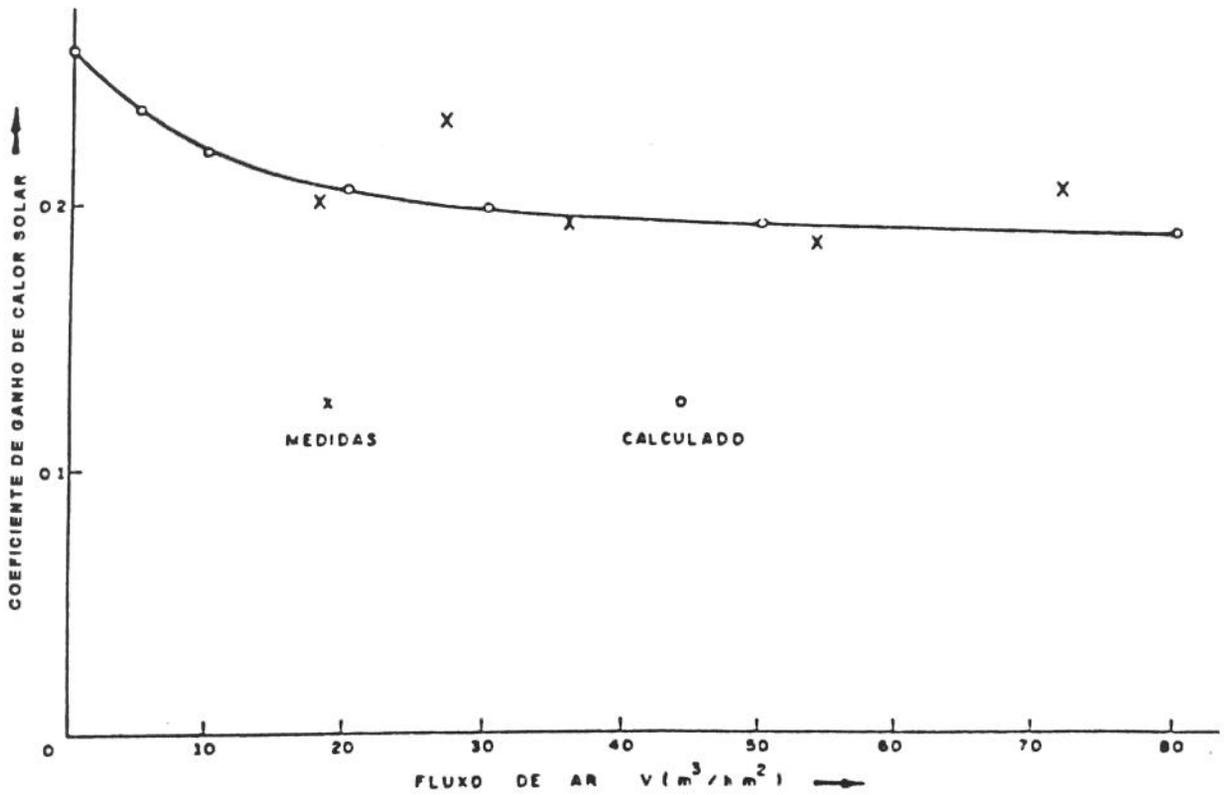


Figura 2.8: Comparação entre medidas e cálculos do coeficiente de ganho de calor solar (SHGC)

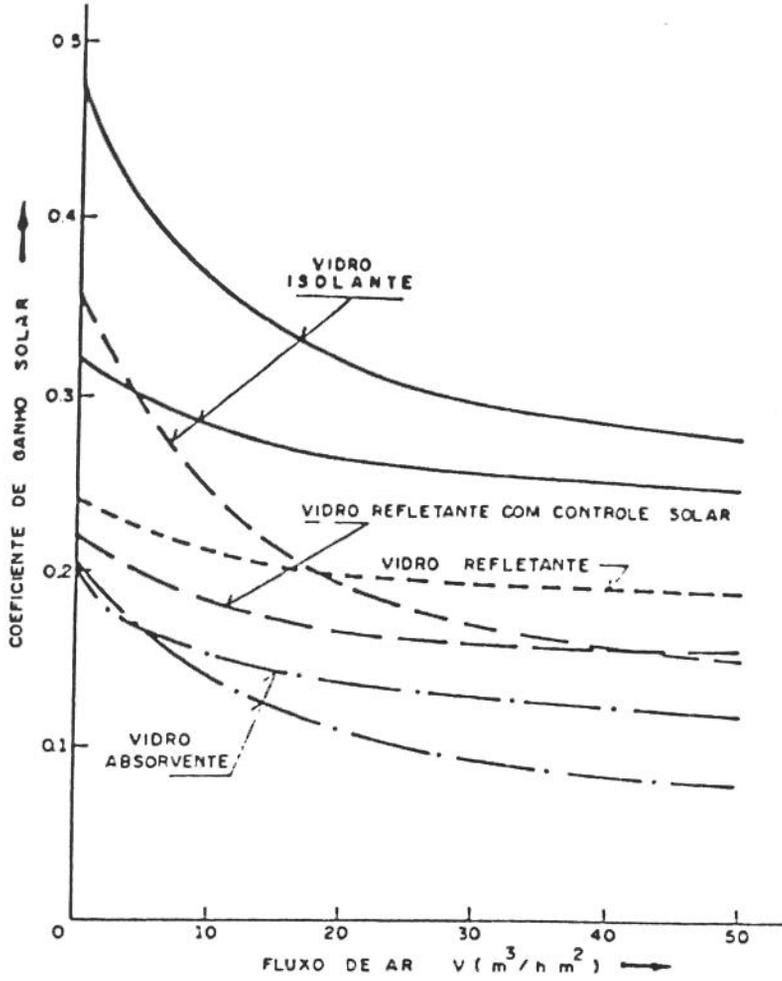


Figura 2.9: Coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) calculado em função do fluxo de ar

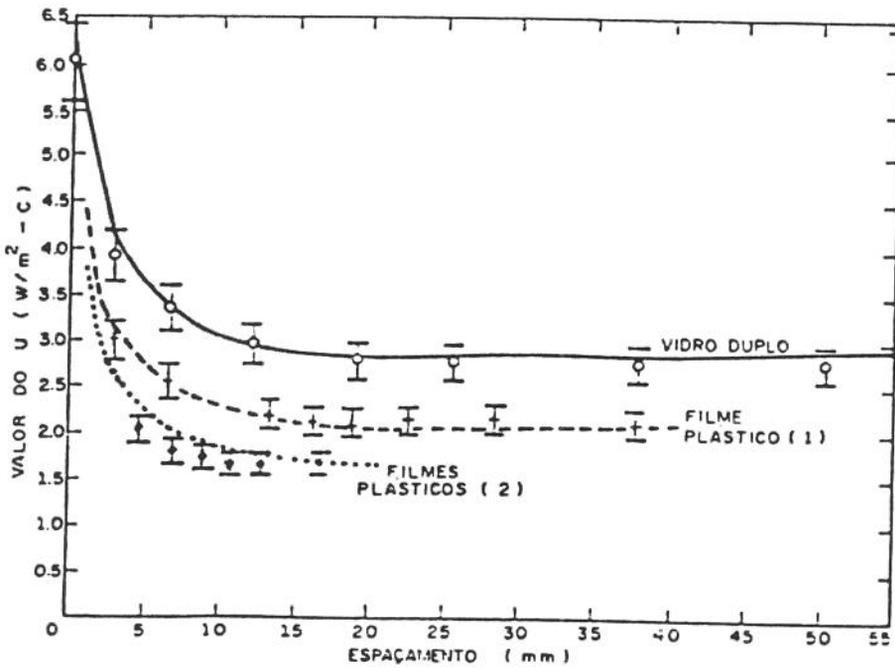


Figura 2.10: Comparação entre previsão e medidas de U para vários vidros

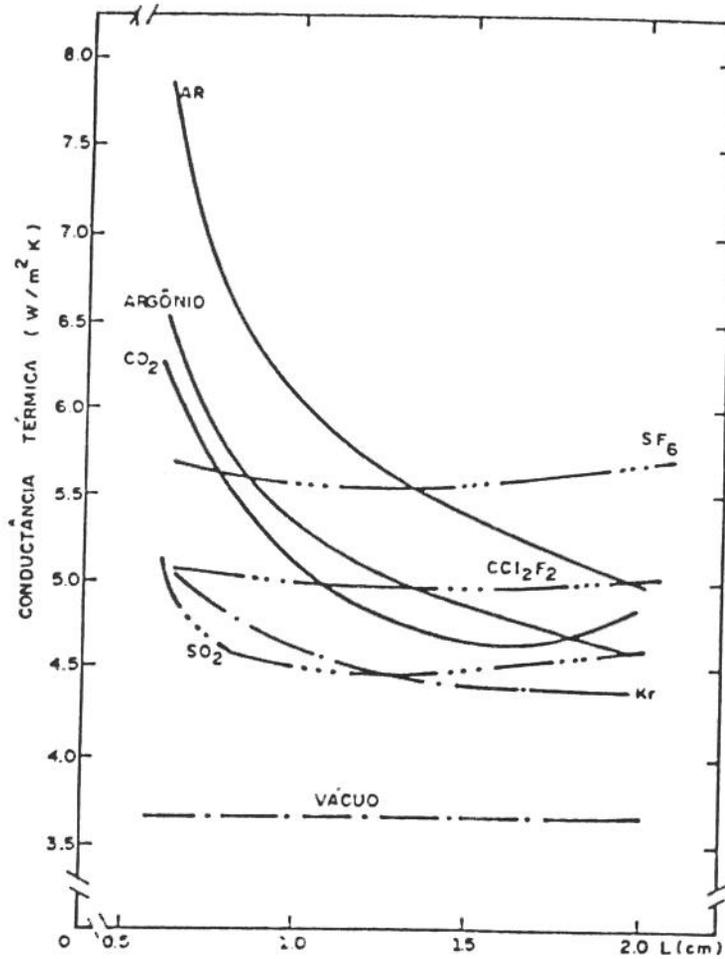


Figura 2.11: Condutância térmica em função do espaçamento para diversos gases

## **Capítulo 3**

### **Análise Experimental**

Esta seção inicia com a apresentação do material de mudança de fase que será utilizado nos testes, incluindo suas propriedades gerais e específicas.

Na segunda parte foram feitas investigações experimentais das propriedades óticas das amostras de vidro usadas no teste, na forma simples, em sanduíches com espaçamentos variados com ar, com água e com pcm. Também foram feitos testes com vários corantes. Estes testes foram feitos para avaliar a transmitância, refletância e absortância do conjunto em função da espessura do vidro, espaçamento do vidro tipo de enchimento, corantes (azul e verde).

#### **3.1 Escolha do Material de Mudança de Fase (pcm)**

O material de mudança de fase (pcm) a ser utilizado neste projeto deve ter algumas propriedades preferenciais como ser atóxico, não apresentar riscos à segurança (fogo, explosão, corrosão, etc.) além de outros fatores relacionados à estética do prédio. As propriedades desejadas são classificadas na seção posterior.

##### **3.1.1 Propriedades gerais do pcm**

Propriedades Térmicas:

- temperatura de mudança de fase conveniente
- calor latente de fusão alto

- boa transferência de calor

#### Propriedades Físicas:

- equilíbrio de fase favorável
- baixa pressão de vapor
- pequena mudança de volume
- alta densidade

#### Propriedades Químicas:

- estabilidade
- compatibilidade com os materiais de construção
- atóxico
- não inflamável

#### Fatores Econômicos:

- abundância
- disponibilidade
- boa relação custo/benefício.

A transferência de calor e os aspectos ligados ao projeto de sistemas de mudança de fase são muito mais complexos que os sistemas de calor sensível, porque enfrentam os seguintes problemas:

- não linearidade, resultante do movimento da interface sólido-líquido durante a mudança de fase
- faltam conhecimentos sobre o processo de transferência de calor na interface por causa da convecção natural no líquido

- a incerteza da resistência térmica entre a parede do recipiente e a mudança do material para a fase sólida
- a mudança de volume com a mudança de fase
- a presença e configuração de vazios no sólido também podem introduzir fenômenos complexos de convecção natural e radiação interna, particularmente a altas temperaturas

A característica essencial de sistemas submetidos a transferência de calor por mudança de fase sólido-líquido é que existe uma interface separando duas regiões de propriedades termofísicas diferentes e que a interface além de separar as duas fases onde a energia é absorvida ou liberada, se movimenta. Para resolver o problema é necessário determinar a maneira e a razão na qual a interface se movimenta com o tempo.

No presente trabalho foi escolhido o glicol como pcm. Na realidade serão preparados misturas que têm as propriedades térmicas desejadas para uso na janela.

### 3.1.2 Glicóis de polietileno (Óxido de Polietileno)

O glicol de polietileno tem alto calor de fusão por ter cristalinidade apreciável com átomos de carbono assimétricos na cadeia. O calor de fusão do glicol polietileno resulta da cristalização das cadeias de poliéster (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-O-). Os polímeros de cadeia curta têm baixo calor latente e baixa temperatura de fusão sendo que estes aumentam com o aumento da cadeia até atingir valores relativamente altos para cadeias compridas.

A tabela (3.1) mostra as propriedades térmicas de dois destes materiais. O glicol polietileno é um polímero estável devendo ser protegido da degradação hidrolítica e oxidativa. O aquecimento acima de 80 a 85°C pode causar decomposição. De modo geral são compatíveis com aço, vidro, alumínio e aço inox. Também são seguros e fáceis de manipular.

**Tabela 3.1:** Propriedades Termofísicas dos Etileno Glicóis (SI)

HO(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>8</sub> C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OH

Ponto de fusão	280 K
Calor de Fusão	99,6 kJ/kg K
Calor Específico do Líquido (25°C)	2,08 kJ/Kg
Densidade do Líquido (25°C)	1122 kg/m <sup>3</sup>

Viscosidade do Líquido (38°C)	0,055 kg/m s
Peso Molecular (médio)	400 g/mol

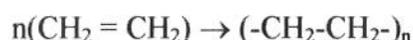
**Tabela 3.1 cont.:** Propriedades Termofísicas dos Etileno Glicóis (SI)

HO(C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>O)<sub>12</sub> C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OH

Ponto de fusão	296 K
Calor de Fusão	127,3 kJ/kg K
Calor Específico do Líquido (25°C)	2,05 kJ/Kg
Densidade do Líquido (25°C)	1123 kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade do Líquido (38°C)	0,081 kg/m s
Peso Molecular (médio)	600 g/mol

### 3.1.3 Polietileno de ligação cruzada

Polietileno é fabricado pela polimerização do gás etileno:



Consiste primariamente de cadeias de alcano hidrocarbonato saturado como no caso de parafina. Entretanto, as cadeias são mais compridas com valor (n) acima de 300. Também como no caso de parafina, o calor latente, é resultante das cadeias de cristalização (-CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>-). À medida que o comprimento da cadeia aumenta, o calor de fusão, a temperatura de fusão a cristalinidade e a densidade aumentam. A ligação cruzada serve para manter a configuração física de polímeros e reduzir a mobilidade associada com a fusão. Assim o polímero é estável na forma, isto é, mantém sua forma quando fundido. Por este motivo é chamado de transição sólido-sólido ou, mais precisamente, transição sólido-sólido amorfa. A tabela (3.2) mostra os dados disponíveis para o polietileno de ligação cruzada.

Os fabricantes desses produtos não fornecem a especificação do grau de armazenamento térmico. Compostos de pesos moleculares médios de 400, 600, 1000 e 1450 fundem a 7, 23, 34 e 38°C, respectivamente. Os polietilenos glicóis são polímeros inorgânicos estáveis se usados corretamente e protegidos de processos de degradação oxidativa e hidrolítica. A decomposição térmica se dá a temperaturas próximas de 80°C. São compatíveis com aço, vidro e alumínio.

**Tabela 3.2:** Propriedades Termofísicas do Polietileno Glicol de Ligação Cruzada

Ponto de fusão	402-407 K
Calor de Fusão	167-201 kJ/kg K
Calor Específico do Sólido (96°C)	2,6 kJ/Kg
Condutividade Térmica	
Líquido (150°C)	0,24 W/m K
Sólido (125°C)	0,25 W/m K
Densidade do Sólido	950-965 kg/m <sup>3</sup>
Peso Molecular (médio)	10-20 Kg/mol

Nesta pesquisa, glicóis de diferentes pesos moleculares são misturados de modo a formar um produto adequado para aplicação em janelas. Todas as propriedades físicas e termofísicas foram medidas nos laboratórios do Instituto de Física e laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp.

### 3.2 Avaliação experimental das propriedades óticas

A energia solar transmitida e refletida são fatores importantes no transporte de energia através de janelas, de modo que o conhecimento de parâmetros óticos através de algum método experimental ou qualquer outra forma se faz necessário. Muitos destes dados, tais como transmitância, refletância e absorptância entre outros, se encontram tabelados na literatura especializada para uma variedade grande de materiais (vidros e plásticos de diferentes composições, etc.), e podem servir para dar assistência a projetistas na seleção e especificação de materiais transparentes para uso na construção ou outras aplicações afins. Na falta de informação para algum material em particular é necessário recorrer a algum método experimental para determiná-los. Este procedimento é particularmente usual quando é preciso conhecer parâmetros óticos em sistemas compostos por duas ou mais camadas do mesmo material ou materiais diferentes.

É possível também determinar as propriedades óticas de sistemas de janelas mais complexos a partir do conhecimento das propriedades óticas dos seus componentes. De qualquer forma estes métodos estão limitados ao conhecimento prévio destas propriedades nos materiais constituintes do sistema.

A caracterização ótica de janelas é complicada, mesmo experimentalmente, e em particular se é desejado conhecer o performance para incidência oblíqua de radiação. De modo que não é possível determinar todos os parâmetros de interesse sem fazer uso de uma sofisticada instrumentação.

A norma americana ASTM-E424-71 indica dois métodos de medição adequados para determinar transmitância e refletância em materiais na forma de chapas, cujas dimensões são limitadas pelo aparelho de medida. Um destes métodos usa um espectrofotômetro com esfera integradora como instrumento de medida e é possível realizar tanto as medidas de transmitância quanto as de refletância. Já o segundo método é aplicável somente a medida de refletância, fazendo uso de um pirômetro dentro de um boxe e usando diretamente o sol como fonte de energia. Os espécimes deste último caso, devem ter uma área de  $0,61\text{m}^2$ .

Na determinação da transmitância e refletância das amostras que aqui estamos estudando adotamos o primeiro dos métodos descritos acima.

Os teste foram realizados com um espectrofotômetro Perkin-Elmer Lambda 9 na faixa de comprimento de onda de 300 a 2800 nm, cobrindo desta forma uma parte do ultravioleta, a região visível completa e uma parte do infravermelho próximo. Foram testados um conjunto de amostras simples e compostas para uma gama de espessuras e espaçamentos preenchidos com material de mudança de fase e ar. As amostras simples são formadas por apenas um painel de vidro de diferentes espessuras, enquanto que as amostras compostas são constituídas por dois painéis de vidro com espaçamento entre eles que pode ser preenchido com ar ou material de mudança de fase. Os painéis de vidro usados são comercialmente disponíveis no mercado como janelas convencionais.

Os dados de transmitância normal obtidos são referidos ao ar e os de refletância são referidos a um filme de óxido de magnésio padrão (MgO)

A energia solar transmitida ou refletida para cada uma das amostras estudadas é calculada para um espectro solar padrão AM2 normalizado para 100% de energia, obtido da norma americana ASTM[1973]

### 3.2.1 Avaliação da transmitância

Nesta parte foi utilizado o laboratório de ensino de óptica do Instituto de Física da Unicamp.

Foi projetado um dispositivo que se adapta ao espectrofotômetro e que está na figura (3.1). Este dispositivo permite testar um vidro simples ou vidro duplo com espaçamento variado que pode ser enchido com o material a ser testado. A figura (3.2) mostra os detalhes da câmara de enchimento.

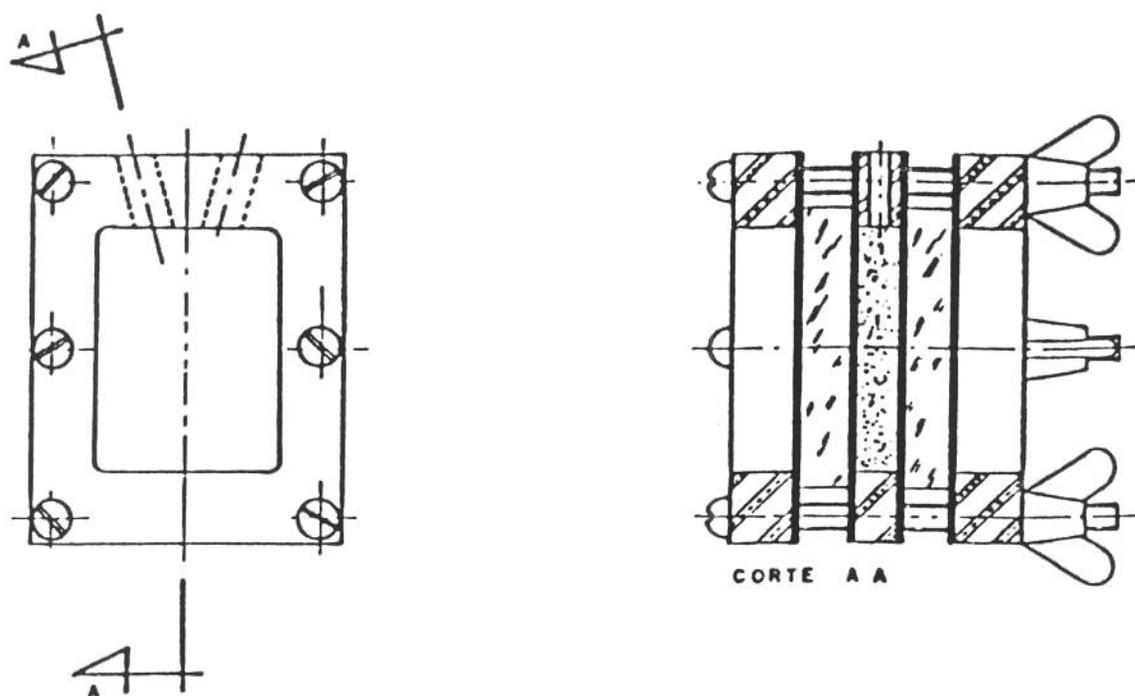
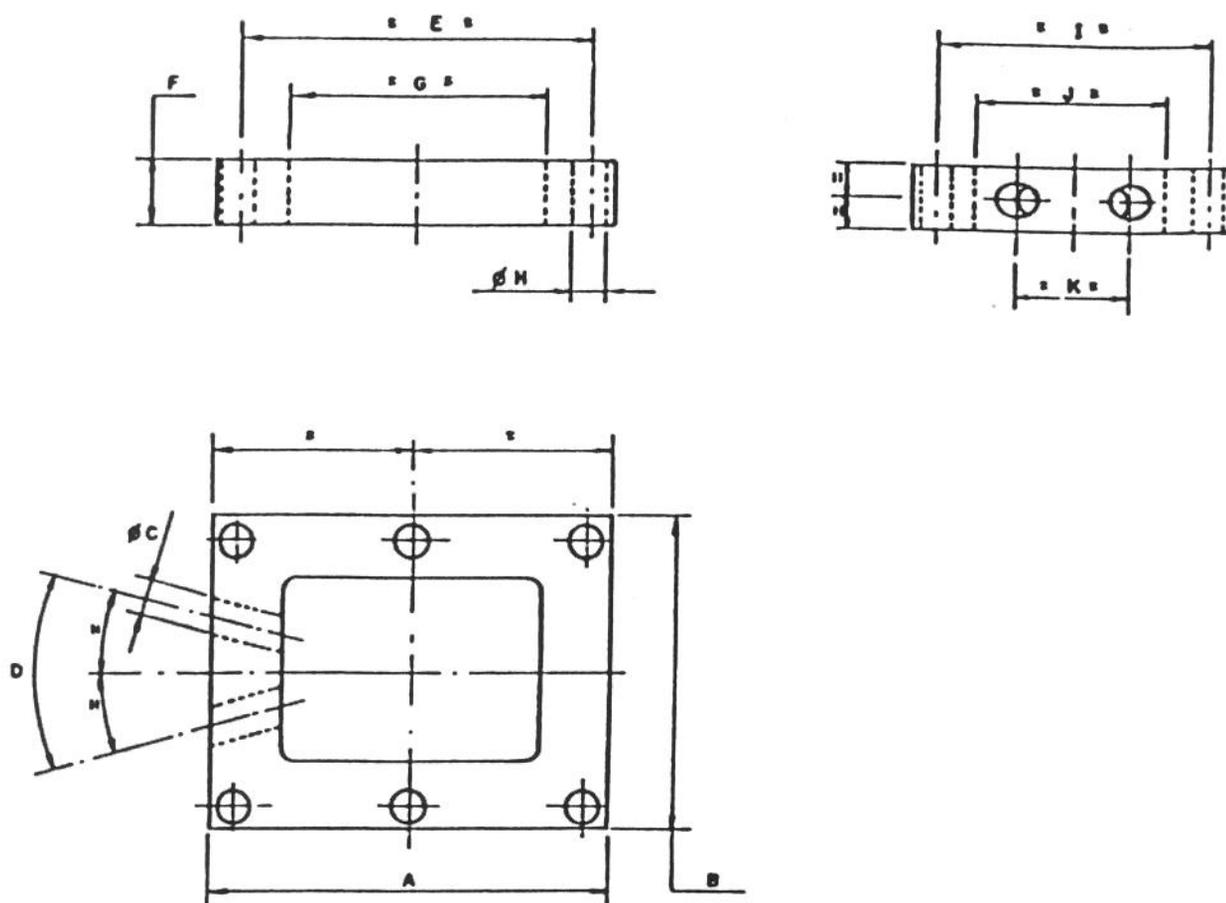
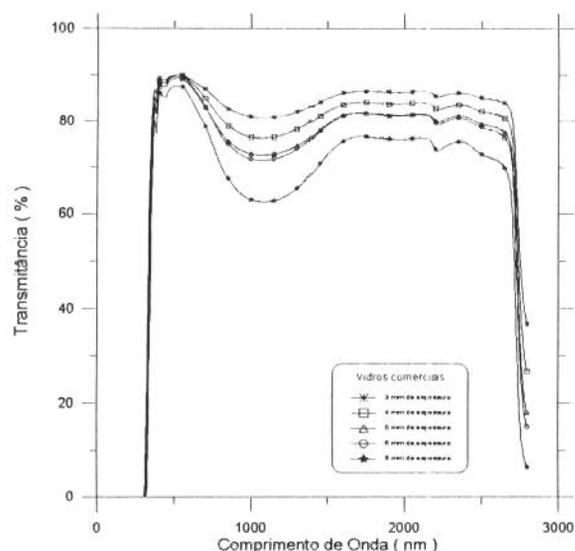


Figura 3.1: Porta Amostra

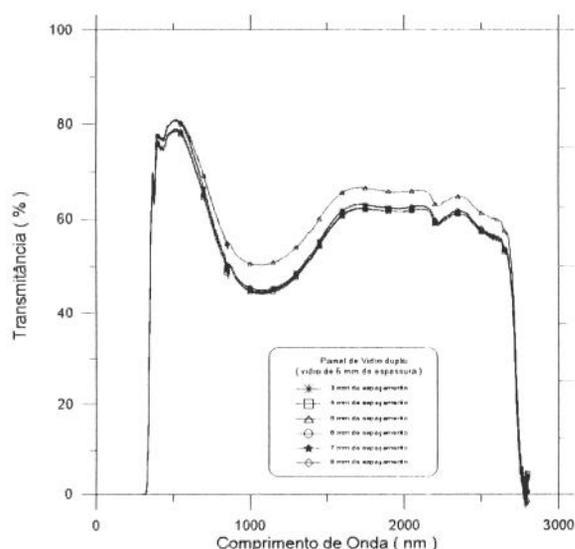


**Figura 3.2:** Câmara de Enchimento

A transmitância óptica de vários vidros comerciais de 3 mm a 8 mm de espessura foi determinada experimentalmente. O comportamento de todos é similar sendo apenas que o aumento da espessura provoca uma diminuição na transmitância, como mostrado na figura (3.3). Esta redução é relativamente pequena não se justificando assim, por motivos econômicos, o aumento da espessura como forma de reduzir a transmitância de radiação.



**Figura 3.3:** Transmissão de Vidros Comuns

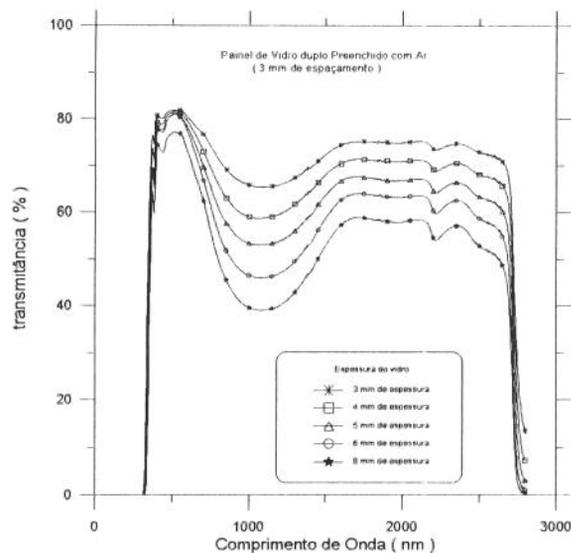


**Figura 3.4:** Transmissão para Painel de vidro duplo de 6mm de espessura e diferentes espaçamentos entre vidros

Para verificar os efeitos de espaçamento, foi montado um conjunto de vidro duplo de espessura 6 mm e com espaçamento variando entre 3 e 8 mm. Os resultados obtidos são mostrados na figura (3.4). Novamente o comportamento se mantém apresentando diferenças mínimas entre os casos de 3 e 4 mm de espaçamento como pode ser verificado na figura.

Um conjunto de experiências foi realizado para investigar o efeito da espessura do vidro sanduíche mas com espaçamento de 3 mm preenchido com ar. Os resultados obtidos mostram os efeitos da espessura do vidro de sanduíche com espaçamento fixo de 3 mm para cada caso analisado. A figura (3.5) mostra as curvas comparativas indicando um efeito redutor razoável

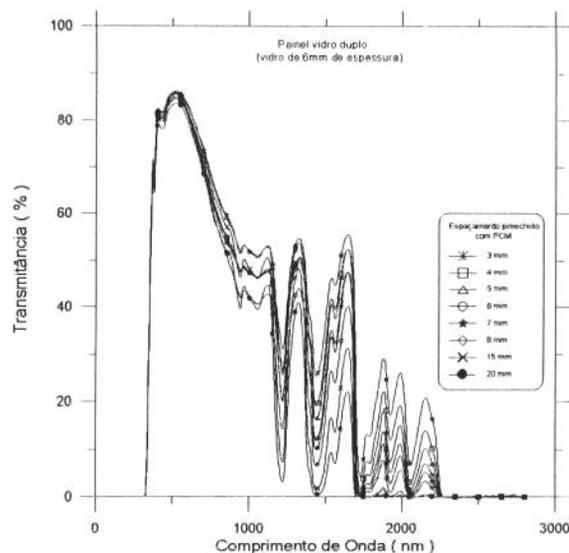
com o aumento da espessura de sanduíche, mas com valores absolutos de transmitância ainda altos na faixa do infravermelho.



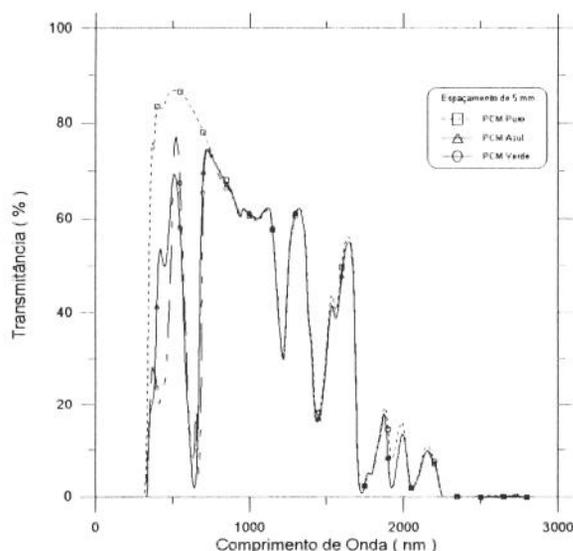
**Figura 3.5:** Transmitância para painel de vidro duplo com espaçamento entre vidros de 3mm preenchido com ar.

Após feita a análise de vidro e de sanduíche com o interior preenchido com ar, foram feitos uma série de testes experimentais para avaliar o comportamento de um pcm que está sendo testado no momento. Neste conjunto de experiências foram utilizados os mesmos vidros dos testes anteriores. Os espaçamentos, nos quais foram feitos os testes, variaram entre 3 mm e 20 mm. A figura (3.6) mostra o desempenho comparativo em função da espessura da camada de pcm. Como pode ser verificado a presença do pcm provoca uma sensível redução na transmitância da faixa infravermelha. Esta redução aumenta com o aumento da espessura eliminando de forma clara a radiação infravermelha e mantendo a faixa visível. Nas espessuras de 15 mm e 20 mm a redução é bastante acentuada.

Foi feito também um conjunto de testes para verificar o efeito da coloração do pcm utilizado. Vale a pena lembrar que o pcm usado até então nos testes era puro, sem corantes. Neste novos testes foram usados pcm puro, com coloração verde e azul de espessura 4 mm e com espaçamento de 5 mm. Os resultados da figura (3.7) mostram respectivamente os casos de pcm puro, com colorações verde e azul. As variações ocorridas praticamente só foram sentidas na faixa do visível, sem efeitos perceptíveis na faixa infravermelha.



**Figura 3.6:** Transmitância para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento preenchido com pcm.

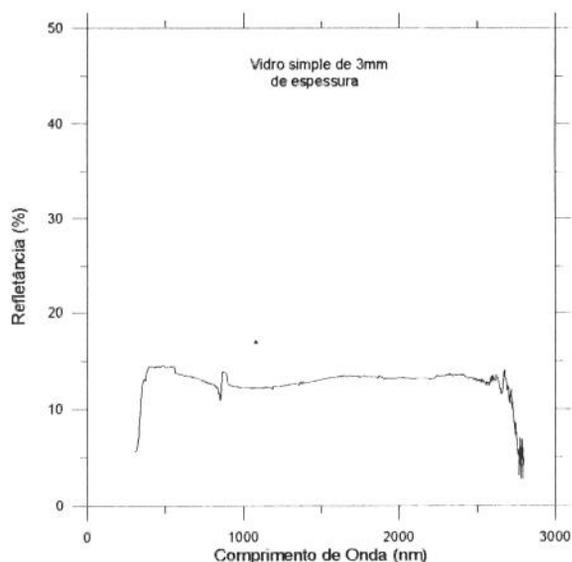


**Figura 3.7:** Transmitância para painel de vidro duplo de 4mm de espessura com espaçamento entre vidros de 5mm preenchido com pcm (azul, verde e sem corante)

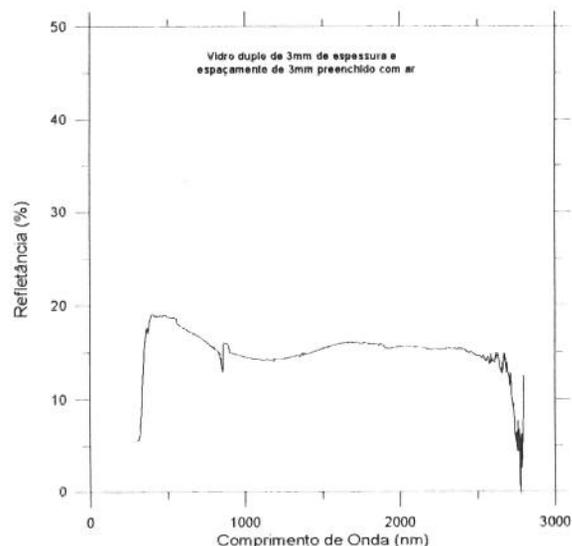
### 3.2.2. Avaliação da refletância

Para completar a identificação e caracterização óptica dos vidros utilizados foram feitos testes de refletância nestes testes foram utilizados as mesmas combinações de vidro utilizados nos testes de transmitância. A figura (3.8) mostra um resultado típico para o caso de vidro simples de espessura de 3 mm onde a refletância foi determinada como cerca de 12 á 13% na maior faixa de comprimento de onda. Figura (3.9) mostra o caso de vidro duplo preenchido com ar , onde pode verificar que a refletância é cerca de 16%. Á aumentar a espessura do

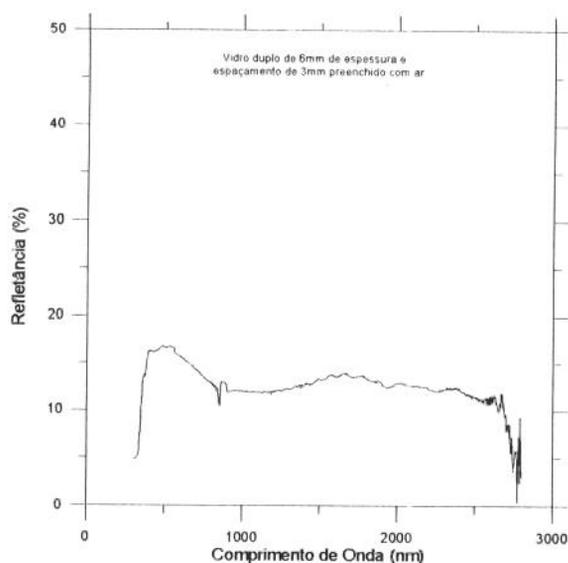
vidro duplo com preenchido com ar podemos notar redução na refletância para valores abaixo de 15% como esta na figura (3.10). A colocação de pcm na mesma configuração utilizada para obtenção da figura(3.10) resultou na diminuição da refletância abaixo de cerca de 7% como mostra figura (3.11).



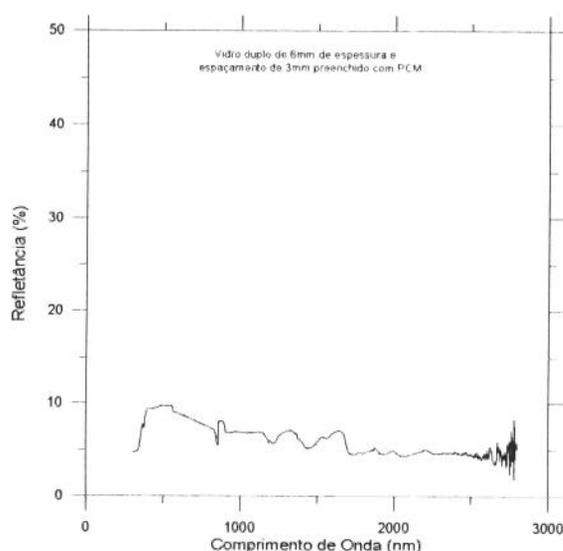
**Figura 3.8:** Refletância para vidro simples de 3mm de espessura



**Figura 3.9:** Refletância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm



**Figura 3.10:** Refletância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm



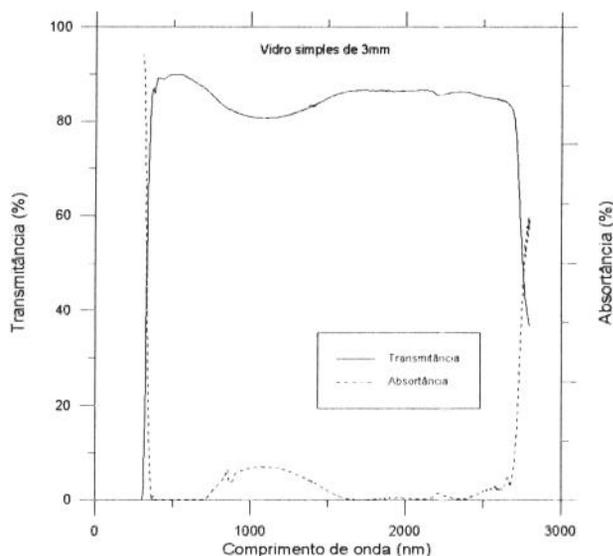
**Figura 3.11:** Refletância para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidro de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm

Resultados similares foram obtidos no resto dos casos avaliados confirmando que o vidro duplo com pcm provoca redução na refletância e portanto aumenta a absorptância como será apresentado á seguir.

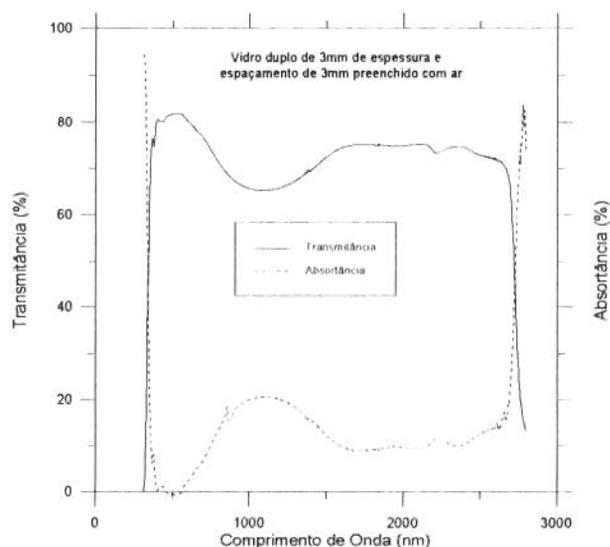
### 3.2.3. Avaliação da absorptância

As medidas experimentais da transmitância e da refletância foram utilizadas para determinar a absorptância para cada configuração estudada. As figuras (3.12) à (3.15) são

amostras destes resultados. Na figura(3.12) é apresentada a absorvância do vidro simples de 3 mm de espessura enquanto a figura (3.13) apresenta o resultado para vidro duplo de 3 mm de espessura e com espaçamento de também 3 mm preenchido com ar.



**Figura 3.12:** Absorvância para vidro simples de 3mm de espessura

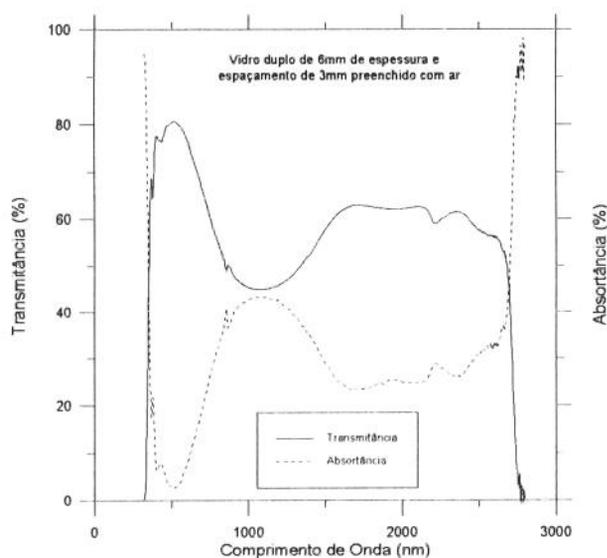


**Figura 3.13:** Absorvância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidros de espessura de 3mm e espaçamento de 3mm

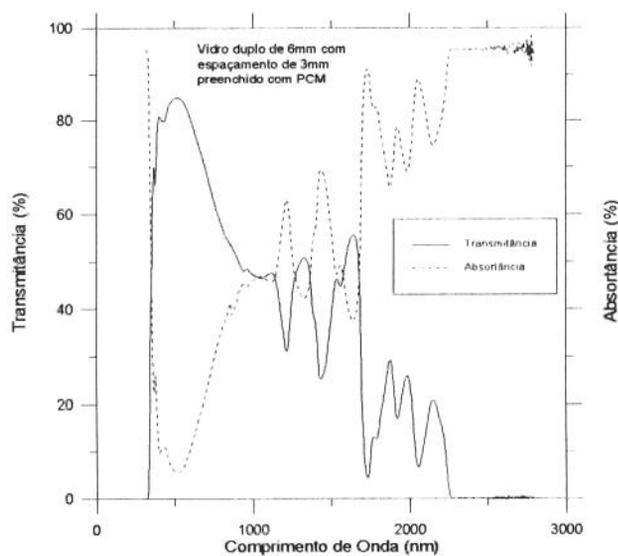
Pode verificar neste caso o aumento da absorvância do conjunto em relação ao caso de vidro simples. Figura(3.14) apresenta os resultados de vidro duplo de 6 mm de espessura e 3mm de espaçamento preenchido com ar. Pode verificar o aumento da absorvância do conjunto em comparação com o caso de vidro simples. A comparação com o caso do mesmo conjunto mas preenchido com pcm, figura(3.15) revela maior absorvância na faixa de

comprimento de onda de 750 á 1750 nm e valores menores fora desta faixa. Este efeito é causado pelo pcm.

Com estas medidas experimentais as configurações estudados ficam totalmente caracterizados opticamente permitindo assim a utilização destes dados no programa de simulação numérica.



**Figura 3.14:** Absortância para painel de vidro duplo preenchido com ar, vidros de espessura de 6mm e espaçamento de 3mm



**Figura 3.15:** Absortância para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidros de espessura de 6mm e espaçamento de 3mm

### 3.2.4 Avaliação da energia transmitida

Baseado nas medidas de transmitância foi feita uma avaliação da energia líquida transmitida a cada conjunto de vidro. Nesta, foram utilizados a radiação normal incidente e a medida da transmitância medida para determinar a energia incidente em cada faixa de comprimento de onda, usando a radiação numa atmosfera padrão a energia normal incidente é usada como referência. A energia incidente por faixa foi integrada para obter a porcentagem de energia incidente. As figuras (3.16) à (3.20) foram obtidas conforme esta metodologia e integrada na faixa de comprimento de onda utilizada. Como pode ser verificado o aumento da espessura de 3 mm até 8 mm provoca uma redução de cerca de  $132 \text{ W/m}^2$ . A figura (3.21) mostra a variação da porcentagem de energia normal transmitida em função da espessura.

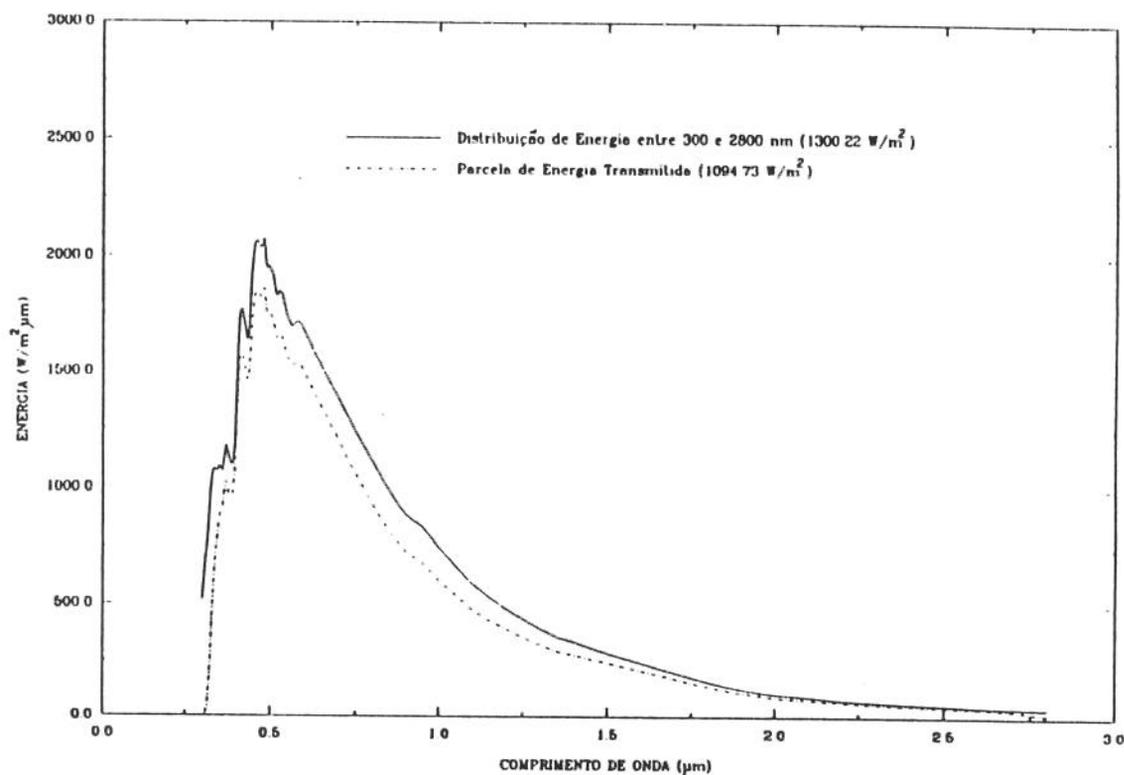
O mesmo tratamento foi feito para os casos de vidro duplo de várias espessuras mas com um espaçamento fixo de 3 mm preenchido com ar. Os resultados obtidos são mostrados nas figuras (3.22) à (3.26). A comparação da figura (3.16) com a figura (3.22) mostra uma redução maior na energia transmitida da ordem de  $151 \text{ W/m}^2$ . Um gráfico que representa estes efeitos de redução da energia transmitida em função da espessura total do conjunto, espessura de cada vidro mais um espaçamento de 3 mm entre eles, é mostrado na figura (3.27). A figura (3.28) indica uma redução boa no caso de conjunto duplo de 8 mm de espessura em relação ao mesmo vidro simples.

O efeito da variação do espaçamento entre os dois vidros de espessura fixa de 6 mm e com espaçamento variando de 3 mm até 8 mm preenchido com ar foi analisado de forma similar. Como pode ser verificado da figura (3.29) o aumento de espaçamento provoca redução na energia transmitida.

No caso de vidro duplo de espessura de 6 mm e com espaçamento variando de 3 mm até 20 mm preenchido com pcm. foram preparadas curvas de energia normal incidente para cada caso. Os resultados mostram uma redução boa e que diminui de forma sistemática com o aumento da camada de pcm. A figura (3.30) mostra um resumo destes resultados indicando de forma explícita o efeito da camada de pcm utilizado na redução da energia transmitida chegando ao valor de radiação transmitida de aproximadamente  $550 \text{ W/m}^2$ .

Para permitir melhor visualização dos efeitos causados pela variação das variáveis o resumo dos resultados é mostrado na figura (3.31).

Devemos salientar que a radiação incidente é normal à superfície do vidro e portanto os valores apresentados aqui devem ser considerados como valores máximos. No caso de situação real a radiação incidente é inclinada em relação à superfície e isto resulta em redução ainda maior da energia transmitida. Também é conveniente mencionar que este efeitos obtidos até o momento são devidos somente à variação da transmitância. Possíveis reflexões e os efeitos da absorptância devem também contribuir a maiores redução da energia transmitida.



**Figura 3.16:** Vidro comum, simples de 3 mm de espessura

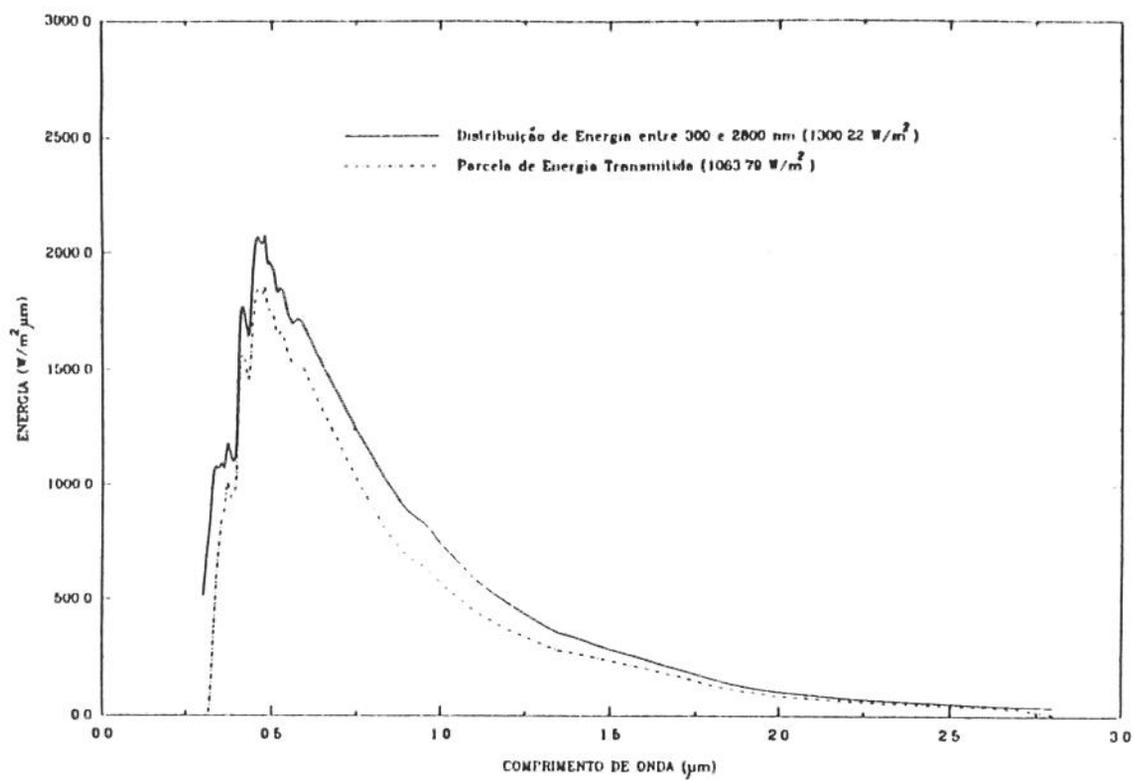


Figura 3.17: Vidro comum, simples de 4 mm de espessura

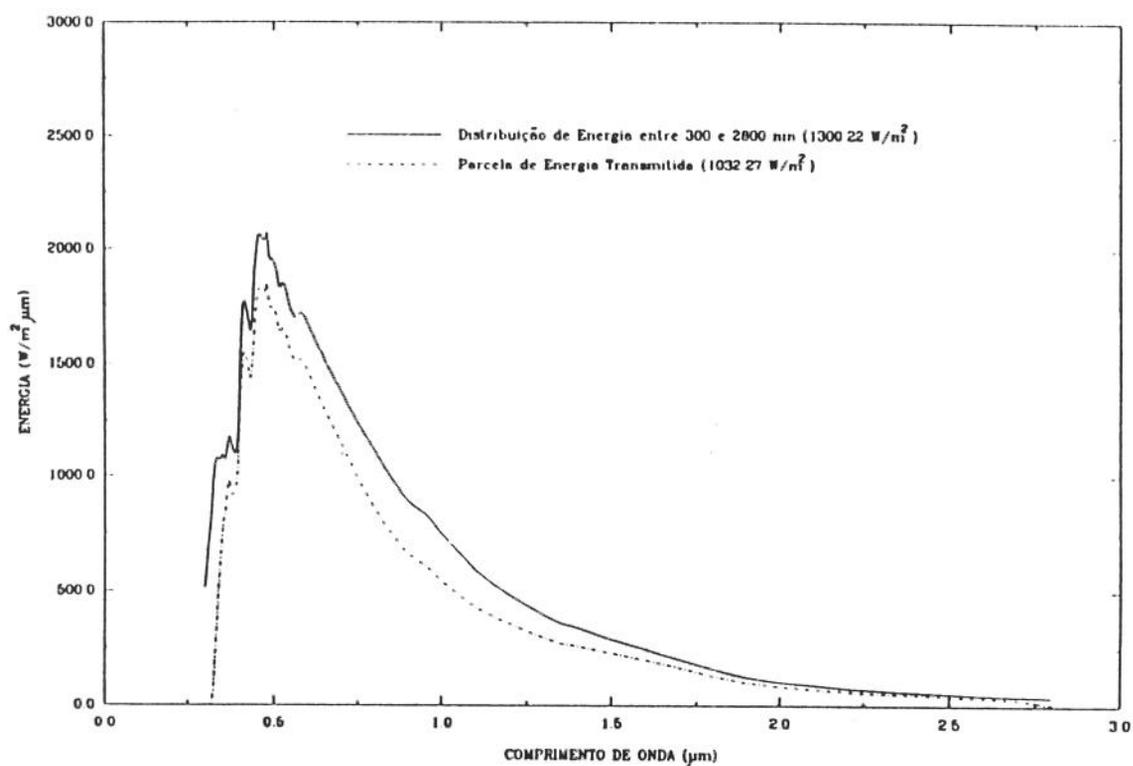


Figura 3.18: Vidro comum, simples de 5 mm de espessura

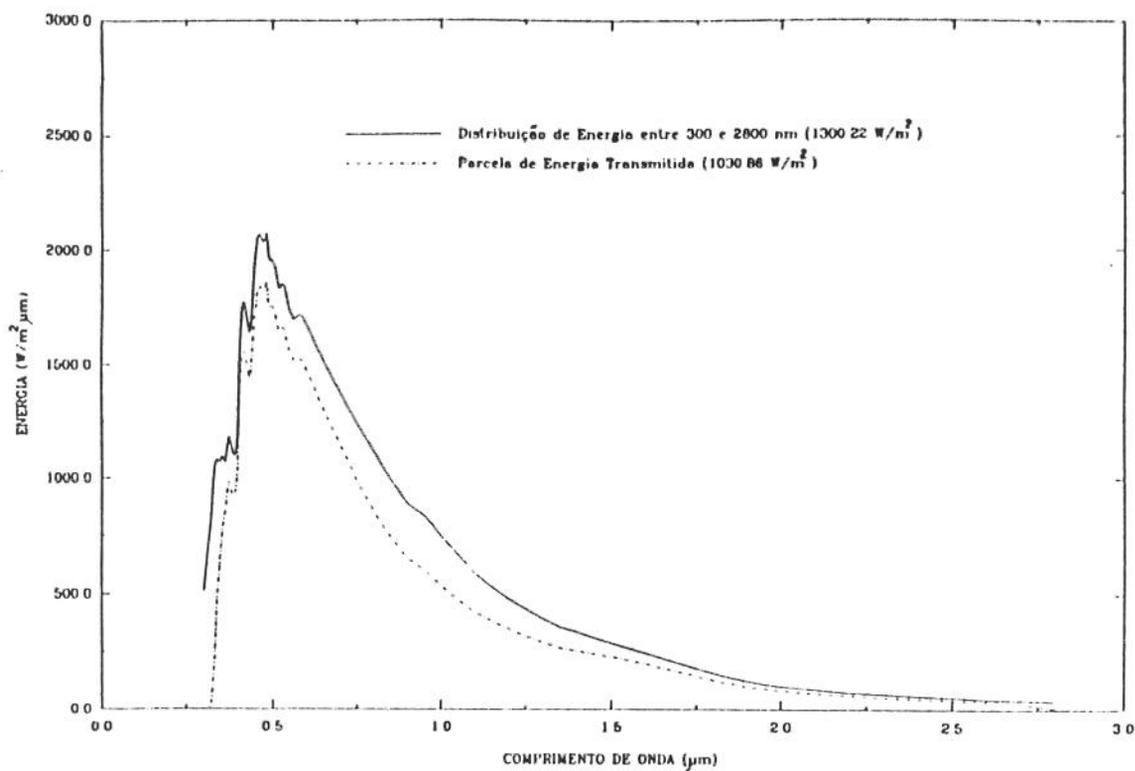


Figura 3.19: Vidro comum, simples de 6 mm de espessura

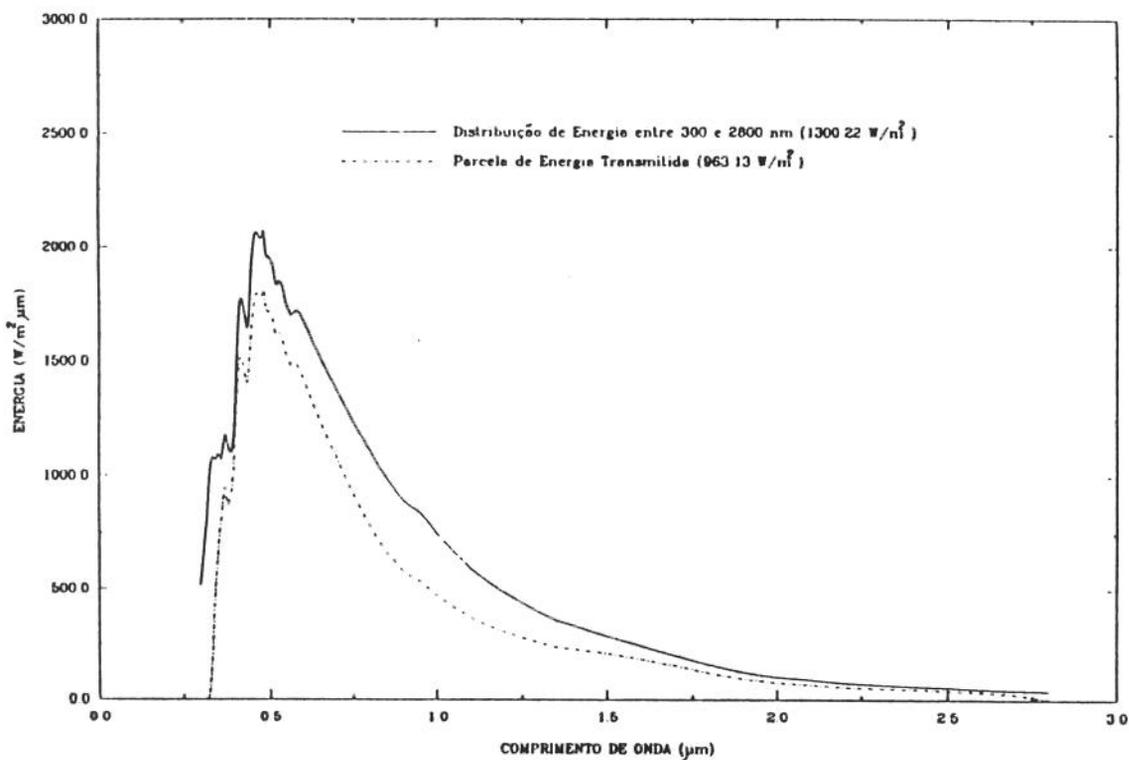


Figura 3.20: Vidro comum, simples de 8 mm de espessura

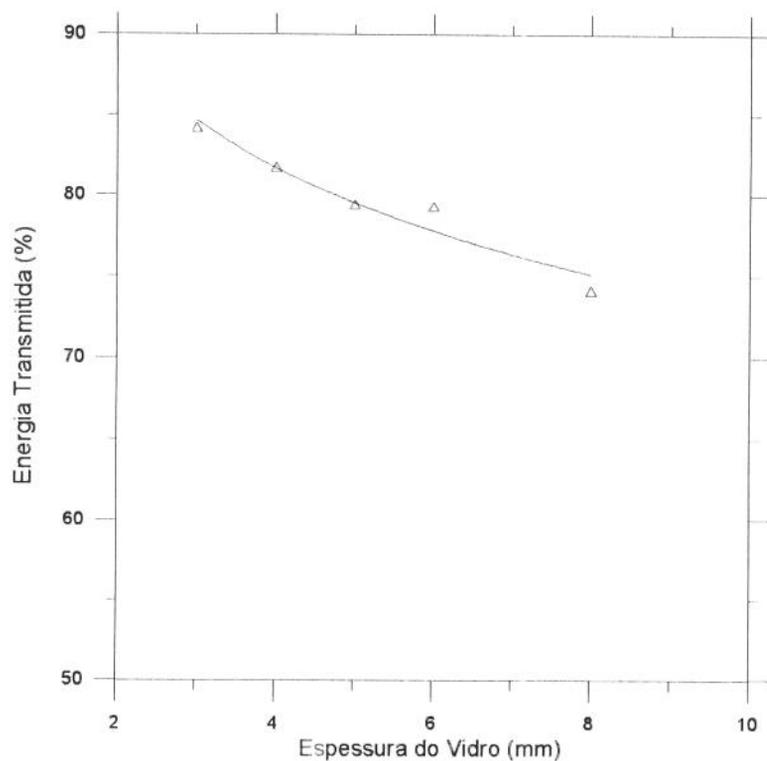


Figura 3.21: Porcentagem de energia transmitida para vidros comuns em função da espessura do vidro

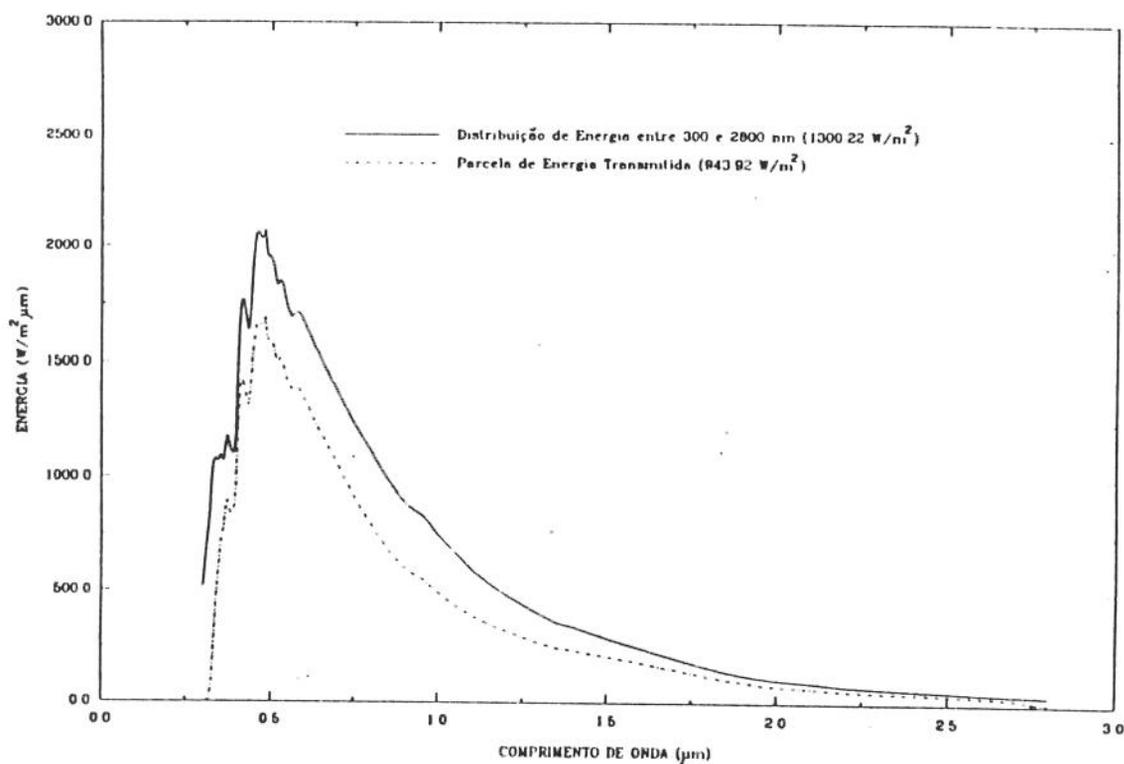


Figura 3.22: Sistema vidro duplo de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar

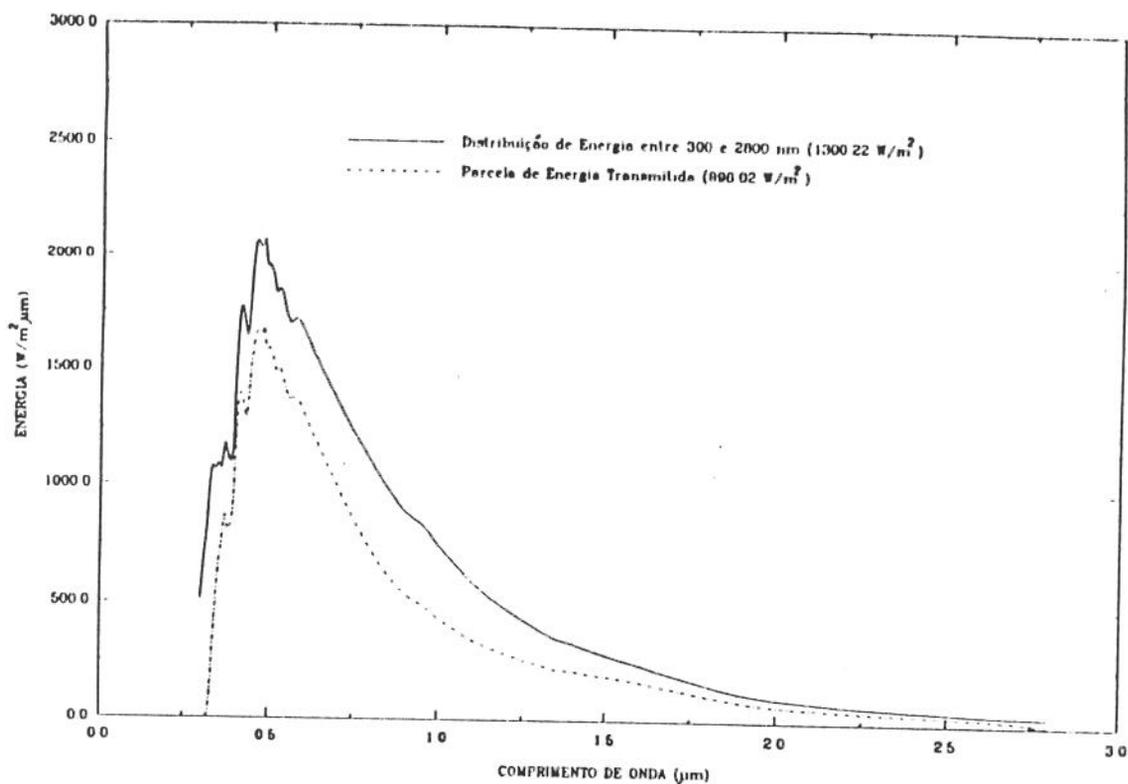


Figura 3.23: Sistema vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar

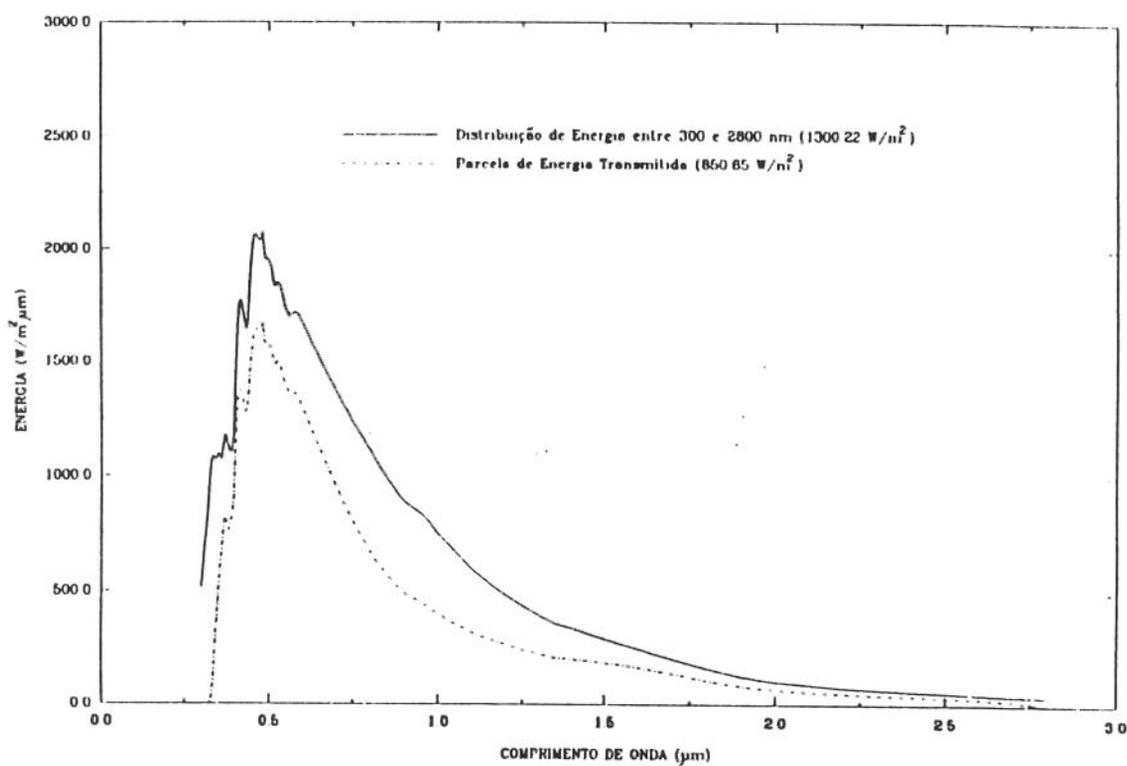


Figura 3.24: Sistema vidro duplo de 5mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar

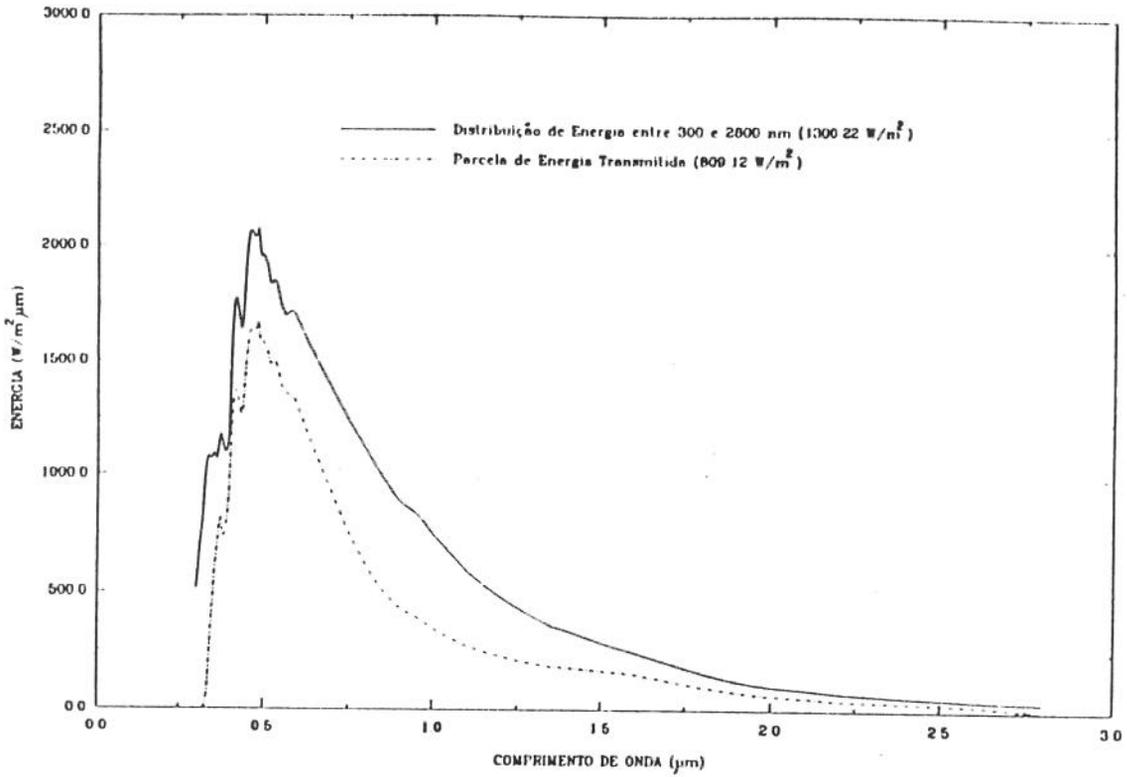


Figura 3.25: Sistema vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar

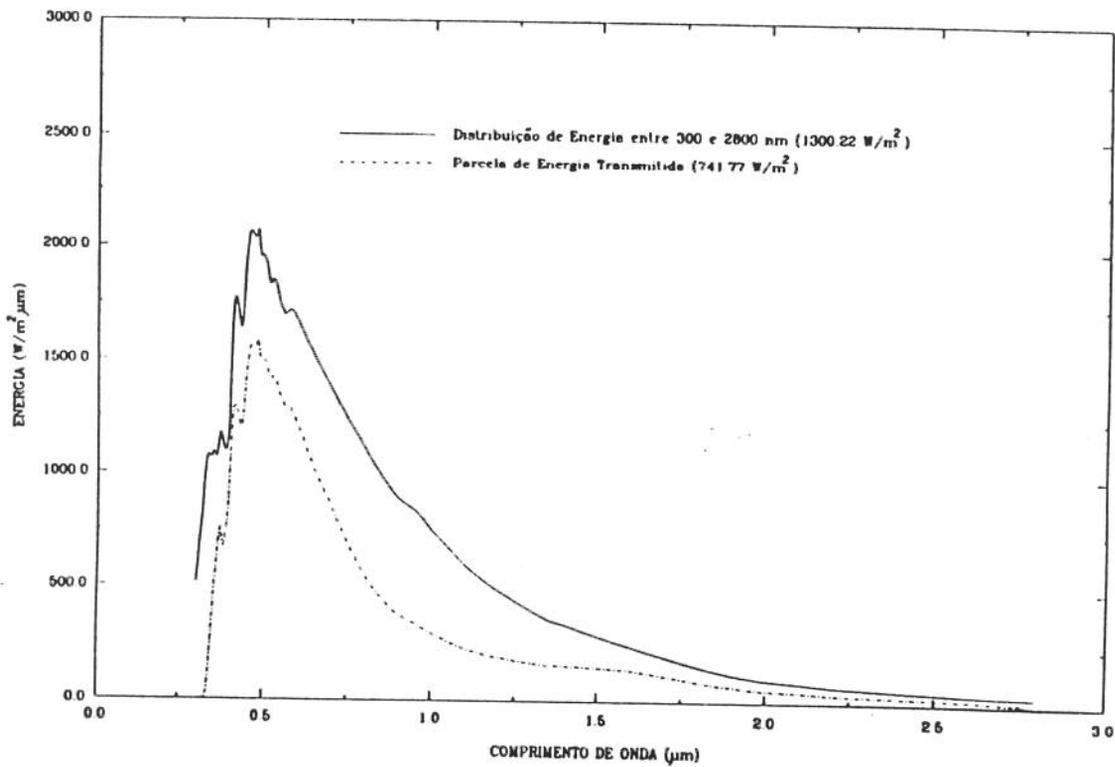


Figura 3.26: Sistema vidro duplo de 8mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar

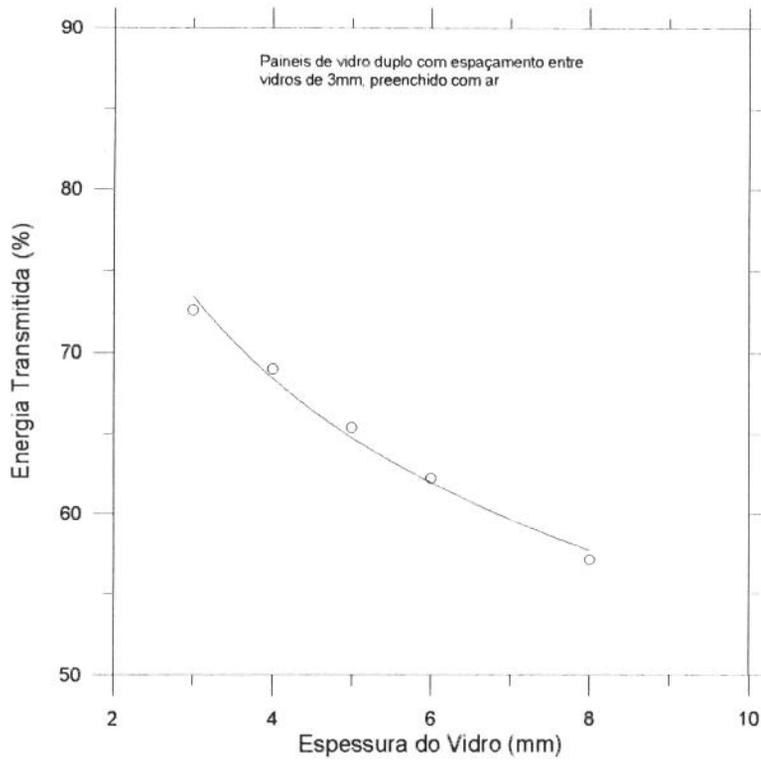


Figura 3.27 - Porcentagem de energia transmitida em função da espessura do vidro.

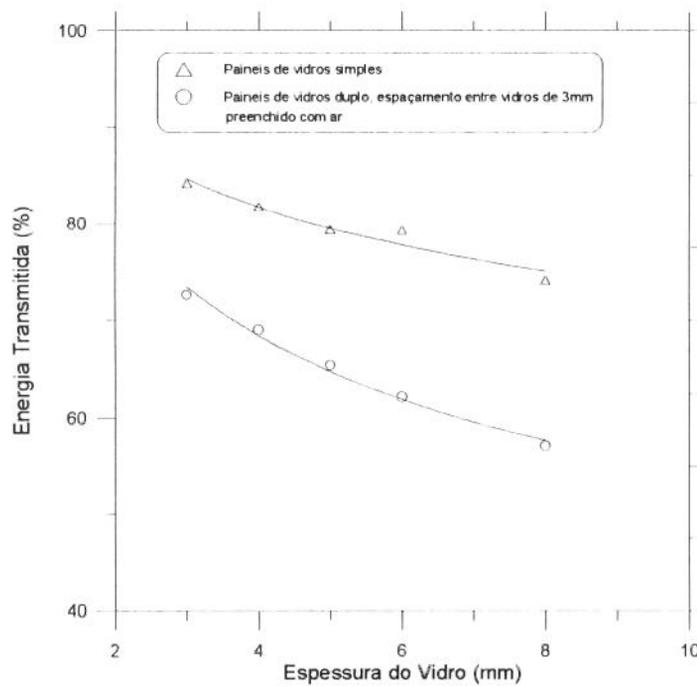
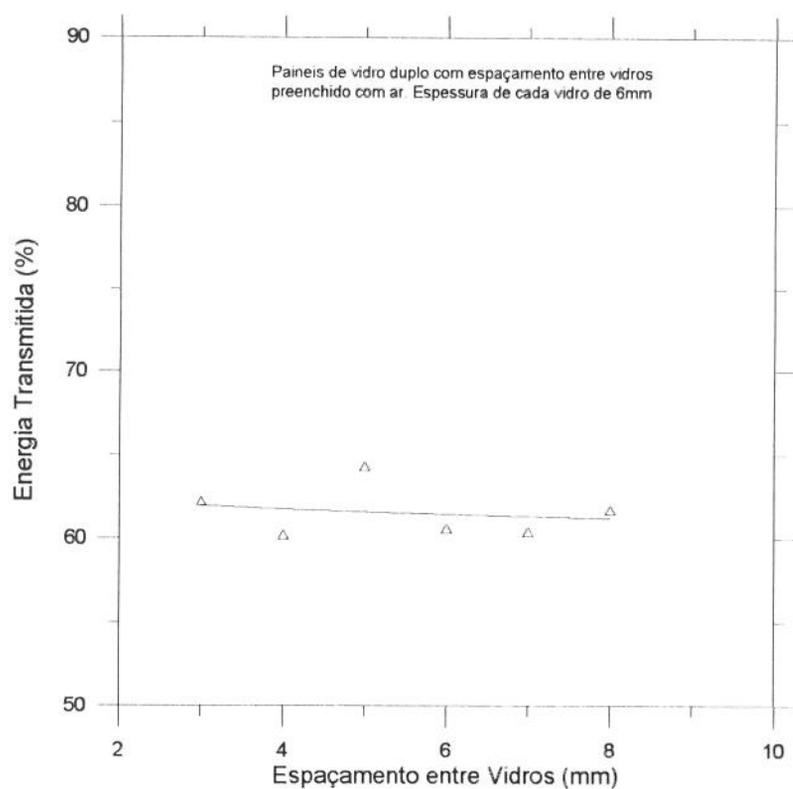
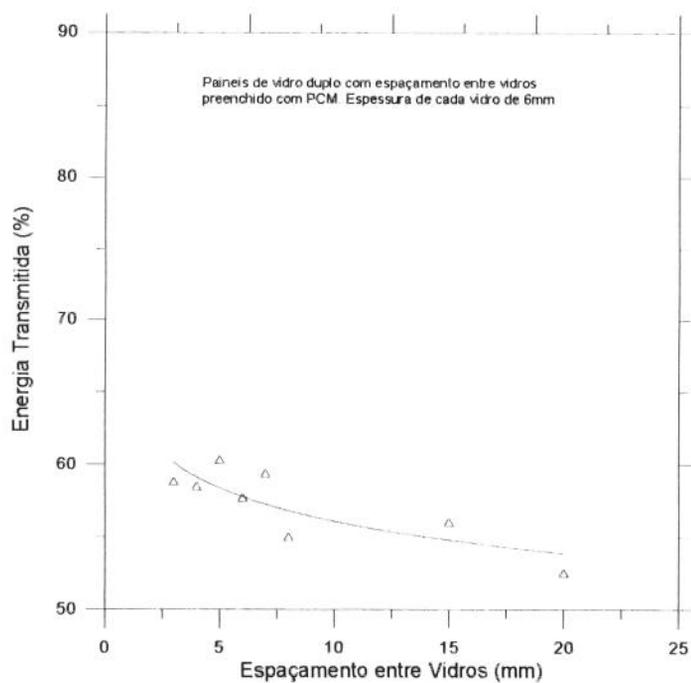


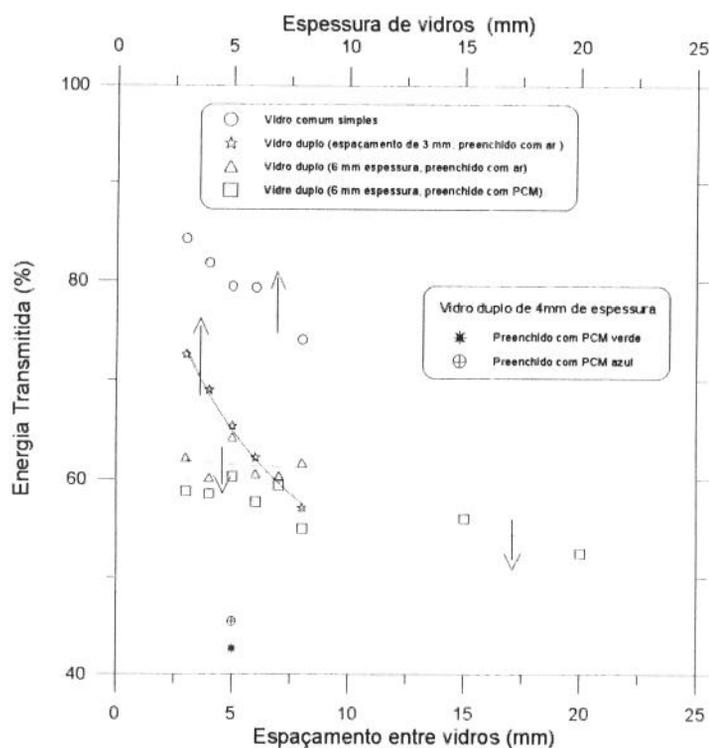
Figura 3.28: Comparação entre painéis de vidros simples e duplos



**Figura 3.29:** Porcentagem de energia transmitida para painéis de vidros em função do espaçamento entre vidros (preenchido com ar).



**Figura 3.30:** Porcentagem de energia transmitida para painéis de vidros em função do espaçamento entre vidros (preenchido com pcm).



**Figura 3.31:** Porcentagem de energia transmitida para vidros simples e painéis de vidro duplo em função da espessura de vidros ou espaçamento entre eles.

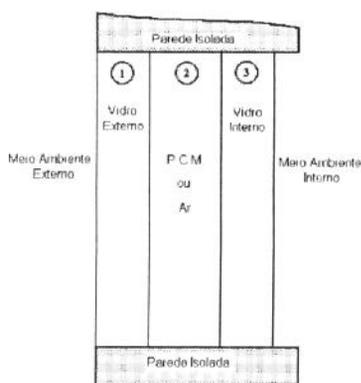
## Capítulo 4

### Formulação Matemática

Nesta seção são apresentadas as formulações matemáticas de dois modelos que serão tratados aqui.

1. Painel de vidro duplo preenchido com material de mudança de fase.
2. Painel de vidro duplo preenchido com ar.

A finalidade de desenvolver o segundo modelo é permitir obter comparações com o primeiro modelo. Painéis de vidro duplo preenchidos com ar ou outros gases são usados de forma comercial tanto no Brasil como no exterior. Este modelo representa uma ferramenta fundamental na avaliação da eficácia deste conceito, assim como também dos efeitos dos parâmetros geométricos do painel tais como espessura do vidro, espaçamento, tipo de gás e principalmente os efeitos das condições ambientais locais como a temperatura dos ambientes externo e interno, a radiação solar local, etc.

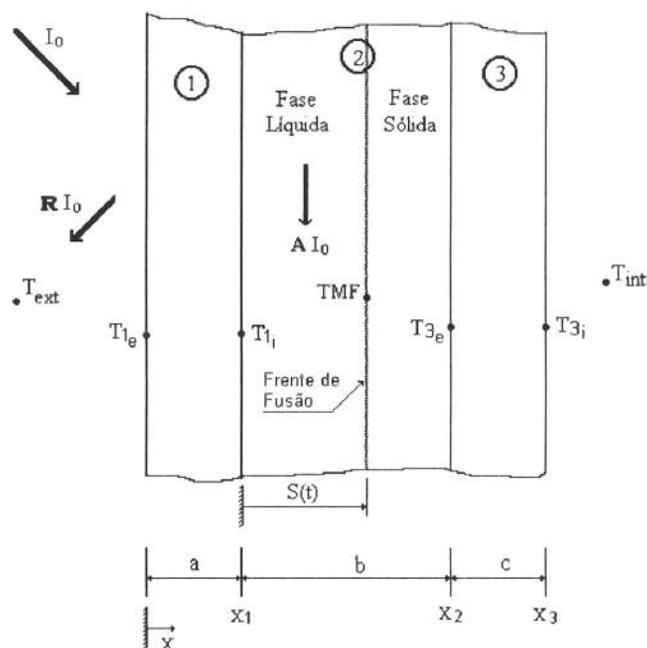


**Figura 4.1** Esquema da janela em estudo

#### 4.1 Painel de Vidro Duplo Preenchido com pcm

O problema consiste do encapsulamento de material de mudança de fase (pcm) entre dois painéis de vidro com a finalidade de dificultar o ganho de calor devido à irradiação solar.

O conceito é simples; escolhendo um material de mudança de fase com característica de mudar de fase a uma temperatura próxima da temperatura ambiente e colocando ele entre dois vidros, teremos uma espécie de armadilha para o calor vindo do ambiente externo. Isto funcionaria do seguinte modo, a medida que o vidro externo recebe a radiação solar este absorverá uma parte, refletirá uma outra parcela e deixara passar a parcela restante que representa aproximadamente 80% da energia incidente. A parcela transmitida atingirá deste modo o material de mudança de fase, que inicialmente se encontra na fase sólida, o qual absorverá uma parte desta radiação transmitida pelo primeiro vidro e refletira a restante. Neste caso não haverá transmissão de radiação através do pcm-sólido, pois a transmitância é nula como foi verificado experimentalmente.



**Figura 4.2** Diagrama esquemático de uma seção da janela com pcm, exposta a radiação solar

Na interface entre o vidro externo e o pcm haverá um ganho de calor devido à radiação absorvida por este material mais o calor transmitido pelo vidro externo por condução. Isto provocará o aumento da temperatura do pcm até alcançar a temperatura de mudança de fase. A partir desse momento todo o calor ganho através do vidro externo será utilizado na mudança

de fase do material encapsulado entre os dois vidros, de modo que a temperatura no interior da sala permanecerá constante e isto perdurará enquanto exista pcm-sólido. Quando todo o material tiver mudado de fase, passando de sólido para líquido, haverá aumento de temperatura na fase líquida e conseqüentemente também aumentará a temperatura no interior da sala. Quando o processo de fusão estiver ocorrendo, na região 2 teremos uma fase líquida e uma fase sólida (ver figura 4.2)

Os mecanismos de transferência de calor no sistema ocorrem da seguinte forma;

- Através do vidro externo teremos condução de calor e radiação transmitida diretamente até a interface vidro-pcm líquido.
- Uma parcela da radiação que atinge o pcm líquido é absorvida por este e uma outra parcela é transmitida até a interface Sólido-Líquido do pcm. Um fluxo de calor também é transmitido por condução através da fase líquida. Da radiação que atinge a interface Sólido-Líquido do pcm, uma parcela será absorvida e devido a que o pcm sólido é opaco nenhuma fração de radiação será transmitida até o vidro interno. Haverá fluxo de calor transmitido por condução na fase sólida do pcm.
- Por último, no vidro interno haverá transmissão de calor por condução.

Na região do pcm, a medida que o calor é armazenado ocorre a fusão do material e assim deste modo teremos o deslocamento da frente de fusão.

Neste modelo desprezaremos os efeitos convectivos na fase líquida do material de mudança de fase e adotaremos uma modelagem para a transferência de calor em regime transiente com equacionamento unidimensional. Adotaremos também que as propriedades físicas dos materiais envolvidos são constantes.

A equação diferencial governante é:

$$\rho_i C_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) - \frac{\partial I}{\partial x}$$

onde o termo da esquerda representa a variação de energia interna, o primeiro termo da direita é fluxo de calor por condução e o último termo da direita é um termo fonte que representa a absorção de radiação solar dentro do material.

A equação acima pode ser escrita como;

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \alpha_i \frac{\partial^2 T_i}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_i C_i} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (4.1)$$

onde:

$$\alpha_i = \frac{k_i}{\rho_i C_i}, \quad i = 1, 2, 3$$

representa as regiões vidro externo, material de mudança de fase

e vidro interno respectivamente

Analisando o problema para cada uma das três regiões consideradas, se tem o seguinte equacionamento com as suas respectivas condições de contorno.

### 1<sup>ª</sup> Região - Vidro Externo

Para a primeira região que consiste num painel de vidro teremos segundo a equação (4.1) que:

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_1 C_1} \frac{\partial I}{\partial x}, \quad 0 \leq x \leq x_1 \quad (4.2)$$

De acordo com as características do material teremos que uma parte da radiação solar será refletida para o meio ambiente, uma outra parte será absorvida no vidro, e por último uma terceira parcela será transmitida através do vidro e atingirá a camada de pcm.

A radiação incidente é composta de duas parcelas; uma parcela referente à radiação solar direta e difusa compreendida na faixa visível, é dizer radiação de comprimentos de ondas curtas na faixa de 400 a 700 nm, e uma segunda parcela que é devida à radiação do céu e superfícies circundantes, que por causa da baixa temperatura (abaixo de 100 °C) esta compreendida na faixa de comprimento de onda longa (radiação infravermelha)

Quase todos os tipos de vidros usados em edificação são completamente opacos à radiação de ondas longas como as emitidas por corpos com temperaturas abaixo de 100 °C.

Assim a radiação deste tipo é somente absorvida pelo vidro e refletida novamente para o ambiente de acordo com o coeficiente de emitância deste. Deste modo a superfície externa da janela troca calor por convecção e por radiação com o meio ambiente externo.

Fazendo um balanço de energia no vidro externo teremos.

Em  $x = 0$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial X} = -h_{C,ext} (T_{1e} - T_{ext}) - \varepsilon \sigma (T_{1e}^4 - T_R^4) + A_{x=0} I_o \quad (4.3)$$

onde:

$\varepsilon$  é a emissividade do vidro externo

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$  é chamada de constante de Stefan-Boltzmann

$T_R$  é a temperatura efetiva de um corpo negro das fontes radiantes externas

A temperatura media  $T_R$  dos objetos externos ao redor da janela é de difícil estimação. Segundo Threlkeld[1970], quando desde a janela de vidro é possível observar principalmente o chão e edificações próximas, é satisfatório assumir que  $T_R$  é igual à temperatura do ar externo ( $T_{ext}$ ). Esta mesma hipóteses é valida para o caso em que a janela só tem pela sua frente o céu durante a luz do dia. Entretanto durante a noite a efetiva temperatura do céu pode ser substancialmente menor que a temperatura do ar externo.

A equação (4.3) pode ser simplificada se levamos em consideração a hipóteses acima e se definimos um coeficiente radiativo  $h_{R,ext}$  em contrapartida ao coeficiente de convecção  $h_{C,ext}$ .

$$h_{R,ext} = \varepsilon \sigma (T_{1e}^2 + T_{ext}^2) (T_{1e} + T_{ext}) \quad (4.4)$$

Então temos que a condição de contorno em  $x = 0$  para a equação (4.2) resulta em;

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial X} = h_{G,ext} (T_{ext} - T_{1e}) + A_{x=0} I_o \quad (4.5)$$

onde,  $h_{G,ext}$  representa o coeficiente de película externo global e corresponde à soma dos coeficientes convectivo e radiativo  $h_{G,ext} = h_{C,ext} + h_{R,ext}$

Em  $x = x_1$

Aqui temos um fluxo de calor por condução no vidro externo mais um fluxo de calor por radiação que atravessa o vidro e é absorvido no pcm. Dependendo do estado do pcm teremos três condições de contorno diferentes:

(i) pcm na fase sólida, que é caracterizado quando se encontra abaixo da temperatura de mudança de fase (TMF)

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + A_{x=x_1} I_o(t) = -k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \quad (4.6)$$

(ii) pcm junto à superfície interna do vidro externo na temperatura de mudança de fase e por conseguinte a formação da primeira lâmina líquida de pcm.

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + A_{x=x_1} I_o(t) = \rho H \frac{dS(t)}{dt} - k_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \quad (4.7)$$

(iii) pcm junto à superfície de vidro externo na fase líquida

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + A_{x=x_1} I_o(t) = -k_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \quad (4.8)$$

## 2<sup>da</sup> Região - Material de Mudança de Fase

Nesta região ocorre a mudança de fase do material a medida que aumenta a temperatura devido ao ganho de calor e de esta forma a frente de mudança de fase se desloca desde  $x = x_1$  até  $x = x_2$  gradativamente, coexistindo no meio tempo as fases líquida e sólida.

Aplicando a equação (4.1) a esta região temos:

$$\frac{\partial T_J}{\partial t} = \alpha_J \frac{\partial^2 T_J}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_J C_J} \frac{\partial I}{\partial x}, \quad J = S, L \quad (4.9)$$

Valida tanto para a região sólida quanto para a região líquida de acordo com:

i)  $J = L$  para  $x_1 \leq x \leq x_1 + S(t)$ , que corresponde à região líquida

ii)  $J = S$  para  $x_1 + S(t) \leq x \leq x_2$ , que corresponde à região sólida

As condições de contornos são dadas como segue:

Em  $x = x_1$

$$-k_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \Big|_{x=x_1} + A_{x=x_1} I_o(t) = -k_L \frac{\partial T_L}{\partial x} \Big|_{x=x_1} \quad (4.10)$$

Na interface Líquido-Sólido  $x = x_1 + S(t)$

Fazendo um balanço térmico na frente de mudança de fase,

$$q_L - q_S + A_{x=x_1+S(t)} I_o(t) = \rho H \frac{dS(t)}{dt} \quad (4.11)$$

$$-k_L \frac{\partial T_L}{\partial x} + k_S \frac{\partial T_S}{\partial x} + A_{x=x_1+S(t)} I_o(t) = \rho H \frac{dS(t)}{dt}, \quad T_L = T_S = T_{MF} \quad (4.12)$$

Em  $x = x_2$

$$k_S \frac{\partial T_S}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \quad (4.13)$$

### 3<sup>ra</sup> Região - Vidro Interno

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_3 C_3} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (4.14)$$

Condições de contorno:

Em  $x = x_2$

A condição de contorno em  $x = x_2$  vai depender da localização da frente de mudança de fase:

(i)  $x_1 < S(t) < x_2$ , ainda existe fase sólida

$$k_S \frac{\partial T_S}{\partial x} \Big|_{x=x_2} = k_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=x_2} \quad (4.15)$$

(ii) Última camada de sólido

$$-k_L \left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=x_2} + A_{x=x_2} I_o(t) = \rho H \frac{dS(t)}{dt} - k_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_2}, \quad TL = T3 = TMF \quad (4.16)$$

iii) Material (pcm) totalmente líquido

$$k_L \left. \frac{\partial T_L}{\partial x} \right|_{x=x_2} + A_{x=x_2} I_o(t) = k_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_2} \quad (4.17)$$

Em  $x = x_3$

$$-k_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = h_{G,int} (T_{3i} - T_{int}) \quad (4.18)$$

onde o  $h_{G,int}$  representa o coeficiente convectivo global e corresponde à soma dos coeficientes convectivo e radiativo,  $h_{G,int} = h_{c,int} + h_{R,int}$  e  $h_{R,int} = \epsilon \sigma (T_3^2 + T_{int}^2)(T_3 + T_{int})$

#### 4.1.1 Adimensionalização das Equações

Parâmetros Adimensionais:

$$\theta_i = \frac{T_i - TMF}{TMF}, \quad i = 1, L, S, 3$$

Definindo um comprimento característico  $e = a+b+c$

$$X \equiv \frac{x}{e}$$

Tempo adimensional e frente de mudança de fase adimensional,

$$\tau \equiv \frac{\alpha_L t}{e^2}, \quad \delta(\tau) \equiv \frac{S(t)}{e}$$

Utilizando estas novas variáveis adimensionalizaremos o problema acima proposto.

Para a primeira região substituiremos as relações adimensionais e suas derivadas nas equações (4.2), (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8), obtendo como resultado a relação abaixo e suas respectivas condições de contorno.

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial \tau} = \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial X^2} - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\partial I}{\partial X} \quad (4.19)$$

Condições de contorno correspondentes;

Em  $X=0$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial X} \Big|_{X=0} = \text{Bi}_{\text{ext}} (\theta_{1e} - \theta_{\text{ext}}) - \frac{A_{X=0} I_o e}{k_1 \text{TMF}} \quad (4.19a)$$

Sendo que Biot é um número adimensional definido como:

$$\text{Bi}_{\text{ext}} = \frac{h_{G,\text{ext}} e}{k_1}$$

Em  $X=X_1$

i) pcm completamente sólido

$$-\frac{k_1}{k_s} \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \Big|_{X=X_1} + \frac{A_{X=X_1} I_o e}{k_s \text{TMF}} = -\frac{\partial \theta_s}{\partial X} \Big|_{X=X_1} \quad (4.19b)$$

ii) Início da mudança de fase (formação da primeira lâmina de líquido)

$$-\frac{k_1}{k_L} \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \Big|_{X=X_1} + \frac{A_{X=X_1} I_o e}{k_L \text{TMF}} = \frac{1}{\text{Ste}_M} \frac{d\delta(\tau)}{d\tau} - \frac{k_s}{k_L} \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \Big|_{X=X_1} \quad (4.19c)$$

onde o número de Stefan modificado é definido como:

$$\text{Ste}_M = \frac{C_p \text{TMF}}{L}$$

iii) Material de mudança de fase já na fase líquida:

$$-\frac{k_1}{k_L} \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \Big|_{X=X_1} + \frac{A_{X=X_1} I_o e}{k_L \text{TMF}} = -\frac{\partial \theta_L}{\partial X} \Big|_{X=X_1} \quad (4.19d)$$

Agora substituindo nas equações (4.9), (4.10), (4.12) e (4.13) temos as relações adimensionalizadas para a segunda região que corresponde ao material de mudança de fase. Substituindo primeiro na equação (4.9) temos:

$$\frac{\partial \theta_J}{\partial \tau} = \frac{\alpha_J}{\alpha_L} \frac{\partial^2 \theta_J}{\partial X^2} - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\partial I}{\partial X}, \quad J = S, L \quad (4.20)$$

onde a equação (4.20) é válida tanto para a região sólida quanto para a região líquida. A seguir, substituindo os adimensionais nas equações (4.10), (4.12) e (4.13) obtivemos as condições de contorno dadas abaixo:

Em  $X = X_1$

$$-\frac{k_1}{k_L} \frac{\partial \theta_1}{\partial X} \Big|_{X=X_1} + \frac{A_{X=X_1} I_o e}{k_L \text{TMF}} = -\frac{\partial \theta_L}{\partial X} \Big|_{X=X_1} \quad (4.20a)$$

Em  $X = A + \delta(\tau)$

$$-\frac{\partial \theta_L}{\partial X} \Big|_{X=X_1+\delta(\tau)} + \frac{k_s}{k_L} \frac{\partial \theta_s}{\partial X} \Big|_{X=X_1+\delta(\tau)} + \frac{A_{X=X_1+\delta(\tau)} I_o e}{k_L \text{TMF}} = \frac{1}{\text{Ste}_M} \frac{d\delta(\tau)}{d\tau} \quad (4.20b)$$

Em  $X = X_2$

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial X} \Big|_{X=X_2} = \frac{k_3}{k_s} \frac{\partial \theta_3}{\partial X} \Big|_{X=X_2} \quad (4.20c)$$

Por último, utilizando o mesmo procedimento usado nas regiões vidro externo e pcm., substituiremos os parâmetros adimensionais nas equações correspondentes ao vidro interno, equações (4.14), (4.15), (4.16), (4.17) e (4.18).

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial \tau} = \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\partial^2 \theta_3}{\partial X^2} - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\partial I}{\partial X} \quad (4.21)$$

sujeito as seguintes condições de contorno:

em  $X = X_2$ ; três condições dependendo da posição da frente de mudança de fase

i) ainda existe fase sólida, equação (4.15)

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial X} \Big|_{X=X_2} = \frac{k_3}{k_s} \frac{\partial \theta_3}{\partial X} \Big|_{X=X_2} \quad (4.21a)$$

ii) última lâmina de sólido, equação (4.16)

$$-\frac{\partial \theta_L}{\partial X} \Big|_{X=X_2} + \frac{A_{X=X_2} I_o e}{k_L \text{TMF}} = \frac{1}{\text{Ste}_M} \frac{d\delta(\tau)}{d\tau} - \frac{k_3}{k_L} \frac{\partial \theta_3}{\partial X} \Big|_{X=X_2} \quad (4.21b)$$

iii) pcm totalmente líquido, equação (4.17)

$$-\frac{\partial \theta_L}{\partial X} \Big|_{X=X_2} + \frac{A_{X=X_2} I_o e}{k_L \text{TMF}} = -\frac{k_3}{k_L} \frac{\partial \theta_3}{\partial X} \Big|_{X=X_2} \quad (4.21c)$$

Em  $X = X_3$ , equação (4.18)

$$\frac{\partial \theta_3}{\partial X} \Big|_{X=X_3} = \text{Bi}_{\text{int}} (\theta_{\text{int}} - \theta_{3i}) \quad (4.21d)$$

onde  $\text{Bi}_{\text{int}}$  é definido como:

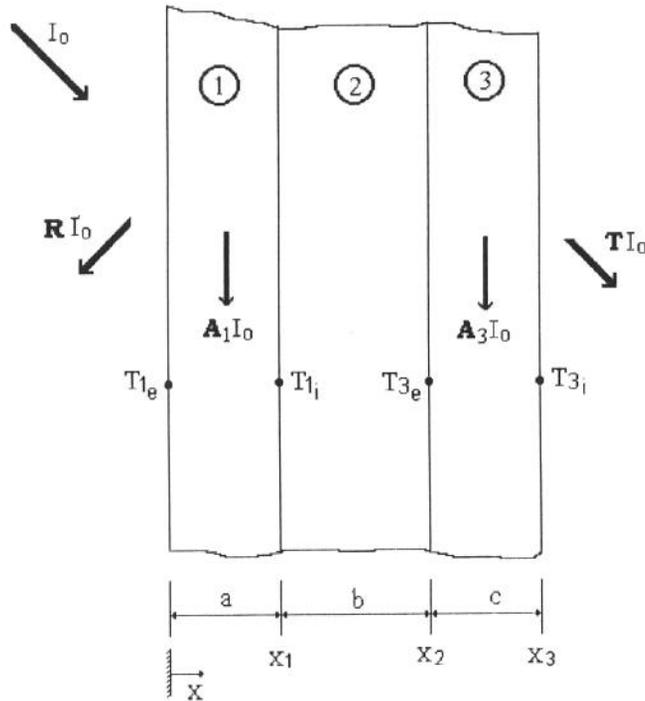
$$\text{Bi}_{\text{int}} = \frac{h_{G,\text{int}} e}{k_3}$$

## 4.2 Painel de Vidro Duplo Preenchido com Ar

Nesta análise será adotado que o ar que preenche o espaço entre os dois vidros é um gás não absorvente.

A superfície externa do vidro externo está exposta a radiação no espectro solar e a radiação de comprimento de onda longas provenientes do céu e dos arredores. A radiação de comprimento de onda curta atravessam o vidro externo e o vidro interno numa proporção que dependerá das propriedades óticas destes vidros, (transmitância, refletância e absortância). Já a radiação de comprimentos de ondas  $\lambda > 3 \mu\text{m}$  será barrada no primeiro vidro pois este se comporta como uma superfície opaca para comprimentos de ondas desta magnitude. Parte de esta radiação é transmitida indiretamente através da janela na forma de calor após ser absorvida na superfície do vidro externo numa quantidade que depende da absortância monocromática do vidro. Nesta mesma superfície haverá ainda uma troca de calor por convecção com o meio ambiente externo e emissão de radiação infravermelha para o ambiente externo.

Do balanço de energia haverá os fluxos de calor por condução através do vidro externo, condução-convecção através do ar e condução através do vidro interno. Devido ao aumento da temperatura no espaçamento preenchido com ar, haverá uma troca de calor por radiação entre os dois painéis de vidro. Finalmente teremos uma troca de calor por convecção entre a superfície do vidro interno e o meio ambiente interno.



**Figura 4.3** Diagrama esquemático de uma seção da janela preenchida com ar e exposta a radiação solar

Considerando a equação diferencial governante (4.1), válida também para cada camada do conjunto painel mostrado na figura (4.3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho C} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (4.22)$$

Analisando o problema por partes, temos que para o painel de vidro externo

$$\frac{\partial T_1}{\partial t} = \alpha_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_1 C_1} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (4.23)$$

Sujeito as seguintes condições de contorno,

i) em  $x = 0$ , fazendo os balanços de energia na superfície temos:

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = A_{x=0} I_0 - h_{C,ext} (T_{1e} - T_{ext}) - \epsilon \sigma (T_{1e}^4 - T_{ext}^4)$$

onde a primeira parcela no lado direito da equação é a radiação solar absorvida; a segunda parcela é o calor trocado por convecção entre a superfície externa do vidro e o meio ambiente externo e a terceira parcela é o fluxo de calor trocado por radiação com o meio ambiente externo .

$$h_{G,ext} = h_{C,ext} + \epsilon \sigma (T_{1e}^2 + T_{ext}^2) (T_{1e} + T_{ext})$$

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = A_{x=0} I_0 - h_{G,ext} (T_{1e} - T_{ext}) \quad (4.24)$$

ii) em  $x = x_1$

$$-k_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=x_1} = C_1 (T_{1i} - T_{3c}) \quad (4.25)$$

onde

$$C_1 = h_{C,gap} + h_{R,gap} \quad (4.26)$$

na região 2 ocorrerá transferência de calor por convecção, condução e radiação (infravermelho), além é claro as radiações de comprimento de onda curta que atravessa o primeiro vidro.

Para obter o coeficiente de película  $h_{C,gap}$  que envolve os efeitos convectivos/conductivos faremos uma análise considerando convecção natural no espaço de ar confinado entre as duas placas de vidros. (verticais). Assim segundo Holman[1983]

$$h = \frac{k_f}{b} Nu \quad (4.27)$$

onde  $k_f$  é a condutividade térmica do ar confinado, e  $b$  é o espaçamento entre as placas de vidro e  $Nu$  é o número de Nusselt no confinamento.

O número de Nusselt pode ser determinado a partir de uma correlação empírica para janelas verticais, Arasteh[1989]

$$Nu = [1 + (0,0303Ra^{0,402})^{11}]^{0,091} \quad \text{Para } Ra < 2 \times 10^5 \quad (4.28)$$

onde Ra é o número de Rayleigh e é o produto entre o número de Grashof (Gr) e o número de Prandtl (Pr). Gr é definido como:

$$Gr = \frac{g\beta\rho^2 b^3 \Delta T}{\mu^2} \quad (4.29)$$

onde:

g é a aceleração da gravidade ;

$\beta$  é o coeficiente de expansão térmica;

$\rho$  é a massa específica do fluido;

$\mu$  é a viscosidade dinâmica;

$\Delta T$  é a diferença de temperatura.

Para números de Grashof muito baixo existem pequenas correntes de convecção natural e o calor é transferido principalmente por condução através da camada de fluido (ar). Isto ocorre se os números de Grashof forem inferiores a 2000, Kreith [1977]

Considerando que  $(T_{i_1} - T_{3_e})$  seja da ordem de 20°C e o espaçamento b seja de 20 mm para calcular o número de Grashof adotaremos uma temperatura média  $T_m$  para avaliar as propriedades.

$$T_m = \frac{T_1 + T_3}{2} = \frac{47 + 27}{2} = 37^\circ\text{C}$$

$$Pr \rightarrow 0.706$$

$$\frac{g\beta\rho^2}{\mu^2} \rightarrow 1.12 \times 10^8 \text{ } 1/^\circ\text{C m}^3$$

$$Gr = 1,12 \times 10^8 \cdot b^3 \Delta T$$

$$Gr = 1,12 \times 10^8 \cdot (0,02)^3 \cdot 20$$

$$Gr = 179,2 \times 10^2 = 17.920$$

$$Ra = 12.651,52$$

$$Nu = 1,36$$

É possível calcular Nu através de outra relação empírica dada no Kreith[1977]

$$Nu = 0,18Gr^{1/4} \left( \frac{L}{b} \right)^{-1/9} \quad 2000 < Gr < 20.000 \quad (4.30)$$

onde  $\left( \frac{L}{b} \right)$  é a relação altura/espaçamento.

Considerando  $L = 1m$  e  $b = 20mm$ ,

$$Nu = 1,35$$

Mantendo a diferença de temperatura em  $20^{\circ}C$  e variando o espaçamento  $b$  temos:

$$Gr = 22,4 \times 10^8 \times b^3$$

b (mm)	Gr	Ra	Nu [4.28]	Nu [4.30]
3	60.48	42.699	1	-
6	483.8	341.6	1	-
8	1146.9	809.7	1	-
15	7560	5337.4	1.04	1.05
20	17920	12651.5	1.36	1.35

Da tabela acima podemos concluir que para uma faixa de espaçamento entre 0 e 15 mm, é possível assumir, sem cometer um grande erro, que os efeitos convectivos na região 2 podem ser desprezados.

Para obter  $h_R$  devemos resolver o problema de troca de calor por radiação entre duas placas paralelas. Uma expressão para a troca de calor nestas condições é dada em Duffie[1980].

$$Q_1 = \frac{\sigma(T_{1_i}^4 - T_{3_e}^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_{S1}} + \frac{1}{A_{S1} F_{13}} + \frac{1 - \epsilon_3}{\epsilon_3 A_{S3}}} \quad (4.31)$$

Para este caso em particular, onde as placas podem ser tratadas como duas placas paralelas infinitas temos que as áreas  $A_{S1}$  e  $A_{S3}$  são iguais e o fator de forma  $F_{13}$  é unitário.

Deste modo a equação (4.31) se reduz a:

$$\frac{Q_1}{A_s} = \frac{\sigma(T_{1_i}^4 - T_{3_e}^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1}$$

que pode ser rescrita como

$$\frac{Q_1}{A_s} = \frac{\sigma E(T_{1_i}^4 - T_{3_e}^4)}{(T_{1_i} - T_{3_e})} (T_{1_i} - T_{3_e})$$

de aqui,

$$h_R = \sigma E \frac{(T_{1_i}^4 - T_{3_e}^4)}{(T_{1_i} - T_{3_e})} \quad (4.32)$$

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_3} - 1} \quad (4.33)$$

$\epsilon_1$  e  $\epsilon_3$  são as emissividades das superfícies do vidro externo e interno respectivamente. Segundo valores tabelados no Kreith[1977] e Threlked[1970], a emissividade do vidro de janela na faixa de comprimento de onda largas e temperatura média entre pode ser assumido como sendo entre (0,9 e 0,95)

$\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann.

Fazendo-se uma análise similar no painel de vidro interno,

$$\frac{\partial T_3}{\partial t} = \alpha_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} - \frac{1}{\rho_3 C_3} \frac{\partial I}{\partial x} \quad (4.34)$$

Com as seguintes condições de contorno

i) em  $x = x_2$

$$-k_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_2} = A_{x=x_2} I_0 + C_1 (T_{1i} - T_{3e}) \quad (4.35)$$

onde  $C_1$  é definido como em (4.26)

ii) em  $x = x_3$

$$-k_3 \left. \frac{\partial T_3}{\partial x} \right|_{x=x_3} = h_{G,int} (T_{3i} - T_{int}) \quad (4.36)$$

onde o  $h_{G,int}$  é definido como a soma dos coeficientes convectivo e radiativo e pode ser escrito da seguinte forma

$$h_{G,int} = h_{C,int} + \epsilon \sigma (T_{3i}^2 + T_{int}^2) (T_{3i} + T_{int})$$

## Capítulo 5

### Modelo Numérico

Da formulação matemática são obtidas as equações que serão resolvidas por métodos numéricos através de diferenças finitas na forma explícita. A forma de representação explícita resulta num modo simples e direto de determinar as incógnitas de temperatura no intervalo de tempo  $(j+1)$  a partir do conhecimento da temperatura na etapa anterior  $(j)$ . O método explícito é simples do ponto de vista computacional, embora tenha como desvantagem a necessidade de evitar instabilidade, de modo que requer um grande tempo de computação quando comparado aos outros esquemas existentes.

Para o tratamento nas regiões Vidro Externo e Vidro Interno usaremos um modelo de malha fixa com espaçamento regular, já na região correspondente ao material de mudança de fase usaremos um modelo de malha móvel o qual resulta mais adequado ao problema.

A representação das derivadas por diferenças finitas é dado no apêndice A.

#### 5.1 Discretização das Equações para o Painel Vidro Duplo Preenchido com pcm.

A discretização das equações que governam o problema e suas respectivas condições de contorno são realizadas para cada uma das regiões do conjunto painel (Vidro Externo, Material de mudança de fase e Vidro Interno). No caso das regiões correspondentes aos Vidro Externo e Vidro Interno adotaremos uma malha fixa e no caso correspondente à região preenchido com pcm, adotaremos um esquema de malha móvel.

Todas as equações aqui discretizadas serão escritas segundo a notação mostrada na figura (5.1)

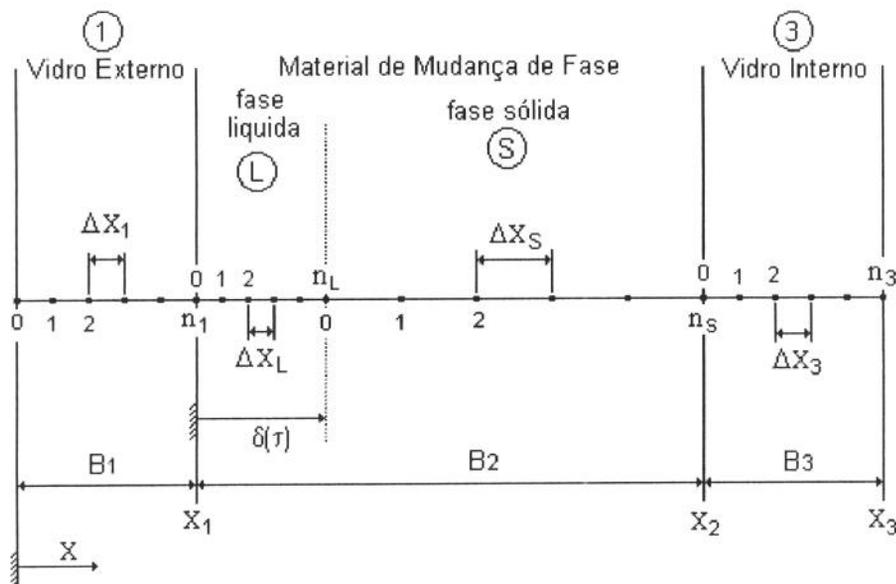


Figura 5.1.- Esquema do problema e notação para as equações de diferenças

### Vidro externo:

Consideraremos uma malha fixa, é dizer o domínio correspondente ao vidro externo é dividido em intervalos regulares  $\Delta X$ , assim, se o número de intervalos no domínio for  $n_1$  então

$$\Delta X_1 = \frac{B1}{n_1}$$

A equação para o cálculo dos pontos internos do domínio pode ser obtida diretamente do apêndice A, equação (A9)

$$\begin{aligned} \theta_1(i, j+1) = & \theta_1(i-1, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_1)^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \right] + \theta_1(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_1)^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \right] + \\ & + \theta_1(i+1, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_1)^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \right] + \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_1 k_1 \text{TMF}} A_1 I_0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

A discretização dos pontos extremos deve levar em consideração a condição de contorno correspondente como mostrado no apêndice A

O equacionamento em diferenças finitas para o primeiro ponto da malha (0,j) pode ser obtido substituindo a equação (A12) do apêndice A na condição de contorno dada pela equação (4.19a)

$$\begin{aligned} & \theta_1(1,j) \left[ \frac{1}{\Delta X} \right] + \theta_1(0,j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} - \frac{1}{\Delta X_1} \right] - \theta_1(0,j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} \right] + \frac{e}{2k_1 \text{TMF}} A_0 I_0 \\ & = \text{Bi}_{\text{ext}} [\theta_1(0,j) - \theta_{\text{ext}}(j)] - \frac{e}{k_1 \text{TMF}} A_0 I_0 \end{aligned}$$

A expressão acima pode ser escrita para  $\theta_1(0,j+1)$

$$\begin{aligned} \theta_1(0,j+1) &= \theta_1(0,j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_1)^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) (1 + \Delta X_1 \text{Bi}_{\text{ext}}) \right] + \theta_1(1,j) \left[ \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_1)^2} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \right] \\ &+ \theta_{\text{ext}}(j) \left[ \frac{2\Delta\tau}{\Delta X_1} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) \text{Bi}_{\text{ext}} \right] + \frac{3e\Delta\tau}{\Delta X_1 k_1 \text{TMF}} \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_L} \right) A_0 I_0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Para o último ponto da malha dado por  $(n_1,j)$  e que corresponde ao ponto da interface Vidro externo - pcm a discretização por diferenças finitas pode ser obtida substituindo as equações (A12) e (A13) nas equações (4.19b), (4.19c) ou (4.19d), dependendo do estado do material de mudança de fase, De modo que aqui teremos três casos diferentes,

(i) pcm no estado sólido

Substituindo (A12) e (A13) em (4.19b)

$$\begin{aligned} & \left( \frac{-k_1}{k_s} \right) \left\{ -\frac{1}{\Delta X} \theta_1(n_1-1,j) + \theta_1(n_1,j) \left[ \frac{1}{\Delta X_1} - \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} \right] + \theta_1(n_1,j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} \right] - \right. \\ & \left. \frac{e}{2k_1 \text{TMF}} A_{n1} I_0 \right\} + \frac{A_{n1} I_0 e}{k_s \text{TMF}} = - \left\{ \theta_s(1,j) \left[ \frac{1}{\Delta X_s} \right] + \theta_s(0,j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta\tau} - \frac{1}{\Delta X_s} \right] - \right. \\ & \left. \theta_s(0,j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta\tau} \right] + \frac{e}{2k_s \text{TMF}} A_{n1} I_0 \right\} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Podemos observar que em  $X=X_1$   $\theta_1(n_1,j) = \theta_s(0,j)$  e  $\theta_1(n_1,j+1) = \theta_s(0,j+1)$ , de modo que a equação (5.3) pode ser simplificada e rearranjada de forma conveniente de forma a obter uma expressão para o ponto da interface  $(n_1)$ .

$$\theta_1(n_1, j+1) = \theta_1(n_1 - 1, j) \left[ \frac{2k_1 \alpha_1 \alpha_s \Delta \tau}{\alpha_L W \Delta X_1} \right] + \theta_1(n_1, j) \left[ 1 - \frac{2(\Delta X_1 k_s + \Delta X_2 k_1) \alpha_1 \alpha_s \Delta \tau}{\Delta X_1 \Delta X_2 \alpha_L W} \right] + \quad (5.4)$$

$$\theta_s(1, j) \left[ \frac{2k_s \alpha_1 \alpha_s \Delta \tau}{\Delta X_s \alpha_L W} \right] + \frac{A_{n1} I_o e}{TMF} \left[ \frac{2\alpha_1 \alpha_s \Delta \tau}{\alpha_L W} \right]$$

onde

$$W \equiv k_1 \alpha_s \Delta X_1 + k_s \alpha_1 \Delta X_s$$

(ii) Início da Mudança de Fase

Substituindo agora (A12) e (A13) na condição de contorno correspondente ao início da mudança de fase, equação (4.19c), e considerando que a velocidade da frente de mudança de fase  $\partial \delta(\tau) / \partial \tau$  pode ser escrita em diferenças finitas como;

$$\frac{\partial \delta(\tau)}{\partial \tau} \equiv \frac{\delta(j+1) - \delta(j)}{\Delta \tau} \quad (5.5)$$

Após a substituição temos,

$$\left( -\frac{k_1}{k_L} \right) \left\{ -\frac{1}{\Delta X_1} \theta_1(n_1 - 1, j) + \theta_1(n_1, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_1} - \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta \tau} \right] + \theta_1(n_1, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta \tau} \right] - \frac{A_{n1} I_o e}{2k_1 TMF} \right\} + \frac{A_{n1} I_o e}{k_L TMF} = \frac{1}{Ste_M} \frac{[\delta(j+1) - \delta(j)]}{\Delta \tau} + \left( -\frac{k_s}{k_L} \right) \left\{ \frac{1}{\Delta X_s} \theta_s(1, j) + \theta_s(0, j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta \tau} - \frac{1}{\Delta X_s} \right] - \theta_s(0, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta \tau} \right] + \frac{A_{n1} I_o e}{2k_s TMF} \right\} \quad (5.6)$$

que pode ser simplificada considerando que na interface são válidas as igualdades seguintes;

$$\theta_1(n_1, j+1) = \theta_s(0, j+1) \quad \text{e} \quad \theta_1(n_1, j) = \theta_s(0, j)$$

Quando a mudança de fase se inicia podemos assumir que para uma pequena fração de tempo, todo o calor sensível disponível na interface vidro externo-pcm será igual que o calor latente transferido ao material de mudança de fase. Isto significa em outras palavras que a temperatura no ponto  $X=X1$  permanece inalterada durante esta pequena fração de tempo. Esta hipótese simplificadora nos permite encontrar uma expressão para calcular a posição inicial da

frente de mudança de fase assim que se inicia a fusão. Este procedimento é válido pois segundo Heitz [1970] geralmente é necessário obter uma realística posição da frente de mudança de fase inicial e não um valor preciso dela devido a que a fração de tempo em que isto ocorre é desprezível se comparado ao tempo total .

Seguindo este raciocínio é satisfatório dizer que:

$$\theta_1(n_1 + 1, j) \equiv \theta_1(n_1 + 1, j + 1) \equiv \theta_S(1, j) \equiv \theta_S(1, j + 1) \equiv \text{TMF}$$

Aplicando estas simplificações na equação (5.6)

$$\delta(j+1) = \delta(j) + \frac{\text{Ste}_M \Delta \tau k_L}{\Delta X_1 k_L} [\theta_1(n_1 - 1, j) - \theta_{\text{TMF}}] + \frac{\text{Ste}_M \Delta \tau k_S}{\Delta X_S k_L} [\theta_S(1, j) - \theta_{\text{TMF}}] + \frac{2\text{Ste}_M \Delta \tau e}{k_S \text{TMF}} A_{n1} I_o \quad (5.7)$$

Na hora de avaliar a formação da primeira lâmina de líquido, devemos estipular algum critério para definir o que será chamada de primeira lâmina. Um destes critérios pode ser a distancia de deslocamento da interface ( $\delta$ ). Consideremos por exemplo que o domínio do pcm encapsulado seja dividido num certo número de intervalos de modo que cada intervalo seja de um tamanho  $\Delta X_2$  suficientemente pequeno como para justificar a aplicação do método de diferenças finitas. Assim se definirmos um parâmetro  $\delta_R$  como sendo uma fração de  $\Delta X_2$  , este poderia constituir o nosso limite de deslocamento que poderá ser chamado de “primeira lâmina”. Deste modo enquanto  $\delta(j+1)$  seja menor ou igual a  $\delta_R$  podemos considerar que  $\theta_1(n_1 + 1, j) \equiv \theta_1(n_1 + 1, j + 1) \equiv \theta_S(1, j) \equiv \theta_S(1, j + 1) \equiv \theta_{\text{TMF}}$

(iii) pcm no Estado Líquido

Substituindo (A12) e (A13) em (4.19d) que corresponde ao caso em que todo o pcm se encontra na fase líquida, temos:

$$\begin{aligned}
& \left( -\frac{k_1}{k_L} \right) \left\{ -\frac{1}{\Delta X_1} \theta_1(n_1 - 1, j) + \theta_1(n_1, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_1} - \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} \right] + \theta_1(n_1, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_1} \frac{\Delta X_1}{2\Delta\tau} \right] \right. \\
& \left. - \frac{A_{n_1} I_o e}{2k_1 \text{TMF}} + \frac{A_{n_1} I_o e}{k_L \text{TMF}} = + \right. \\
& \left. - \left\{ \theta_L(1, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_L} \right] + \theta_L(0, j) \left[ \frac{\Delta X_L}{2\Delta\tau} - \frac{1}{\Delta X_L} \right] - \theta_L(0, j+1) \left[ \frac{\Delta X_L}{2\Delta\tau} \right] + \frac{A_{n_1} I_o e}{2k_L \text{TMF}} \right\} \right.
\end{aligned} \tag{5.8}$$

Em  $X=X_1$   $\theta_1(n_1 + 1, j) = \theta_L(1, j)$  e  $\theta_1(n_1 + 1, j+1) = \theta_L(1, j+1)$ , de forma que a equação (5.8) pode ser simplificada obtendo, após um rearranjo, a seguinte expressão para o ponto da interface ( $n_1$ ) quando o pcm se encontra na fase líquida;

$$\begin{aligned}
\theta_1(n_1, j+1) &= \theta_1(n_1 - 1, j) \left[ \frac{2k_1 \alpha_1 \Delta\tau}{Z \Delta X_1} \right] + \theta_1(n_1, j) \left[ 1 - \frac{2(\Delta X_1 k_L + \Delta X_L k_1) \alpha_1 \Delta\tau}{\Delta X_1 \Delta X_L Z} \right] + \\
\theta_L(1, j) &\left[ \frac{2k_L \alpha_1 \Delta\tau}{\Delta X_L Z} \right] + \frac{A_{n_1} I_o e}{\text{TMF}} \left[ \frac{2\alpha_1 \Delta\tau}{Z} \right]
\end{aligned} \tag{5.9}$$

onde

$$Z \equiv k_1 \alpha_L \Delta X_1 + k_L \alpha_1 \Delta X_L$$

### **Material de Mudança de Fase**

Nesta região pode ocorrer três situações;

- I. Material de mudança de fase completamente sólido
- II. As duas fases presentes e a frente de mudança de fase movendo-se
- III. Material de mudança de fase completamente líquido

Para os casos (I) e (III) o desenvolvimento é similar ao caso do vidro externo, considerando uma malha fixa onde o domínio  $[X_1 \leq X \leq X_2]$  é subdividido em intervalos regulares  $\Delta X_m$ , com  $m = S, L$ . Do apêndice A podemos obter diretamente as expressões para o cálculo das temperaturas nos pontos nodais internos nos casos I e III ;

$$\begin{aligned}\theta_m(i, j+1) &= \theta_m(i-1, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_m)^2} \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right] + \theta_m(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_m)^2} \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right] \\ \theta_m(i+1, j) &= \theta_m(i, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_m)^2} \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right] + \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_m k_m \text{TMF}} A_i I_o\end{aligned}\quad (5.10)$$

A equação (5.10) da origem a outras duas equações, segundo o pcm este totalmente sólido ou líquido

$$\begin{aligned}\theta_s(i, j+1) &= \theta_s(i-1, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_s)^2} \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right] + \theta_s(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_s)^2} \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right] \\ \theta_s(i+1, j) &= \theta_s(i, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_s)^2} \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right] + \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_s k_s \text{TMF}} A_i I_o\end{aligned}\quad (5.10a)$$

$$\begin{aligned}\theta_L(i, j+1) &= \theta_L(i-1, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_L)^2} \right] + \theta_L(i, j) \left[ 1 - \frac{2\Delta\tau}{(\Delta X_L)^2} \right] \\ \theta_L(i+1, j) &= \theta_L(i, j) \left[ \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_L)^2} \right] + \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_L k_L \text{TMF}} A_i I_o\end{aligned}\quad (5.10b)$$

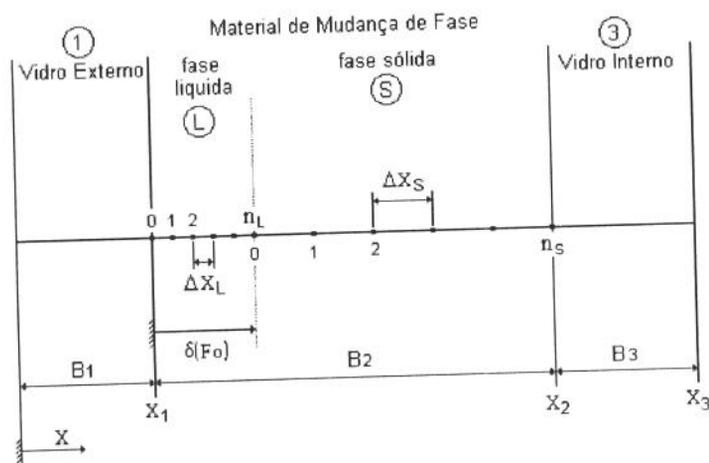
Para caso II, que corresponde à situação em que as duas fases estão presentes e existe uma frente de mudança de fase deslocando-se, a representação das derivadas da temperatura com relação à variável espacial por diferenças finitas, nos pontos nodais perto da interface sólido-líquido, requer uma consideração especial por causa do deslocamento da fronteira.

Murray e Landis[1959] propuseram um método de solução considerando um esquema por diferenças finitas com malha móvel, como mostrado na figura 5.2

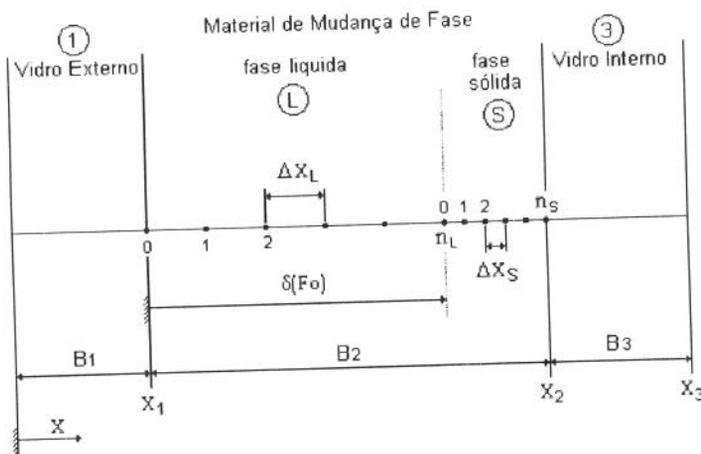
Se assumimos que a região líquida  $[X_1 \leq X \leq \delta]$  é dividida em  $n_l$  incrementos fixos e igualmente espaçados de tamanho  $\Delta X_L$ . A medida que a temperatura aumenta devido ao ganho de calor, a frente de mudança de fase se desloca para a direita, fazendo com que a malha se distenda e correspondentemente os pontos desta ficam mais afastados entre si como ilustrado na figura 5.2. Exatamente o efeito contrario ocorre com a região correspondente à fase sólida, cujo domínio foi dividido em  $n_s$  incrementos também fixos e de espaçamento regular com tamanho  $\Delta X_s$ .

Este método concentra a sua atenção na derivada substancial da temperatura com relação ao tempo em cada ponto interno. Sendo que a temperatura adimensional é função do tempo e do espaço  $\theta(X,t)$ , então

$$\frac{d\theta}{d\tau} = \frac{\partial\theta}{\partial X_i} \frac{dX}{d\tau} + \frac{\partial\theta}{\partial\tau_i} \quad (5.11)$$



(a) Situação no Instante  $\tau_1$



(b) Situação no Instante  $\tau_2$

**Figura 5.2** Esquema malha móvel

Um ponto qualquer da malha na fase líquida é dada por:

$$X(i) = X_1 + (i - n_1 - 1) \frac{\delta}{n_L} \quad (5.12)$$

onde:

$n_1$  = número de intervalos do vidro externo

$n_L$  = número de intervalos na fase líquida

derivando a equação (5.12) com relação ao tempo adimensional

$$\frac{dX(i)}{d\tau} = \frac{(i - n_1 - 1)}{n_L} \frac{d\delta}{d\tau} \quad (5.13)$$

dividindo a equação (5.13) pela equação (5.12), obtemos uma expressão que relaciona o avanço de cada ponto com a velocidade da frente de fusão.

$$\frac{dX(i)/d\tau}{X(i) - X_1} = \frac{d\delta/d\tau}{\delta} \quad (5.14)$$

Combinando a equação (5.11) com a equação da condução para a fase líquida, equação (4.20) com  $J=L$ , chegamos à seguinte expressão

$$\left. \frac{d\theta_L}{d\tau} \right|_i - \left. \frac{\partial\theta_L}{\partial X} \right|_i \frac{dX}{d\tau} = \left. \frac{\partial^2\theta_L}{\partial X^2} \right|_i - \frac{e}{k_L T_{MF}} \left. \frac{\partial l}{\partial X} \right|_i \quad (5.15)$$

Agora substituindo (5.14) em (5.15)

$$\left. \frac{d\theta_L}{d\tau} \right|_i = \frac{X(i) - X_1}{\delta} \left. \frac{\partial\theta_L}{\partial X} \right|_i \frac{d\delta}{d\tau} + \left. \frac{\partial^2\theta_L}{\partial X^2} \right|_i - \frac{e}{k_L T_{MF}} \left. \frac{\partial l}{\partial X} \right|_i \quad (5.16)$$

Da mesma forma, um ponto qualquer na malha na fase sólida pode ser escrito segundo a seguinte relação:

$$X(i) = (X_1 + \delta) + [i - (n_1 + n_L) - 1] \frac{(B_2 - \delta)}{n_s} \quad (5.17)$$

onde

$n_s$  = número de intervalos da fase sólida

Se arranjamos adequadamente a equação (5.17), temos

$$[X_2 - X(i)] = (B2 - \delta) \left[ 1 - \frac{[i - (1 + n_1 + n_L)]}{n_s} \right] \quad (5.18)$$

derivando com relação ao tempo adimensional

$$\frac{dX(i)}{d\tau} = \frac{d\delta}{d\tau} \left[ 1 - \frac{[i - (1 + n_1 + n_L)]}{n_s} \right] \quad (5.19)$$

Se dividimos a equação (5.19) pela equação (5.18) obteremos uma expressão que relaciona o avanço de cada ponto da malha na fase sólida com a velocidade da frente de fusão

$$\frac{dX(i)/d\tau}{[X_2 - X(i)]} = \frac{d\delta/d\tau}{(B2 - \delta)} \quad (5.20)$$

Combinando a equação (5.11) com a equação da condução de calor para a fase sólida, equação (4.20) com  $J=S$ .

$$\left. \frac{d\theta_s}{d\tau} \right|_i - \left. \frac{\partial\theta_s}{\partial X} \right|_i \frac{dX}{d\tau} = \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right) \left. \frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} \right|_i - \frac{e}{k_L T_{MF}} \left. \frac{\partial I}{\partial X} \right|_i \quad (5.21)$$

substituindo (5.20) em (5.21), temos

$$\left. \frac{d\theta_s}{d\tau} \right|_i = \frac{[X_2 - X(i)]}{(B2 - \delta)} \left. \frac{\partial\theta_s}{\partial X} \right|_i \frac{d\delta}{d\tau} + \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_L} \right) \left. \frac{\partial^2\theta_s}{\partial X^2} \right|_i - \frac{e}{k_L T_{MF}} \left. \frac{\partial I}{\partial X} \right|_i \quad (5.22)$$

As equações (A6), (A7), (A8) do apêndice A, que correspondem à representação por diferenças finitas das derivadas de primeira e segunda ordem da temperatura com relação à posição e ao tempo, e a equação (5.5), que por sua vez, corresponde à representação por diferenças finitas da velocidade da frente de fusão, podem ser substituídas na equação (5.16) de forma a encontrar uma expressão para o cálculo da temperatura nos pontos internos da fase líquida, quando as duas fases se encontram presentes.

$$\frac{\theta_L(i, j+1) - \theta_L(i, j)}{\Delta\tau} = \frac{[X(i) - X_i]}{\delta} \frac{[\theta_L(i+1, j) - \theta_L(i-1, j)]}{2\Delta X_L} \frac{[\delta(j+1) - \delta(j)]}{\Delta\tau} +$$

$$+ \frac{\theta_L(i+1, j) - 2\theta_L(i, j) + \theta_L(i-1, j)}{(\Delta X_L)^2} - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\Delta I}{\Delta X_L}$$
(5.23)

Considerando que a posição de cada ponto  $X(i)$  no domínio da fase líquida é dado pela expressão (5.12) e que o incremento é dado por

$$\Delta X_L = \frac{\delta}{n_L}$$

substituindo na equação (5.23) podemos obter a expressão requerida

$$\frac{\theta_L(i, j+1) - \theta_L(i, j)}{\Delta\tau} = \frac{[i - (1 + n_1)]}{2\delta\Delta\tau} [\theta_L(i+1, j) - \theta_L(i-1, j)] [\delta(j+1) - \delta(j)] +$$

$$+ \left(\frac{n_L}{\delta}\right)^2 [\theta_L(i+1, j) - 2\theta_L(i, j) + \theta_L(i-1, j)] - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\Delta I}{\Delta X_L}$$
(5.24)

A equação (5.24) pode ainda ser rescrita de forma a deixar  $\theta_L(i, j+1)$  em evidencia

$$\theta_L(i, j+1) = \theta_L(i-1, j) \Delta\tau \left[ \left(\frac{n_L}{\delta^j}\right)^2 - \frac{[i - (n_1 - 1)] (\delta^{j+1} - \delta^j)}{2\delta^j \Delta\tau} \right] +$$

$$\theta_L(i, j) \left[ 1 - 2\Delta\tau \left(\frac{n_L}{\delta^j}\right)^2 \right] + \theta_L(i+1, j) \Delta\tau \left[ \left(\frac{n_L}{\delta^j}\right)^2 + \frac{[i - (n_1 - 1)] (\delta^{j+1} - \delta^j)}{2\delta^j \Delta\tau} \right] -$$

$$\frac{e\Delta\tau}{\Delta X_L k_L \text{TMF}} A_i I_o$$
(5.25)

Aplicando o mesmo procedimento à região sólida, substituiremos as expressões em diferenças finitas das derivadas correspondentes, equações (A7), (A8), (A9) e (5.12) na equação (5.22), de forma a obter uma expressão para o cálculo das temperaturas nos pontos internos da região. Após a substituição obtemos:

$$\frac{\theta_s(i, j+1) - \theta_s(i, j)}{\Delta\tau} = \frac{[X_2 - X(i)] [\theta_s(i+1, j) - \theta_s(i-1, j)] [\delta(j+1) - \delta(j)]}{B2 - \delta} + \frac{2\Delta X_L}{\Delta\tau} + \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_L}\right) \frac{[\theta_s(i+1, j) - 2\theta_s(i, j) + \theta_s(i-1, j)]}{(\Delta X_s)^2} - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\Delta I}{\Delta X_s} \quad (5.26)$$

Para a fase sólida a posição de cada ponto do domínio é dado pela equação (5.17), a qual escrita convenientemente se transforma na expressão (5.18) que é mais adequada para substituir na expressão (5.26). Por outro lado a expressão para o incremento no domínio sólido é dado por

$$\Delta X_s = \frac{B2 - \delta}{n_s}$$

Assim após substituição, temos

$$\frac{\theta_s(i, j+1) - \theta_s(i, j)}{\Delta\tau} = \frac{[n_s + n_L + n_1 + 1 - i]}{2(B2 - \delta)\Delta\tau} [\theta_s(i+1, j) - \theta_s(i-1, j)] [\delta(j+1) - \delta(j)] + \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_L}\right) \left[\frac{n_s}{(B2 - \delta)}\right]^2 [\theta_s(i+1, j) - 2\theta_s(i, j) + \theta_s(i-1, j)] - \frac{e}{k_L \text{TMF}} \frac{\Delta I}{\Delta X_s}$$

Rescrevendo a expressão de forma a deixar a variável temperatura no tempo (j+1) em evidencia

$$\theta_s(i, j+1) = \theta_s(i-1, j) \Delta\tau \left[ \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_L}\right) \left(\frac{n_s}{B2 - \delta^j}\right)^2 - \frac{(n_s + n_L + n_1 + 1 - i) (\delta^{j+1} - \delta^j)}{2(B2 - \delta^j) \Delta\tau} \right] + \theta_s(i, j) \left[ 1 - 2\Delta\tau \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_L}\right) \left(\frac{n_s}{B2 - \delta^j}\right)^2 \right] + \theta_s(i+1, j) \Delta\tau \left[ \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_L}\right) \left(\frac{n_s}{B2 - \delta^j}\right)^2 + \frac{(n_s + n_L + n_1 + 1 - i) (\delta^{j+1} - \delta^j)}{2(B2 - \delta^j) \Delta\tau} \right] - \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_s k_L \text{TMF}} A_i I_o \quad (5.27)$$

Para a região da interface, usaremos a equação de acoplamento dada pela expressão (4.20b). Se para este caso, rescrevemos as derivadas de primeira ordem  $\frac{\partial \theta_L}{\partial X}$  e  $\frac{\partial \theta_S}{\partial X}$  utilizando aproximação por diferenças finitas com 3 pontos como descrito por Özisik [1968]

$$\left. \frac{\partial \theta_L}{\partial X} \right|_{\Lambda+\delta} = \frac{\theta_L(i-2, j) - 4\theta_L(i-1, j) + 3\theta_L(i-j)}{2\Delta X_L} \quad (5.28)$$

$$\left. \frac{\partial \theta_S}{\partial X} \right|_{\Lambda+\delta} = \frac{-3\theta_S(i, j) + 4\theta_S(i+1, j) - \theta_S(i+2, j)}{2\Delta X_S} \quad (5.29)$$

Substituindo as expressões (5.28) e (5.29) na equação (4.20b) e considerando que  $\theta_L(i, j) = \theta_S(i, j) = \theta_{TMF} = \text{ZERO}$  para  $i = B2 + \delta$ , obtemos a expressão abaixo

$$-\frac{\theta_L(i-2, j) - 4\theta_L(i-1, j)}{2\Delta X_L} + \left(\frac{k_s}{k_L}\right) \frac{[4\theta_S(i+1, j) - \theta_S(i+2, j)]}{2\Delta X_S} +$$

$$\frac{e}{k_L TMF} A_{X=X1+\delta} I_o = \frac{1}{Ste_M} \frac{[\delta(j+1) - \delta(j)]}{\Delta \tau}$$

se substituirmos  $\Delta X_L$  e  $\Delta X_S$

$$\frac{\delta(j+1) - \delta(j)}{\Delta \tau} = Ste_M \frac{n_L}{2\delta(j)} [4\theta_L(i-1, j) - \theta_L(i-2, j)] +$$

$$Ste_M \left(\frac{k_s}{k_L}\right) \frac{n_s}{2[B2 - \delta(j)]} [4\theta_S(i+1, j) - \theta_S(i+2, j)] + \frac{Ste_M e}{k_L TMF} A_{X=X1+\delta} I_o$$

Esta última expressão nos conduz a uma equação que nos permite calcular a posição da interface no tempo  $(j+1)$ , em função da posição da mesma no tempo  $(j)$  e nas temperaturas nos pontos nodais adjacentes à interface.

$$\delta(j+1) = \delta(j) + \Delta \tau Ste_M \frac{n_L}{2\delta(j)} [4\theta_L(i-1, j) - \theta_L(i-2, j)] +$$

$$\Delta \tau Ste_M \left(\frac{k_s}{k_L}\right) \frac{n_s}{2[B2 - \delta(j)]} [4\theta_S(i+1, j) - \theta_S(i+2, j)] \frac{Ste_M e \Delta \tau}{k_L TMF} A_{X=X1+\delta} I_o \quad (5.30)$$

### **Vidro interno**

Seguindo o mesmo procedimento utilizado no caso da região correspondente ao vidro externo, adotaremos aqui uma malha fixa com espaçamentos regulares no domínio  $[X_2 \leq X \leq X_3]$

Considerando que o domínio foi dividido em intervalos regulares  $\Delta X_3$  e se o número de intervalos for  $n_3$ , então  $\Delta X$  é determinado como

$$\Delta X_3 = \frac{B3}{n_3}$$

Então da equação (A9) do apêndice A podemos obter a equação válida para o cálculo da temperatura nos pontos internos do domínio

$$\begin{aligned} \theta_3(i, j+1) &= \theta_3(i-1, j) \left[ \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_3)^2} \right] + \theta_3(i, j) \left[ 1 - 2 \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_3)^2} \right] + \\ \theta_3(i+1, j) &\left[ \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_3)^2} \right] + \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{e\Delta\tau}{\Delta X_3 k_3 \text{TMF}} A_i I_o \end{aligned} \quad (5.31)$$

Para o ponto correspondente à interface pcm-vidro interno ( $X = X_2$ ), de acordo com o apêndice A, podemos escrever a derivada de primeira ordem nesse ponto levando em conta os dois meios existentes (vidro e pcm) através das equações (A12) e (A13). Então substituindo estas equações na condição de contorno correspondente, dependendo se ainda existe fase sólida, se o pcm esta totalmente liquido, ou por último, se a frente de fusão está em  $X=X_2$  (última lâmina de sólido).

(i) Ainda existe fase sólida

Substituindo (A12) e (A13) em (4.21a)

$$\begin{aligned} -\frac{1}{\Delta X_s} \theta_s(n_s - 1, j) + \theta_s(n_s, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_s} - \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta\tau} \right] + \theta_s(n_s, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_s} \frac{\Delta X_s}{2\Delta\tau} \right] - \\ \frac{e}{2k_s \text{TMF}} A_i I_o = \frac{k_3}{k_s} \left\{ \frac{1}{\Delta X_3} \theta_3(1, j) + \theta_3(0, j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} - \frac{1}{\Delta X_3} \right] - \right. \\ \left. \theta_3(0, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} \right] + \frac{e}{2k_3 \text{TMF}} A_i I_o \right\} \end{aligned} \quad (5.32)$$

em  $X = X_2$   $\theta_s(n_s, j) = \theta_3(0, j)$  e  $\theta_s(n_s, j+1) = \theta_3(0, j+1)$ , de modo que a equação acima pode simplificada e rescrita de forma conveniente;

$$\theta_3(0, j+1) = \theta_s(n_s - 1, j) \left[ \frac{2k_s \alpha_3 \alpha_s \Delta \tau}{\alpha_l Z \Delta X_s} \right] + \theta_3(0, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_3 \alpha_s \Delta \tau (k_s \Delta X_3 + k_3 \Delta X_s)}{\alpha_l Z \Delta X_s \Delta X_3} \right] + \theta_3(1, j) \left[ \frac{2k_3 \alpha_3 \alpha_s \Delta \tau}{\alpha_l Z \Delta X_3} \right] + \frac{e}{\text{TMF}} \left[ \frac{2\alpha_3 \alpha_s \Delta \tau}{\alpha_l Z} \right] A_{X-X_2} I_o \quad (5.33)$$

onde

$$Z \equiv k_s \alpha_3 \Delta X_s + k_3 \alpha_s \Delta X_3$$

(ii) pcm totalmente líquido

Substituindo (A12) e (A13) em (4.21c)

$$\begin{aligned} & - \left\{ -\frac{1}{\Delta X_L} \theta_L(n_L - 1, j) + \theta_L(n_L, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_L} - \frac{\Delta X_L}{2\Delta \tau} \right] + \theta_L(n_L, j+1) \left[ \frac{\Delta X_L}{2\Delta \tau} \right] \right. \\ & \left. - \frac{e}{2k_L \text{TMF}} A_{X-X_2} I_o \right\} + \frac{e}{k_L \text{TMF}} A_{X-X_2} I_o = -\frac{k_3}{k_L} \left\{ \frac{1}{\Delta X_3} \theta_3(1, j) + \theta_3(0, j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta \tau} - \frac{1}{\Delta X_3} \right] - \theta_3(0, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta \tau} \right] + \frac{e}{2k_3 \text{TMF}} A_{X-X_2} I_o \right\} \end{aligned} \quad (5.34)$$

em  $X = X_2$   $\theta_L(n_L, j) = \theta_3(0, j)$  e  $\theta_L(n_L, j+1) = \theta_3(0, j+1)$ , Assim, após aplicar estas igualdades a equação (5.34) pode ser simplificada e reescrita como;

$$\theta_3(0, j+1) = \theta_L(n_L - 1, j) \left[ \frac{2k_L \alpha_3 \Delta \tau}{R \Delta X_L} \right] + \theta_3(0, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_3 \Delta \tau (k_L \Delta X_3 + k_3 \Delta X_L)}{R \Delta X_L \Delta X_3} \right] + \theta_3(1, j) \left[ \frac{2k_3 \alpha_3 \Delta \tau}{R \Delta X_3} \right] + \frac{e}{\text{TMF}} \left[ \frac{2\alpha_3 \Delta \tau}{R} \right] A_{X-X_2} I_o \quad (5.35)$$

onde

$$R \equiv k_L \alpha_3 \Delta X_L + k_3 \alpha_L \Delta X_3$$

(iii) Última lâmina de sólido (fim da mudança de fase)

Substituindo (A12), (A13) e (5.5) na condição de contorno (4.21b)

$$\begin{aligned}
& - \left\{ -\frac{1}{\Delta X_L} \theta_L(n_L - 1, j) + \theta_L(n_L, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_L} - \frac{\Delta X_L}{2\Delta\tau} \right] + \theta_L(n_L, j+1) \left[ \frac{\Delta X_L}{2\Delta\tau} \right] - \right. \\
& \left. \frac{e}{2k_L \text{TMF}} A_{X=X_2} I_o \right\} + \frac{e}{k_L \text{TMF}} A_{X=X_2} I_o = \frac{1}{\text{Ste}_M} \frac{[\delta(j+1) - \delta(j)]}{\Delta\tau} + \\
& \left( -\frac{k_3}{k_L} \right) \left\{ \frac{1}{\Delta X_3} \theta_3(1, j) + \theta_3(0, j) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} - \frac{1}{\Delta X_3} \right] - \theta_3(0, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} \right] + \right. \\
& \left. \frac{e}{2k_3 \text{TMF}} A_{X=X_2} I_o \right\}
\end{aligned} \tag{5.36}$$

na equação acima  $\theta_3(0, j+1) = \theta_L(n_L, j+1)$  e  $\theta_3(0, j) = \theta_L(n_L, j)$

Utilizando o mesmo argumento usado no início da mudança de fase, aqui também podemos assumir que para uma pequena fração de tempo, no final da fusão, a temperatura permanece inalterada. Desta forma podemos afirmar que:

$$\theta_3(0, j) \equiv \theta_3(0, j+1) \equiv \theta_L(n_L, j) \equiv \theta_L(n_L, j+1) \equiv \text{TMF}$$

A partir destas considerações a equação (5.36) pode ser simplificada e rescrita de uma forma adequada.

$$\begin{aligned}
\delta(j+1) &= \delta(j) + \text{Ste}_M \frac{\Delta\tau}{\Delta X_3} \frac{k_3}{k_L} [\theta_3(1, j) - \theta_{\text{MF}}] + \\
& \text{Ste}_M \frac{\Delta\tau}{\Delta X_L} [\theta_L(n_L - 1, j) - \theta_{\text{MF}}] + \frac{2\text{Ste}_M e \Delta\tau}{k_L \text{TMF}} A_{X=X_2} I_o
\end{aligned} \tag{5.37}$$

Para o ponto  $(n_3, j)$  na interface vidro\_interno-meio\_ambiente\_interno ( $X=X_3$ ) o equacionamento em diferenças finitas é como segue.

Substituindo (A13) na condição de contorno dada pela equação (4.21d)

$$\begin{aligned}
& -\frac{1}{\Delta X_3} \theta_3(n_3 - 1, j) + \theta_3(n_3, j) \left[ \frac{1}{\Delta X_3} - \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} \right] + \theta_3(n_3, j+1) \left[ \frac{\alpha_L}{\alpha_3} \frac{\Delta X_3}{2\Delta\tau} \right] - \\
& \frac{e}{2k_3 \text{TMF}} A_{X=X_3} I_o = \text{Bi}_{\text{int}} [\theta_{\text{int}} - \theta_3(n_3, j)]
\end{aligned} \tag{5.38}$$

A equação (5.38) pode ser rescrita colocando  $\theta_3(n_3, j+1)$  em evidencia

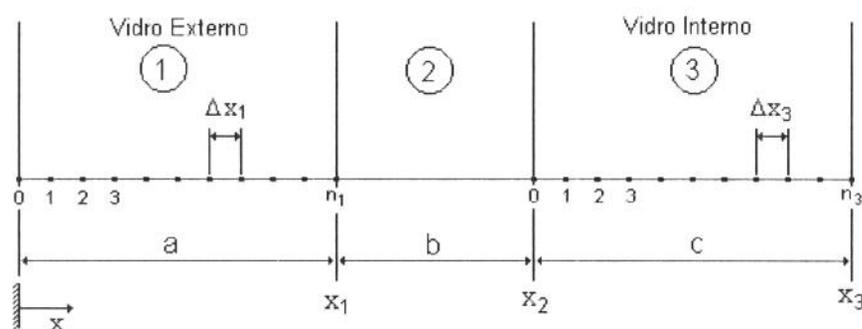
$$\theta_3(n_3, j+1) = \theta_3(n_3 - 1, j) \left[ 2 \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_3)^2} \right] + \theta_3(n_3, j) \left[ 1 - 2 \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{(\Delta X_3)^2} (1 - \Delta X_3 \text{Bi}_{\text{int}}) \right] + \theta_{\text{int}} \left[ 2 \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \frac{\Delta\tau}{\Delta X_3} \text{Bi}_{\text{int}} \right] + \left( \frac{\alpha_3}{\alpha_L} \right) \frac{2e\Delta\tau}{\Delta X_3 k_3 \text{TMF}} A_{x=x_3} I_o \quad (5.39)$$

## 5.2 Discretização das Equações para o Painel de Vidro Duplo Preenchido com Ar

Representando as derivadas de segunda ordem da temperatura com relação à posição e a derivada de primeira ordem com relação ao tempo por diferenças finitas como no apêndice A, equações (A7) e (A8).

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{T(i+1, j) - 2T(i, j) + T(i-1, j)}{(\Delta x)^2} \quad (5.40)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T(i, j+1) - T(i, j)}{\Delta t} \quad (5.41)$$



**Figura 5.3** Esquema de malha fixa para a região do vidro externo e interno

Dividindo as duas regiões correspondentes, vidro interno e externo, em intervalos regularmente espaçados como mostrado na figura (5.3), onde a primeira região, que corresponde ao vidro externo, o número de intervalos é  $n_1$  e na terceira região, por sua vez correspondente ao vidro interno o número de intervalos é  $n_3$ , de modo que a distancia entre dois pontos adjacentes, para cada uma das regiões pode ser escrita como,

$$\Delta x_1 = \frac{a}{n_1} \quad \text{e} \quad \Delta x_3 = \frac{b}{n_3}$$

A discretização das equações para cada ponto da malha e em cada região, é realizado levando-se em conta a equação que governa o problema, equação transiente da condução de calor, e suas respectivas condições de contorno. Assim para cada região podemos escrever;

### 1<sup>o</sup> Vidro Externo:

Aplicando as equações (5.40) e (5.41) na equação transiente da condução de calor, equação (4.23)

$$\frac{1}{\alpha_1} \frac{T_1(i, j+1) - T_1(i, j)}{\Delta t} = \frac{T_1(i+1, j) - 2T_1(i, j) + T_1(i-1, j)}{(\Delta x_1)^2} - \frac{1}{\rho_1 C_1} \frac{\Delta I}{\Delta x_1} \quad (5.42)$$

Se arranjamos adequadamente a equação acima, encontraremos uma expressão para o cálculo da temperatura nos pontos internos do domínio,  $1 \leq i \leq n_1$

$$T(i, j+1) = \left( \frac{\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} \right) T(i+1, j) + \left[ 1 + \frac{\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} \right] T(i, j) + \left( \frac{\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} \right) T(i-1, j) + \frac{\alpha_1 \Delta t}{\rho_1 C_1 \Delta x_1} A_i I_o \quad (5.43)$$

A expressão para os pontos extremos é obtida levando em consideração as condições de contorno. Usando uma expressão equivalente a equação adimensionalizada (A12), no apêndice A, para o ponto da extrema esquerda do domínio,

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{(0, j)} = \frac{1}{\Delta x_1} T_1(1, j) + T_1(0, j) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} - \frac{1}{\Delta x_1} \right] - T_1(0, j+1) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] + \frac{1}{2\rho_1 C_1} A_{x=0} I_o \quad (5.44)$$

Substituindo (5.44) na condição de contorno dada pela equação (4.24)

$$\begin{aligned} & -k_1 \left\{ \frac{1}{\Delta x_1} T_1(1, j) + T_1(0, j) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} - \frac{1}{\Delta x_1} \right] - T_1(0, j+1) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] + \frac{1}{2k_1} A_{x=0} I_o \right\} \\ & = A_{x=0} I_o - h_{G,ext} [T_1(0, j) - T_{ext}] \end{aligned}$$

Colocando  $T(0, j+1)$ , da equação acima, em evidência, chegaremos a uma expressão para o cálculo da temperatura no primeiro ponto da grade.

$$T(0, j+1) = T(1, j) \left( \frac{2\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} \right) + T(0, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} - \frac{2\alpha_1 h_{G,ext} \Delta t}{k_1 (\Delta x_1)} \right] + \left( \frac{3}{2} A_{x=0} I_o + h_{G,ext} T_{ext} \right) \left( \frac{2\alpha_1 \Delta t}{k_1 (\Delta x_1)} \right) \quad (5.45)$$

onde:

$$h_{G,ext} = h_{C,ext} + \varepsilon \sigma \left\{ [T_1(0, j)]^2 + T_{ext}^2 \right\} \left\{ [T_1(0, j)] + T_{ext} \right\}$$

Agora para o ponto extremo direito ( $n_1$ ), usaremos uma equação equivalente a expressão adimensionalizada (A13) do apêndice A

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{(n_1, j)} = -\frac{1}{\Delta x_1} T_1(n_1 - 1, j) + T_1(n_1, j) \left[ \frac{1}{\Delta x_1} - \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] + T_1(n_1, j+1) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] - \frac{1}{2\alpha_1 \rho_1 C_1} A_{x=x_1} I_o \quad (5.46)$$

Substituindo (5.46) na condição de contorno correspondente, equação(4.25)

$$-k_1 \left\{ -\frac{1}{\Delta x_1} T_1(n_1 - 1, j) + T_1(n_1, j) \left[ \frac{1}{\Delta x_1} - \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] + T_1(n_1, j+1) \left[ \frac{\Delta x_1}{2\alpha_1 \Delta t} \right] - \frac{1}{2k_1} A_{x=x_1} I_o \right\} = C [T_1(n_1, j) - T_3(0, j)] \quad (5.47)$$

Colocando  $T(n_1, j+1)$  em evidência, chegamos a uma expressão para o cálculo da temperatura no último ponto da grade.

$$T_1(n_1, j+1) = T_1(n_1, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} - \frac{2\alpha_1 \Delta t C}{k_1 \Delta x_1} \right] + T_1(n_1 - 1, j) \left( \frac{2\alpha_1 \Delta t}{(\Delta x_1)^2} \right) + T_3(0, j) \left( \frac{2\alpha_1 \Delta t C}{k_1 (\Delta x_1)^2} \right) + A_{x=x_1} I_o \left[ \frac{\alpha_1 \Delta t}{\Delta x_1} \right] \quad (5.48)$$

onde:

$$C = h_C + h_R$$

$$h_C = \frac{k_f}{b} Nu$$

$$h_R = \sigma \varepsilon \frac{\left\{ \left[ T_1(n_{1,j}) \right]^4 - \left[ T_3(0,j) \right]^4 \right\}}{\left[ T_1(n_{1,j}) - T_3(0,j) \right]}$$

$$E = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_3} - 1$$

## 2<sup>do</sup> Vidro Interno:

De forma similar ao tratamento feito na região correspondente ao vidro externo, aqui substituiremos as equações (5.40) e (5.41) na equação transiente da condução de calor para esta região em particular, equação (4.34).

$$\frac{1}{\alpha_3} \frac{T_3(i, j+1) - T_3(i, j)}{\Delta t} = \frac{T_3(i+1, j) - 2T_3(i, j) + T_3(i-1, j)}{(\Delta x_3)^2} - \frac{1}{\rho_3 C_3} \frac{\Delta I}{\Delta x_3} \quad (5.49)$$

A equação (5.49) pode ser rescrita colocando  $T_3(i, j+1)$  em evidência, de forma a encontrar uma expressão para o cálculo da temperatura nos pontos internos da grade correspondente à região do vidro interno,  $1 \leq i \leq n_3$

$$T_3(i, j+1) = T_3(i+1, j) \left( \frac{\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right) + T_3(i, j) \left[ 1 + \frac{\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right] + T_3(i-1, j) \left( \frac{\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right) + \frac{\alpha_3 \Delta t}{\rho_3 C_3 \Delta x_3} A_i I_o \quad (5.50)$$

Para os pontos do contorno devemos realizar um análise similar ao feito para a região do vidro externo, levando em consideração as condições de contorno específicas.

Então utilizando uma equação equivalente a equação (A12) do apêndice A , válida para o primeiro ponto da malha, e substituindo esta na condição de contorno dada pela equação(4.35), obtemos a seguinte expressão;

$$-k_3 \left\{ T_3(1, j) \left[ \frac{1}{\Delta x_3} \right] + T_3(0, j) \left[ \frac{\Delta x_3}{2\alpha_3 \Delta t} - \frac{1}{\Delta x_3} \right] - T_3(0, j+1) \left[ \frac{\Delta x_3}{2\alpha_3 \Delta t} \right] + \frac{1}{2\alpha_3 \rho_3 C_3} A_{x=x_2} I_o \right\} = A_{x=x_2} I_o + C \left[ T_1(n_1, j) - T_3(0, j) \right] \quad (5.51)$$

Assim da equação (5.51) para o primeiro ponto da malha,

$$\begin{aligned}
T_3(0, j+1) = & T_3(1, j) \left[ \frac{2\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right] + T_3(0, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_3 \Delta t C}{\Delta x_3} - \frac{2\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right] + \\
& + T_1(n_1, j) \left( \frac{2\alpha_3 \Delta t C}{\Delta x_3} \right) + \left( \frac{\alpha_3 \Delta t}{\Delta x_3 k_3} \right) A_{x-x_2} I_o
\end{aligned} \tag{5.52}$$

C é dado como em (4.26)

Por último, para o ponto  $n_3$  utilizamos uma equação equivalente a equação (A13) do apêndice a, junto com a equação(4.36) e obtemos uma expressão que nos permite calcular a temperatura neste ponto.

$$\begin{aligned}
T_3(n_3, j+1) = & T_3(n_3, j) \left[ 1 - \frac{2\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} - \frac{2\alpha_3 h_{G,int} \Delta t}{k_3 \Delta x_3} \right] + T_3(n_3 - 1, j) \left[ \frac{2\alpha_3 \Delta t}{(\Delta x_3)^2} \right] + \\
& + [h_{G,int} T_{int}(j)] \left( \frac{2\alpha_3 \Delta t}{k_3 \Delta x_3} \right) + \left[ \frac{\alpha_3 \Delta t}{\Delta x_3} \right] A_{x-x_3} I_o
\end{aligned} \tag{5.53}$$

### 5.3 Considerações na simulação numérica.

Um código computacional é implementado em Fortran a partir das equações discretizadas nos itens (5.1) e (5.2). O fluxograma do código computacional é apresentado na figura (5.6)

O programa inclui a simulação das condições ambientais externa tais como a radiação solar incidente e a variação da temperatura do ar externo ao longo de um período de 24 horas. A radiação solar incidente é modelada a partir de correlações sugeridas por Liu e Jordan[1960], Hottel[1976] e Stephenson[1965], junto com dados meteorológicos e geográficos da cidade de Campinas (SP). Este modelo engloba tanto a radiação solar direta quanto a difusa, assim como também a radiação refletida do chão. Para o cálculo da variação horária da temperatura do ar atmosférico, é utilizado o método descrito no ASHRAE Handbook Fundamentals[1985], que utiliza dados locais de temperatura média (médias máxima e mínima). Estes dois modelos, o da radiação solar incidente e o da variação da temperatura externa, são apresentados com mais detalhes no apêndice B.

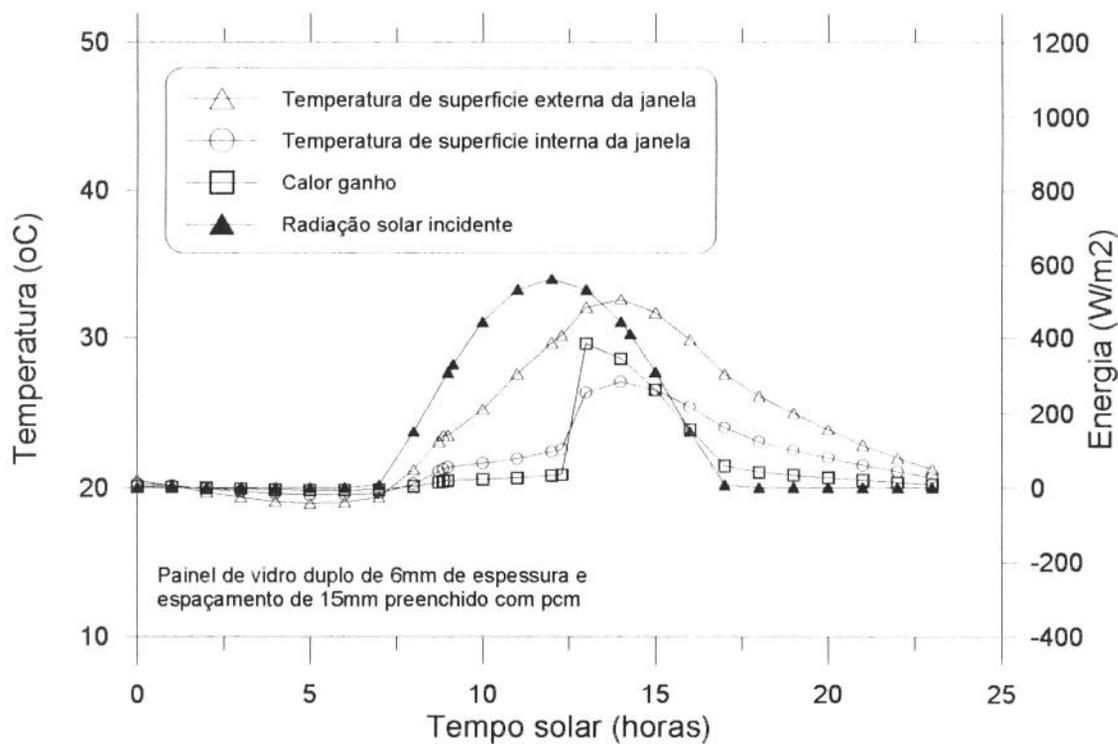
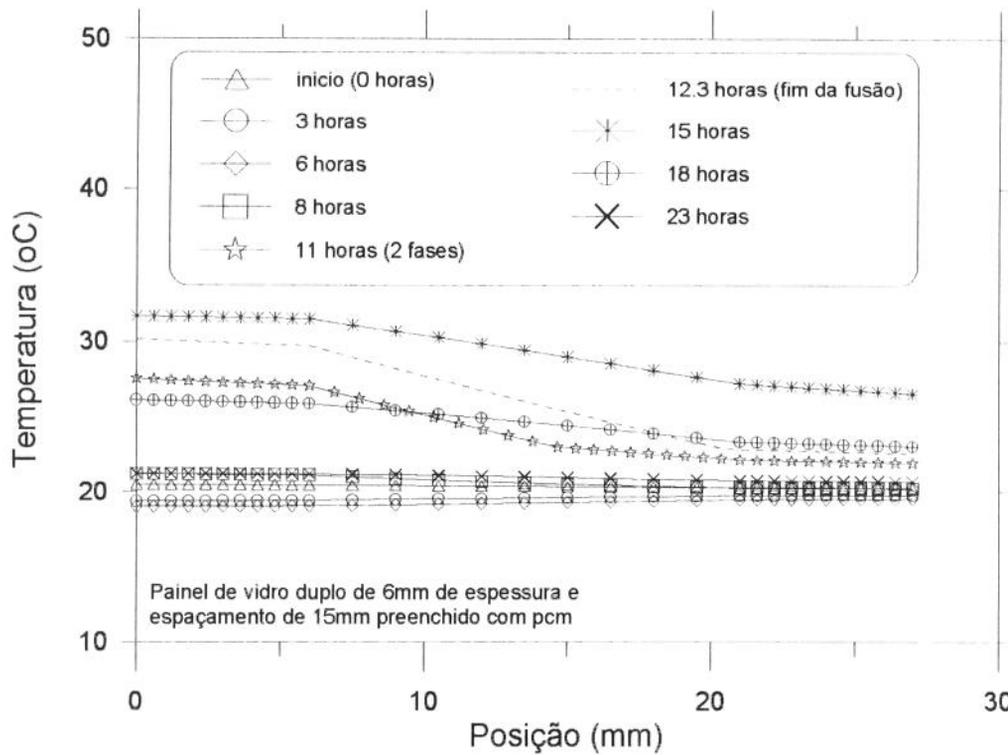


Figura 5.4.- Simulação pelo método da absorptância concentrada

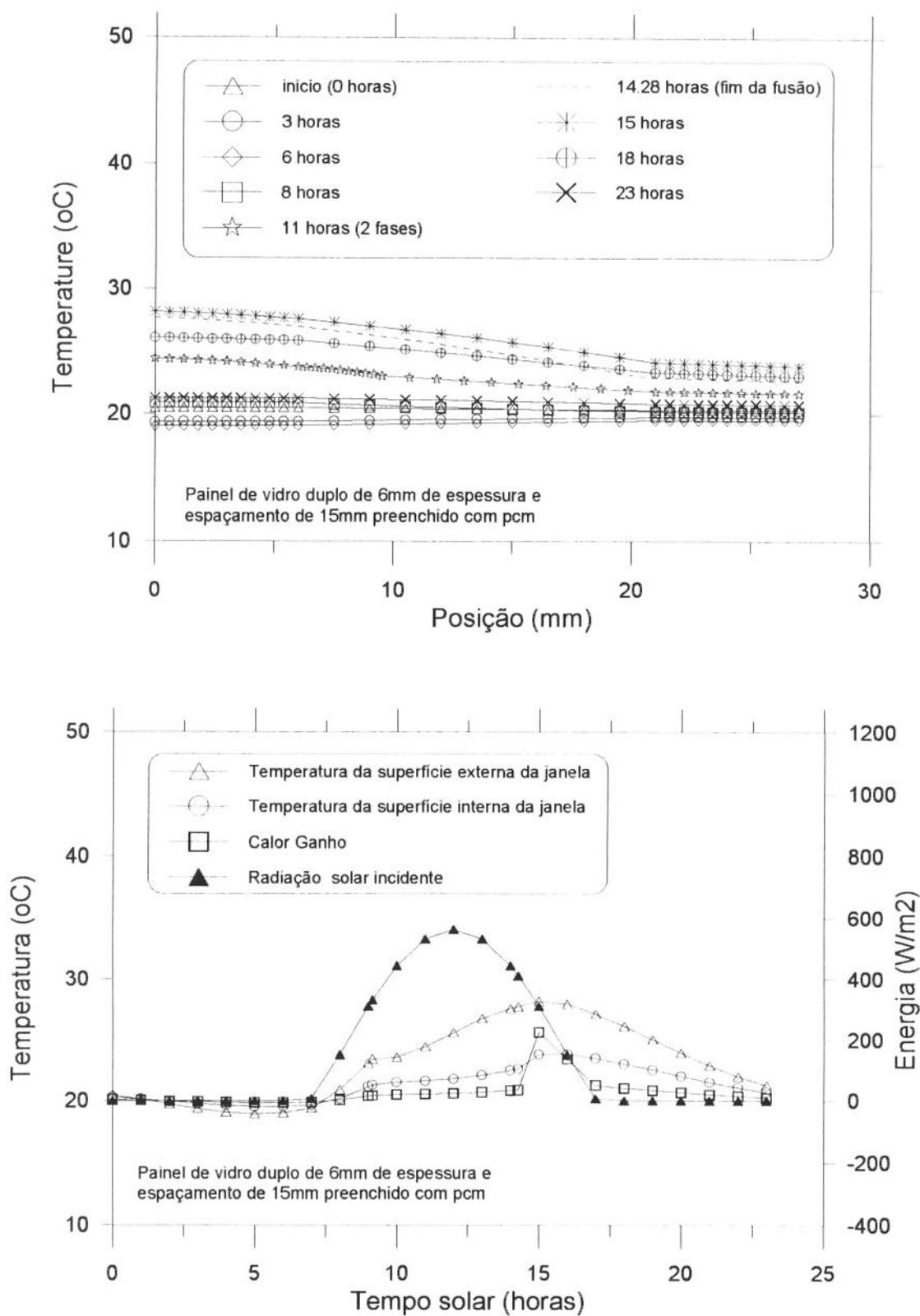


Figura 5.5.- Simulação pelo método da absorvância distribuída

Durante a simulação são considerados três modelos em relação ao modo como é computada a absorção da radiação solar no sistema. De forma a simplificar os cálculos computacionais inicialmente foi considerado que a absorção acontece exclusivamente na interface entre o pcm e o vidro externo e o seu valor correspondia a aquele encontrado experimentalmente através dos testes óticos. Esta consideração se mostrou inadequada no decorrer das simulações e foi rejeitado. Alternativamente, foi adotado um segundo modelo no qual a absorção da radiação também é considerada concentrada, só que desta vez é assumida como acontecendo em cada uma das interfaces do sistema. Por último foi adotado um terceiro modelo que assume que a absorção ocorre ao longo do caminho percorrido pelo raio através do meio transparente, isto é, a absorptância é distribuída em cada um dos nós da malha computacional. Esta distribuição é realizada a partir da própria atenuação do raio quando atravessa o meio, como é mostrado no apêndice C. O segundo e terceiro modelo fornecem resultados coerentes do ponto de vista da física do problema e qualitativamente falando similares entre si como é mostrado nas figuras (5.4) e (5.5), as quais representam a simulação numérica para um painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 15mm preenchido com pcm. A figura (5.4) é obtida considerando o modelo de absorptância concentrada nas interface e a figura (5.5) o caso em que é considerado o modelo de absorptância distribuída. Aqui foi utilizado o terceiro modelo em todos os cálculos por representar um mecanismo mais realístico para a absorção embora a simulação com o segundo modelo consuma um tempo computacional menor.

Dado que a simulação numérica foi implementada no método de diferenças finita na sua forma explícita, existe uma necessidade de evitar instabilidades. Esta característica faz com que não seja possível assumir os valores do incremento espacial ( $\Delta X$ ) e temporal ( $\Delta \tau$ ) de forma independente um do outro. O procedimento aqui adotado é o de assumir a priori a malha espacial, e de posse do valor do incremento  $\Delta X$  calcular o valor do incremento no tempo a partir dos critérios de estabilidade. Estes critérios são obtidos diretamente do conjunto de equações discretizadas, através do análise dos coeficientes multiplicadores das variáveis. É recomendável, para a estabilidade do método, que estes coeficientes assumam valores positivos.

Pelas características deste problema, em que as condições de contorno variam no tempo, a verificação da estabilidade torna-se dinâmica e automática dentro do próprio

programa, de modo que o incremento de tempo é calculado sempre antes de dar um novo passo no tempo. Uma malha computacional muito fina na direção espacial produz incrementos de tempo muitos pequenos, consumindo um grande tempo computacional. Aqui se verificou que uma malha de 10 incrementos em cada região (vidro externo, fases sólida e líquida da região do pcm e vidro interno) é bastante adequada.

A simulação numérica é realizada para uma janela orientada para o norte e localizada numa região de latitude  $22^{\circ} 53'$  Sul ( Cidade de Campinas-SP). Sendo que o dia do ano é um fator importante no modelo de radiação solar, é escolhido o dia 21 de Janeiro. A escolha do mês de Janeiro é feita em base a que este corresponde a um dos meses mais quente do ano e portanto os resultados obtidos através da simulação representarão valores maximizados. para considerar a radiação solar, direta e difusa, incidente na janela após refletir no chão, devemos fazer alguma consideração em relação ao tipo de chão adotado e obviamente desconsiderar a presença de prédios ou construções vizinhas. O tipo de chão é considerado como sendo de concreto velho, de modo que da tabela 12 do ASHRAE Handbook Fundamentals[1985], temos que o coeficiente de refletividade ( $\rho_g$ ) assume o valor de  $\rho_g = 0,22$ . A temperatura do meio ambiente interno é considerada como sendo constante durante todo o período de simulação e esta assume o valor de  $20^{\circ}\text{C}$ .

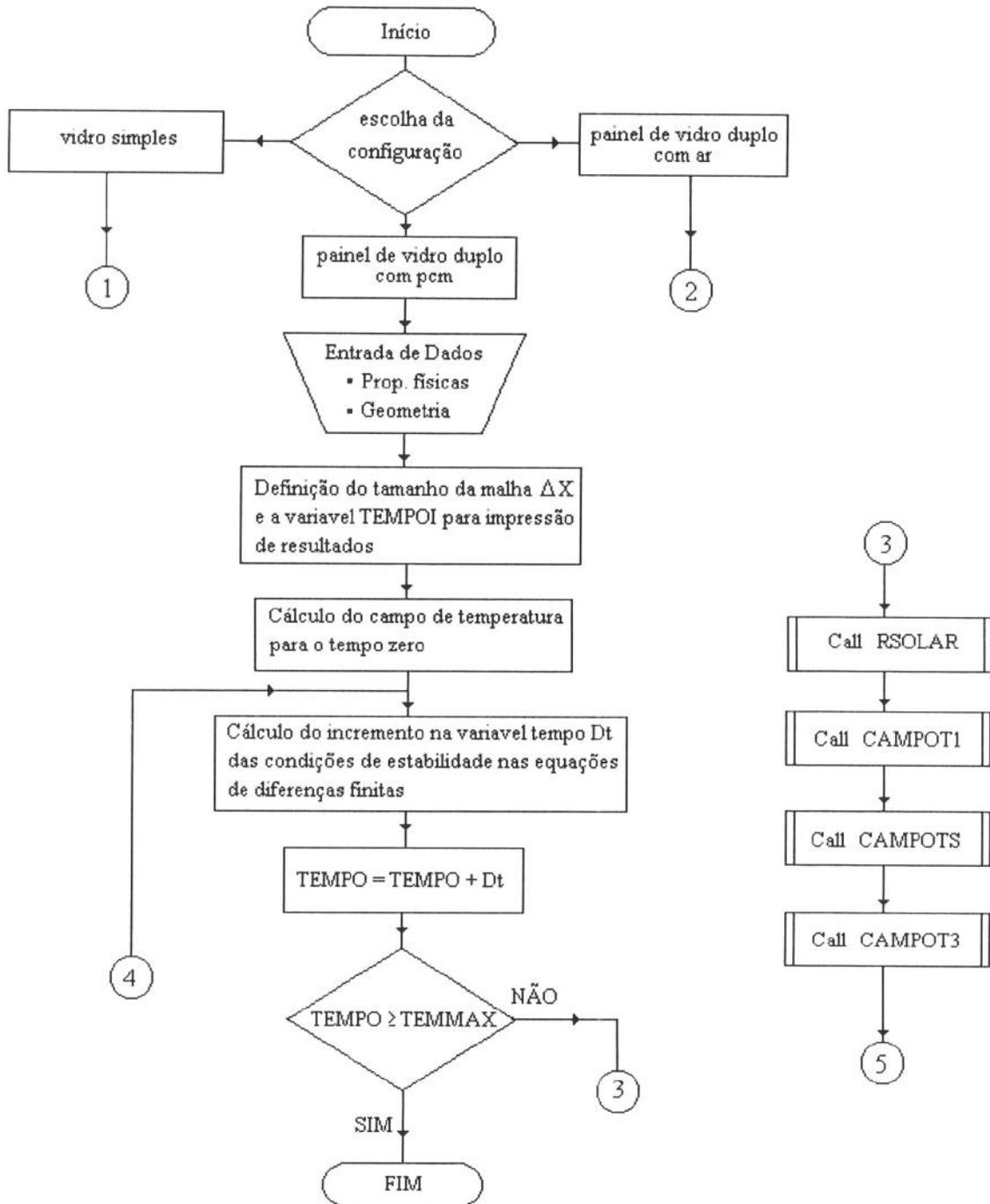
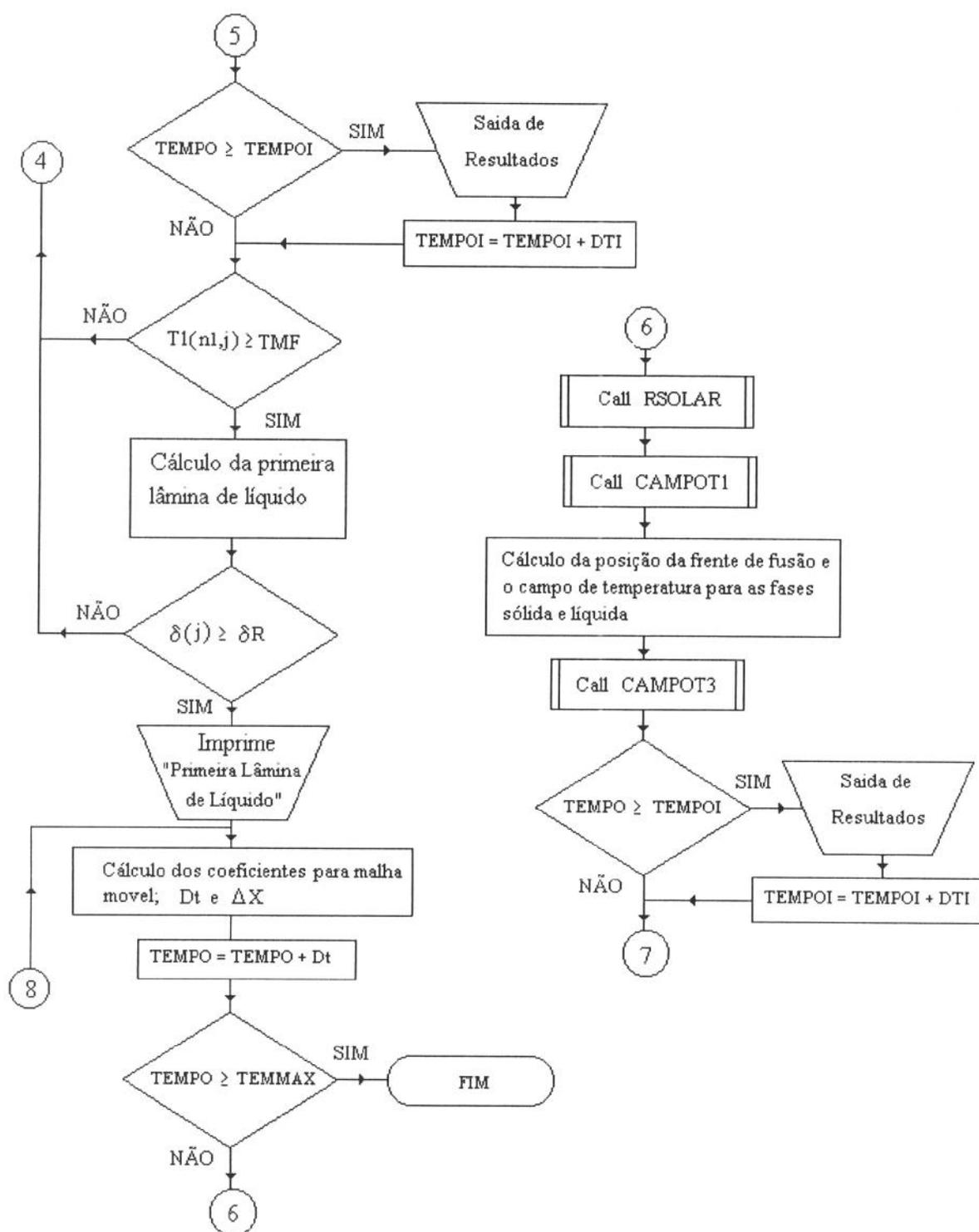
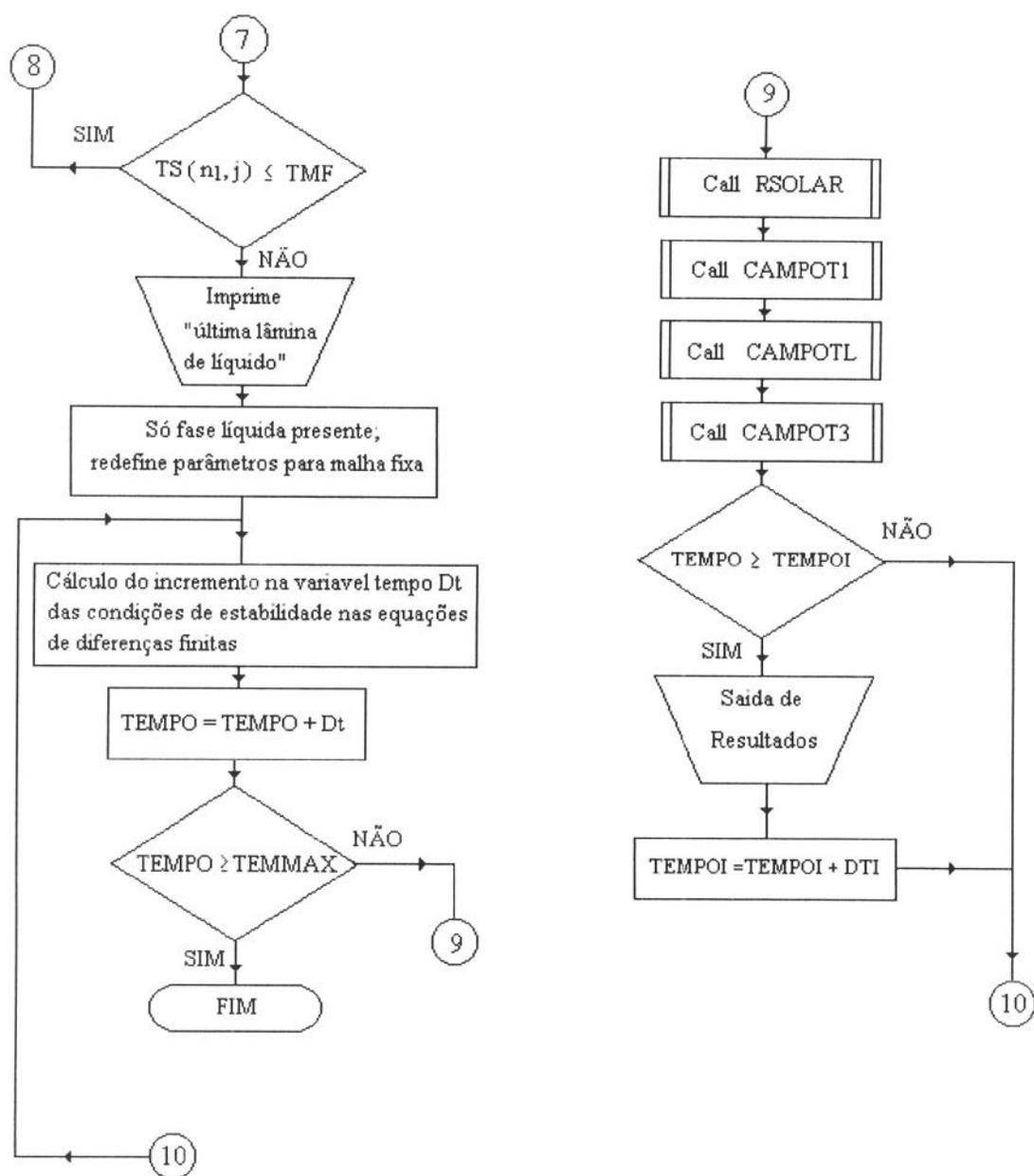


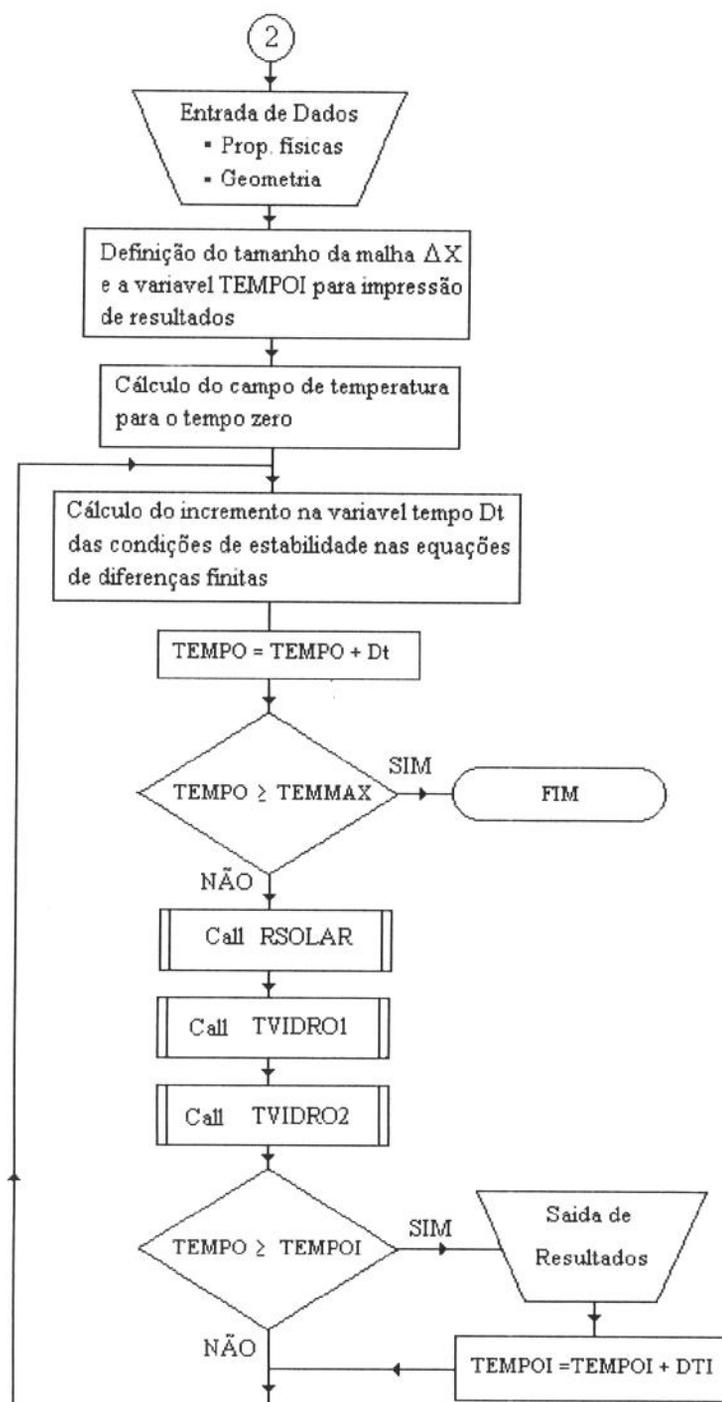
Figura 5.6 Fluxograma do código computacional



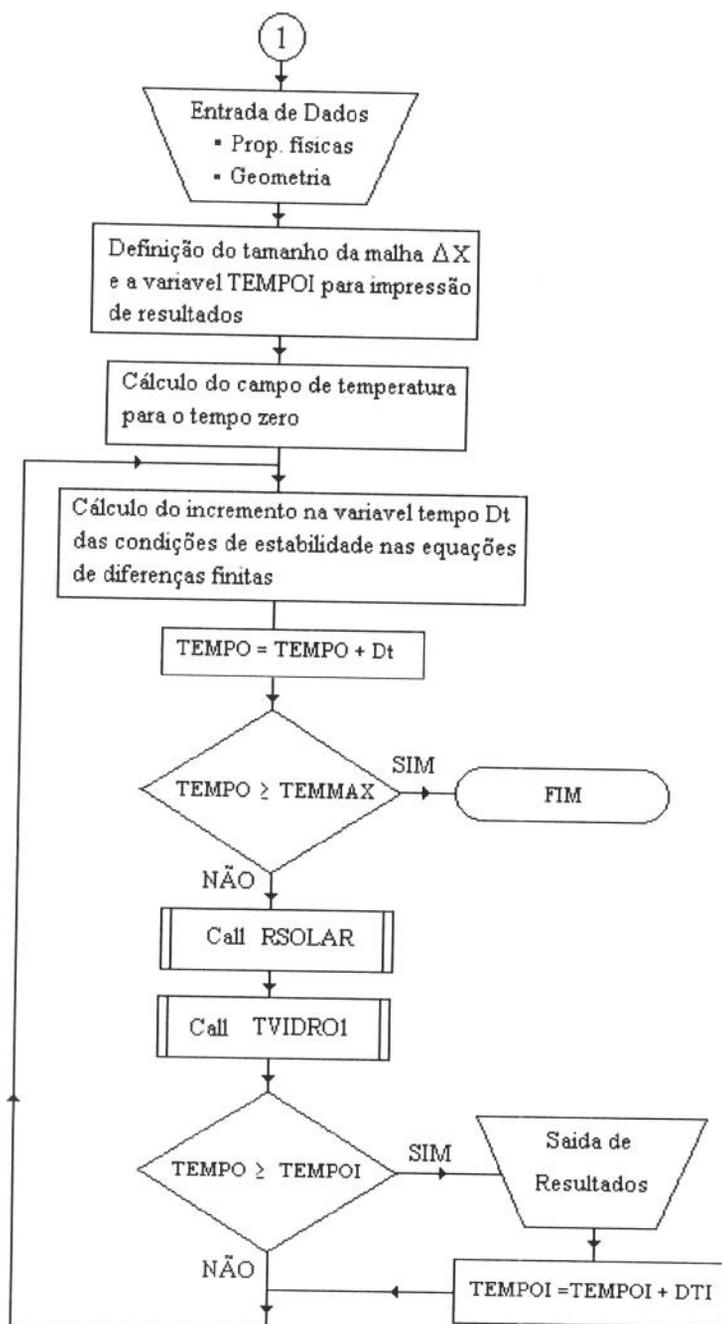
Continuação da figura 5.6



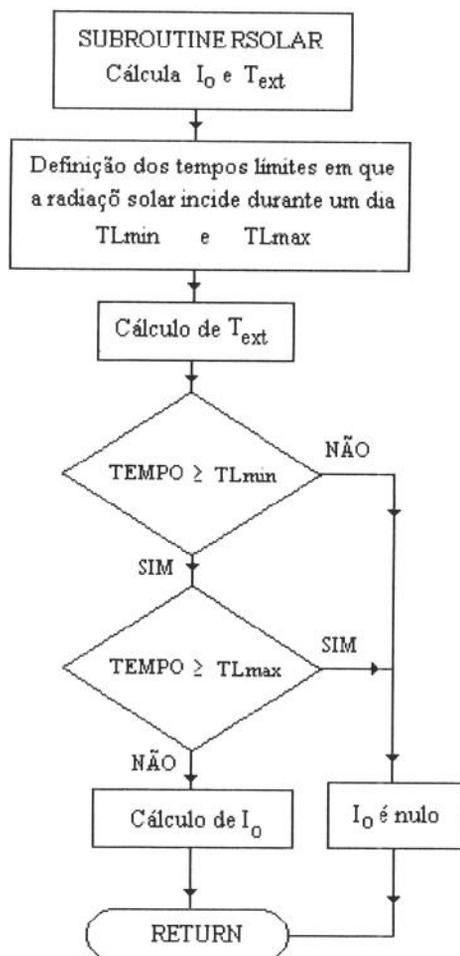
Continuação da figura 5.6



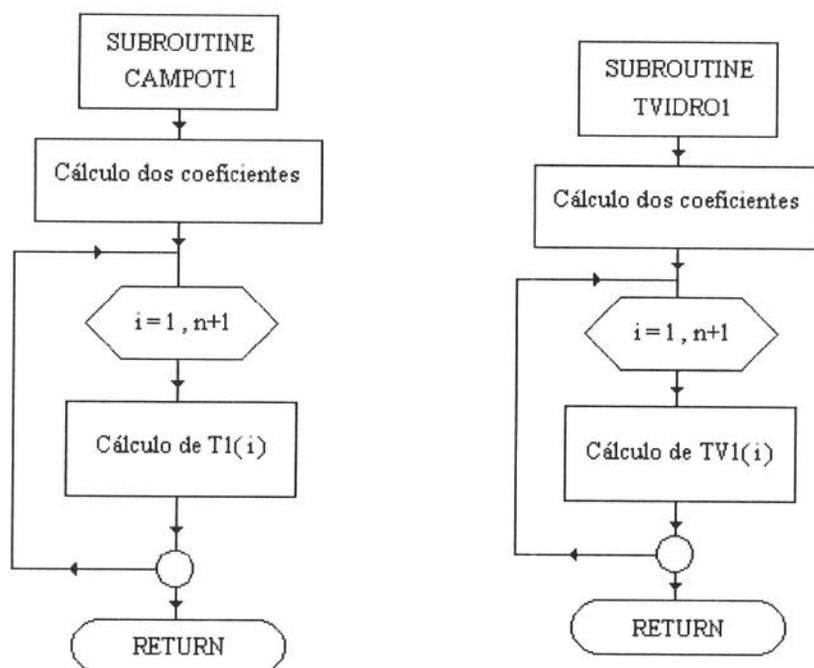
Continuação da figura 5.6



Continuação da figura 5.6



Continuação da figura 5.6



Continuação da figura 5.6

## Capítulo 6

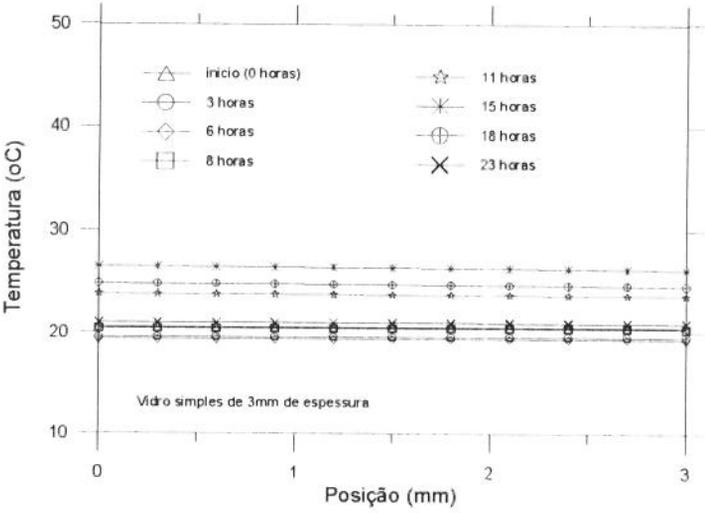
### Simulação Numérica e Discussões

A simulação numérica foi realizada considerando o mesmo conjunto de configurações que foram utilizadas nos testes de caracterização de parâmetros óticos. Dos resultados numéricos são obtidas curvas de distribuição de temperatura ao longo da secção transversal do painel e em função do tempo. Também são obtidas curvas de evolução da temperatura nas superfícies interna e externa do painel e finalmente são obtidas as curvas que representam o ganho de calor pelo meio ambiente interno. O ganho de calor aqui calculado é a soma de duas parcelas, a primeira parcela corresponde ao ganho de calor devido à radiação solar transmitida e absorvida pelo sistema e a segunda parcela corresponde por sua vez ao ganho de calor devido a diferenças de temperatura entre o meio ambiente interno e externo. Esta quantificação da carga térmica é feita por unidade de área da janela.

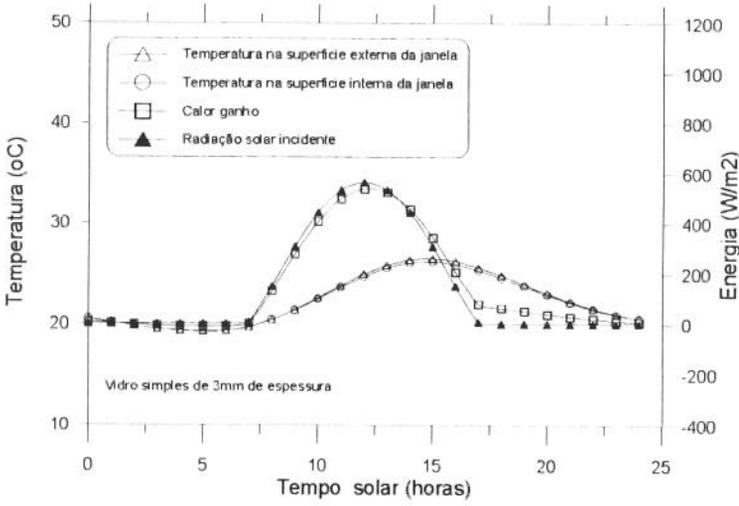
Inicialmente são feitas simulações para vidros simples de diferentes espessuras. Os resultados se encontram nas figuras (6.1) a (6.5). A figura (6.1-a) representa a distribuição de temperatura em função da posição transversal e o tempo, e a figura (6.1-b) apresenta curvas de ganho térmico, temperaturas nas superfícies interna e externa do painel, e a própria radiação solar incidente, para um período de tempo de 24 horas para o caso correspondente ao vidro de 3mm de espessura.

O perfil de temperatura na figura (6.1-a) representa uma curva quase constante ao longo da secção do painel de vidro. Este comportamento fica mais evidente na figura (6.1-b) onde as curvas de temperatura da superfície externa e interna da placa ao longo de um período de 24 horas diferem muito pouco entre si. Este fato indica que o vidro comum de janela de 3mm de

espessura se comporta como uma área aberta à radiação solar incidente, deixando atravessar praticamente toda a parcela de energia incidente tanto de forma direta quanto indireta, como pode ser visto através da comparação das curvas de calor ganho e radiação solar incidente na figura (6.1-b). Este mesmo comportamento é verificado nos vidros de espessura 4, 5, 6 e 8mm. Em todo caso o vidro de 8mm de espessura representa uma vantagem, embora pequena, em relação ao de 3mm no que diz respeito ao desempenho térmico, isto é, o vidro de 8mm deixa entrar uma carga térmica menor que o de 3mm.

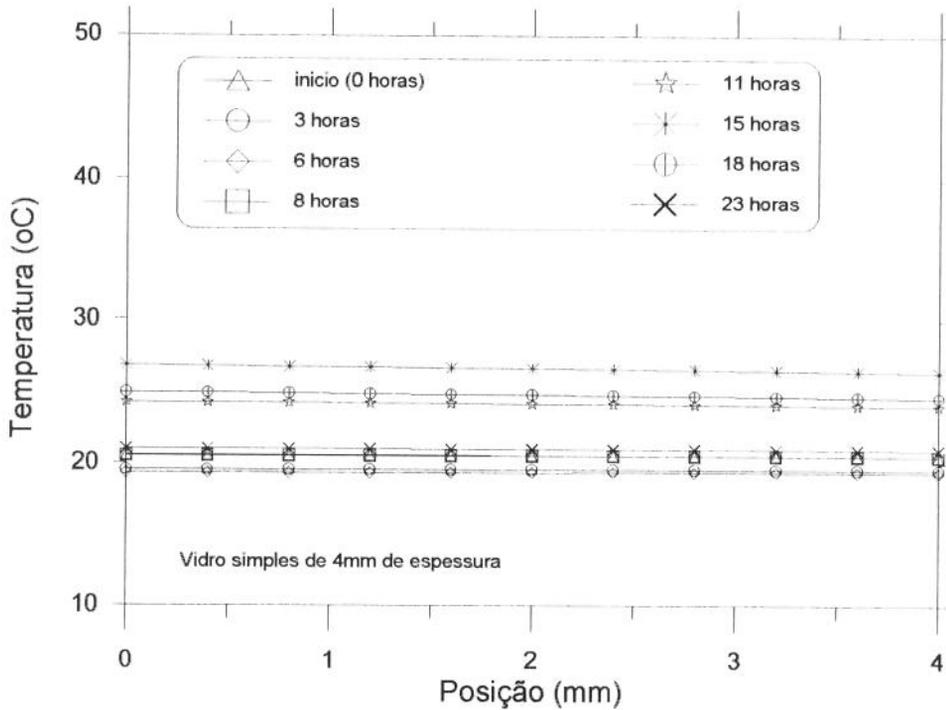


(a)

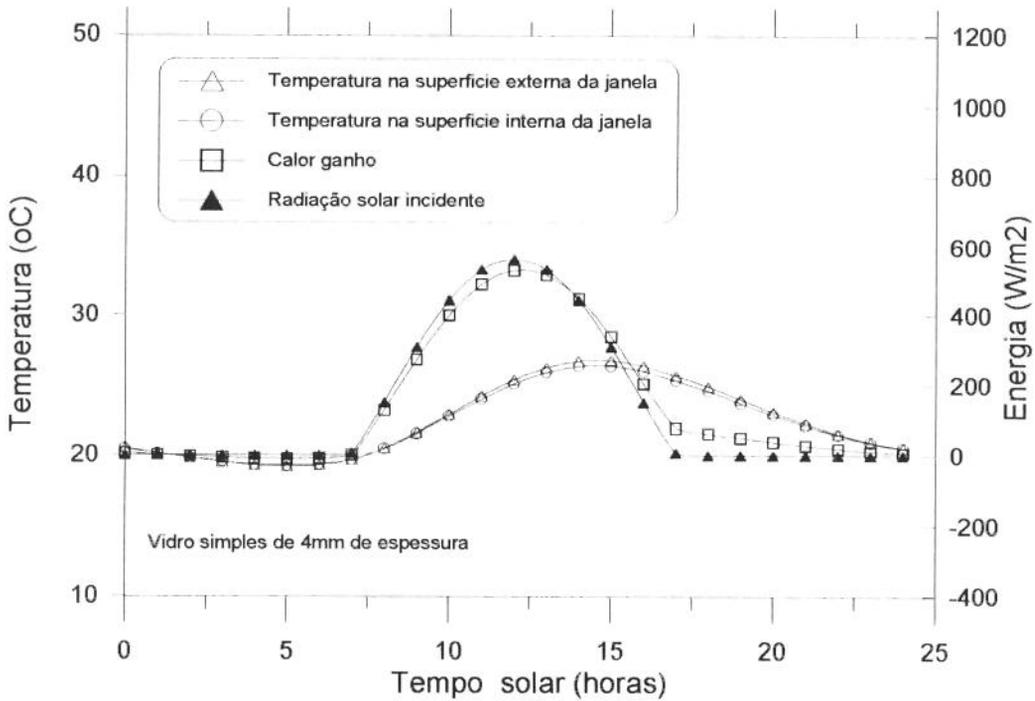


(b)

**Figura 6.1:** Simulação para vidro simples de 3mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

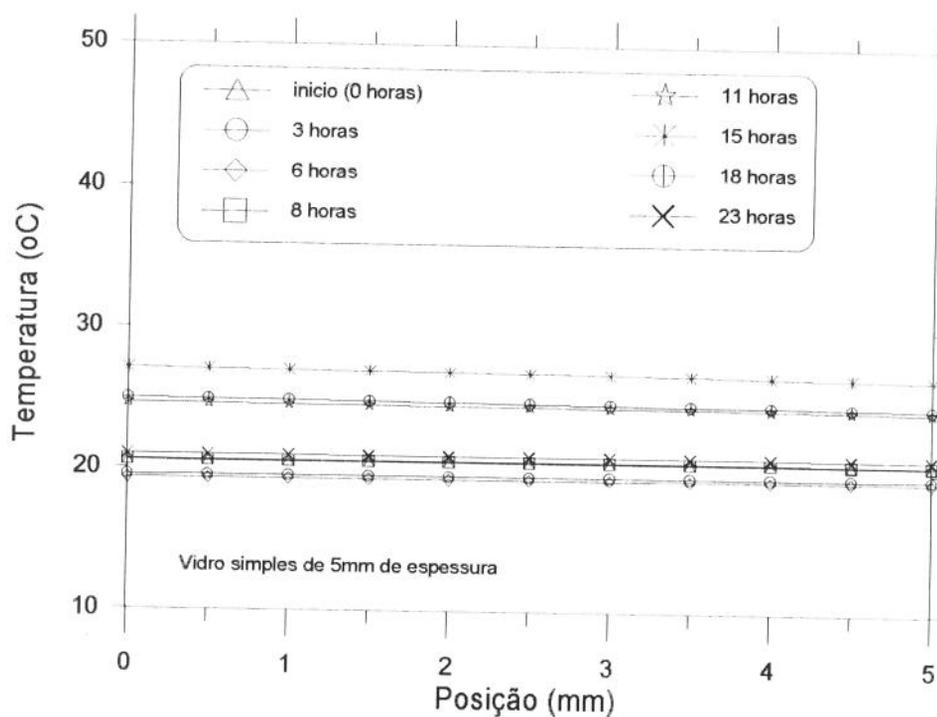


(a)

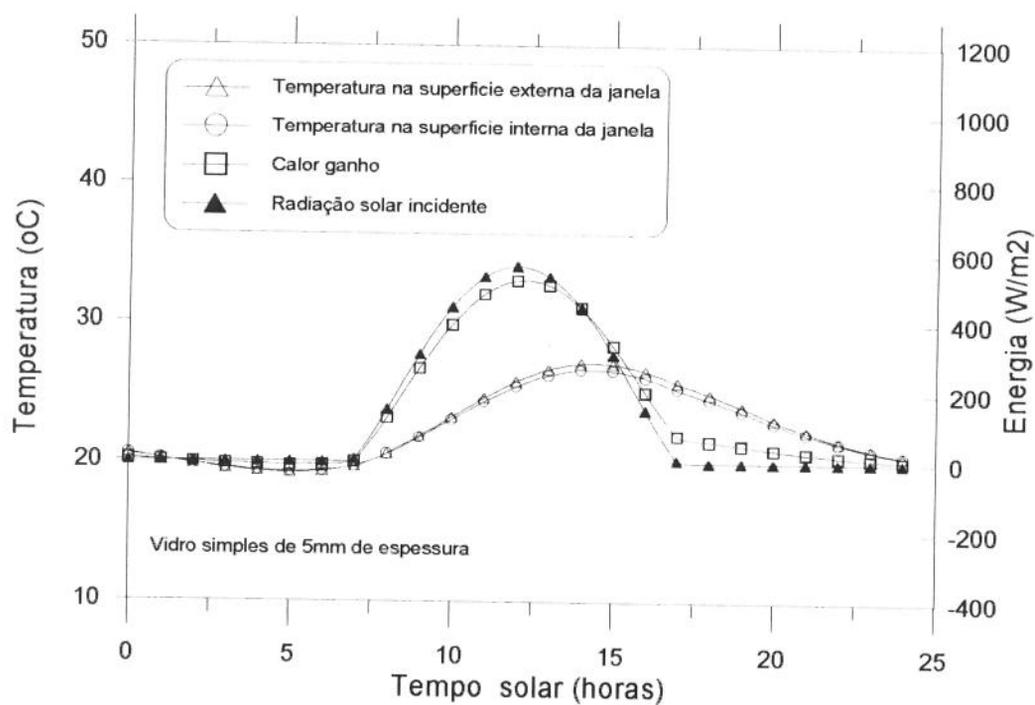


(b)

**Figura 6.2:** Simulação para vidro simples de 4mm de espessura, (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

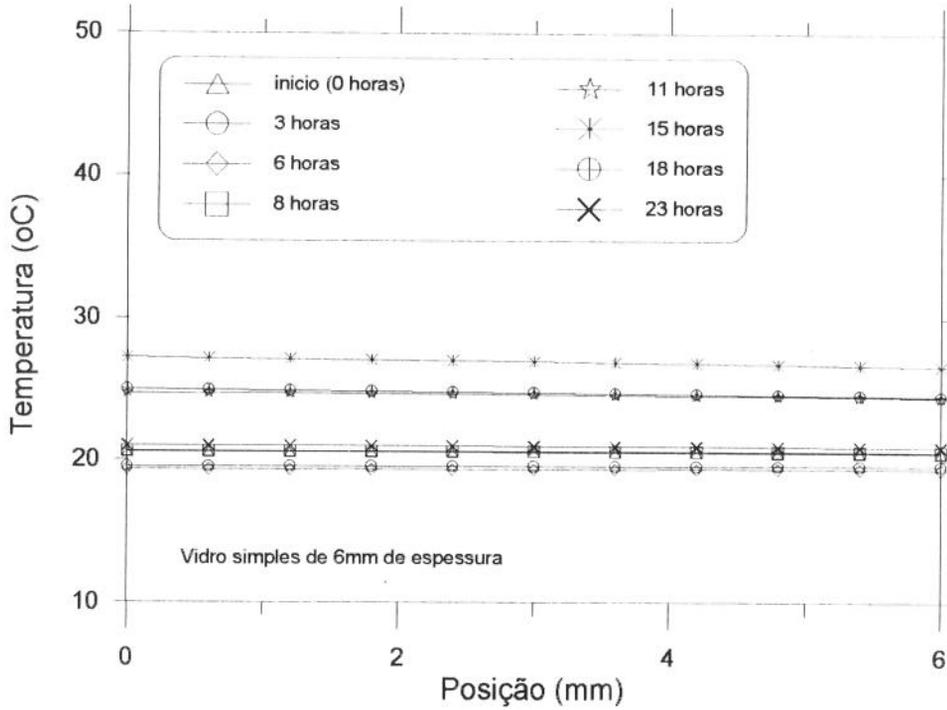


(a)

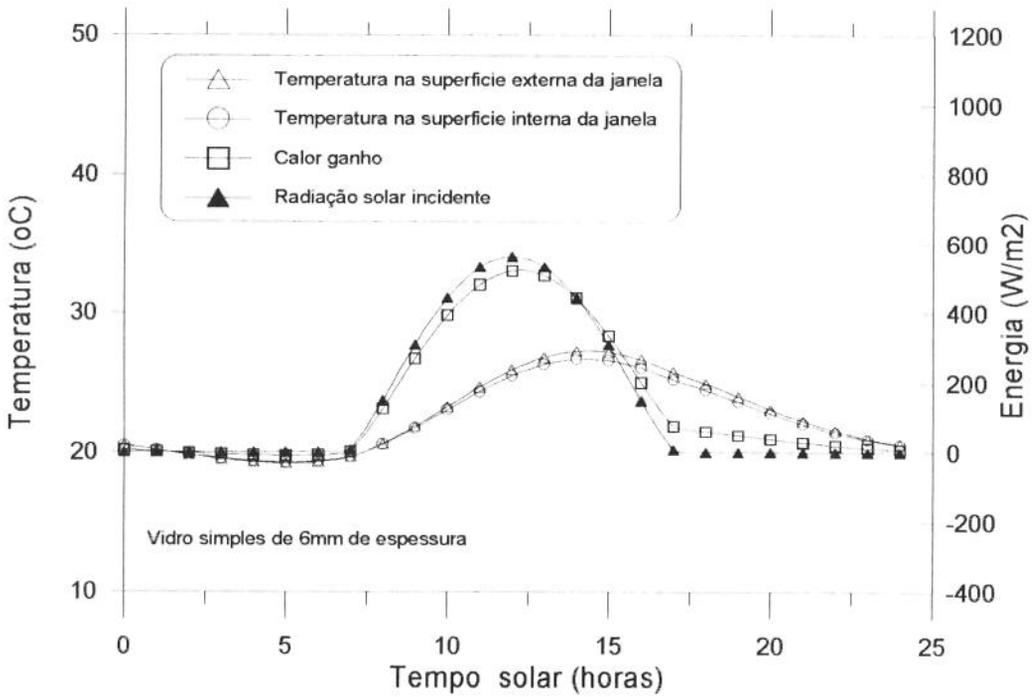


(b)

**Figura 6.3:** Simulação para vidro simples de 5mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

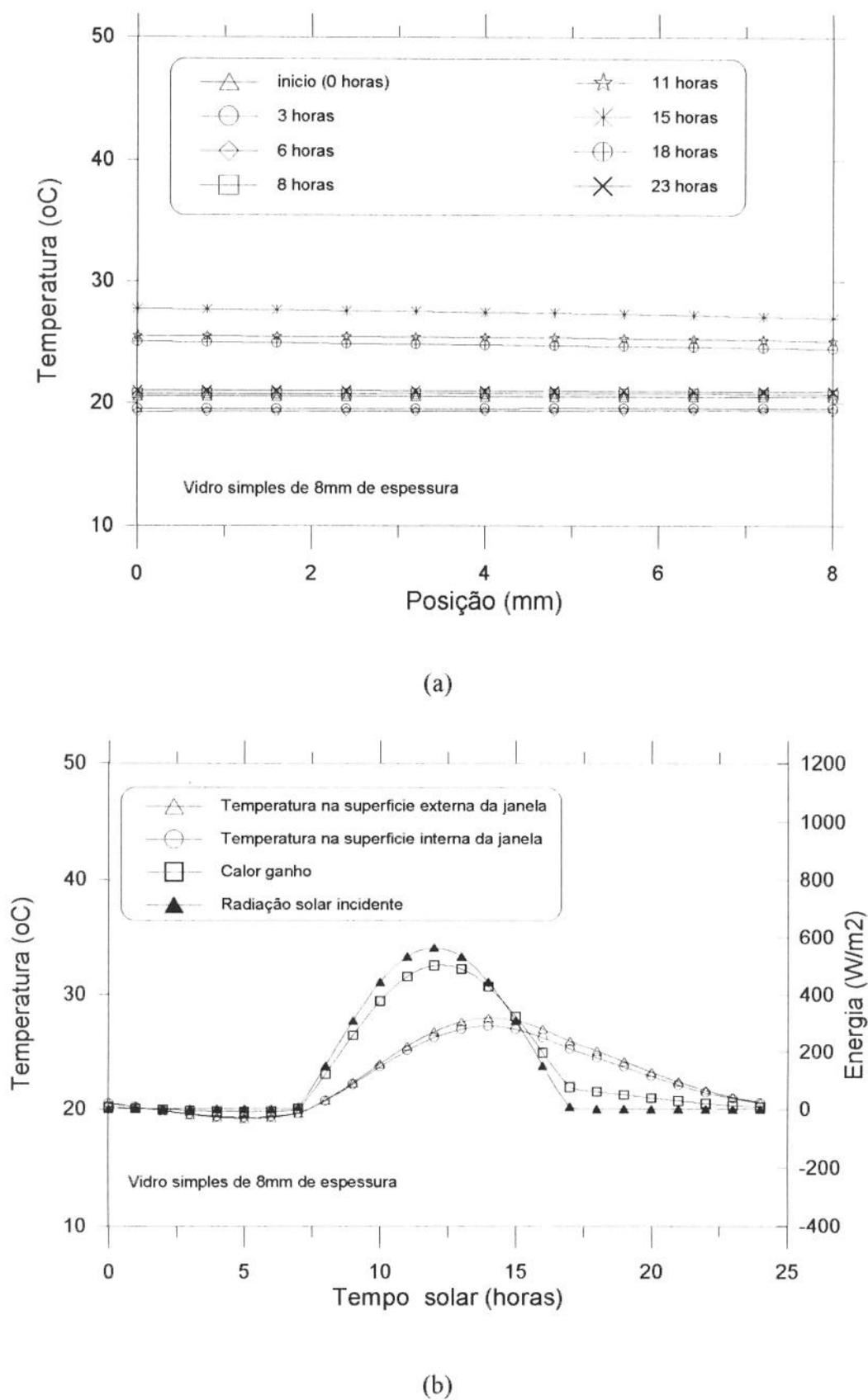


(a)



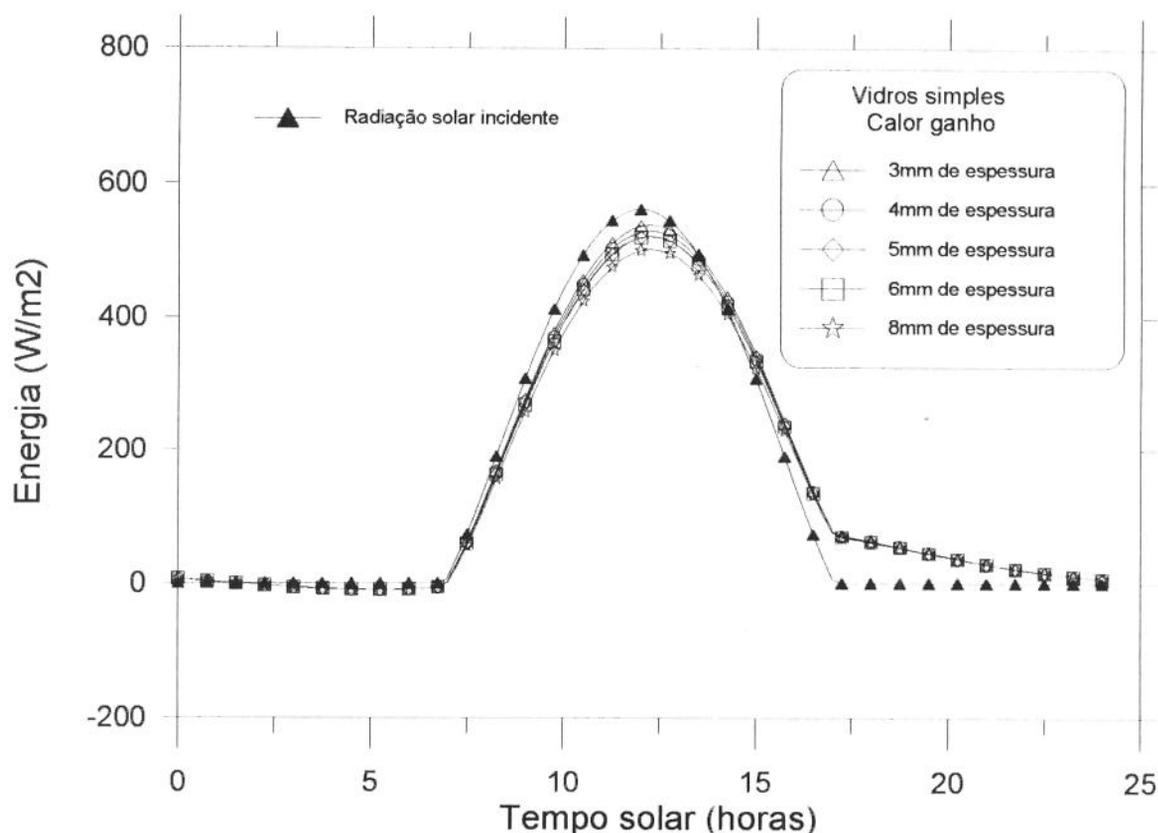
(b)

**Figura 6.4:** Simulação para vidro simples de 6mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor



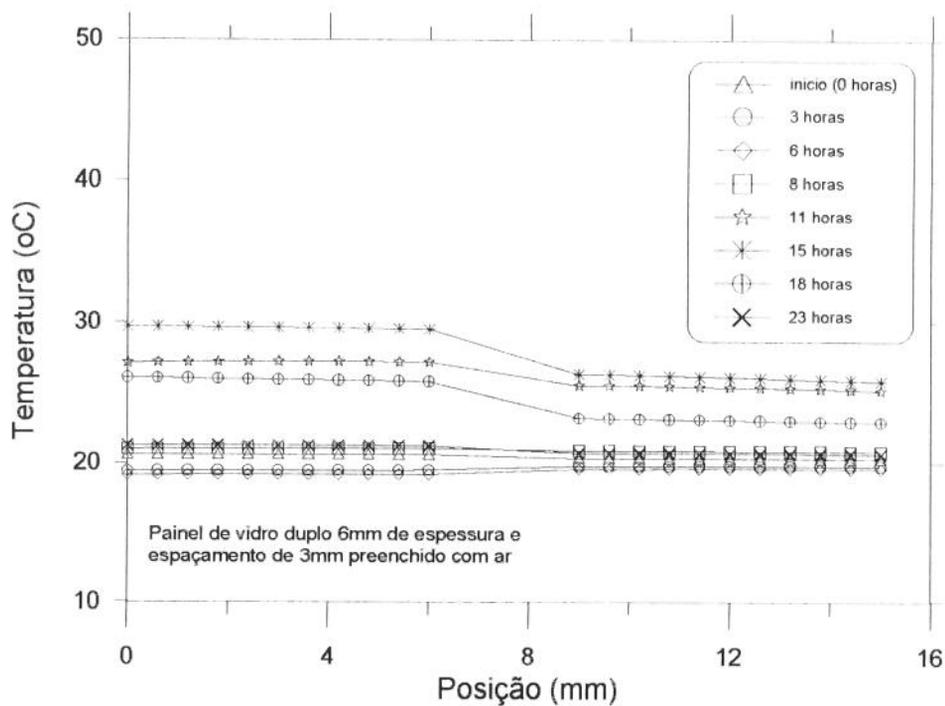
**Figura 6.5:** Simulação para vidro simples de 8mm de espessura; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor

Na figura (6.6) mostra um gráfico com o resumo dos resultados do ganho de calor para um conjunto de vidros comerciais de diferentes espessuras e que são normalmente usados para janelas. A redução do ganho de calor devido ao uso de um vidro de 8mm de espessura é pequena quando comparada ao de 3mm e a radiação solar incidente.

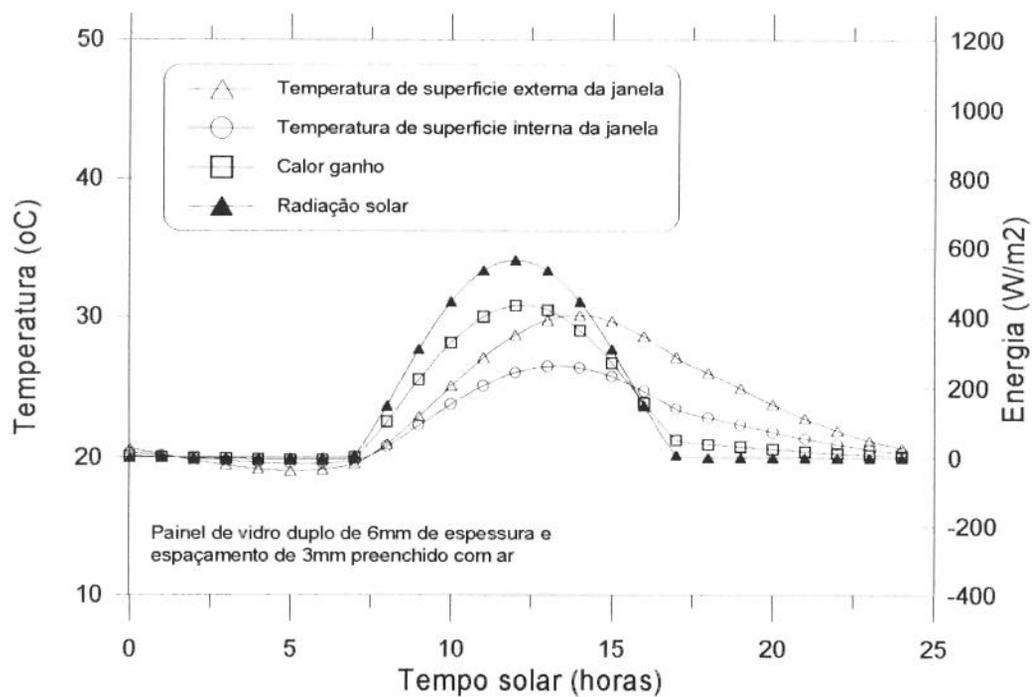


**Figura 6.6:** Ganho de calor para vidros simples de diferentes espessuras

Num segundo estágio foram simulados os painéis de vidro duplo preenchido com ar. As configurações utilizadas compreendem painéis de vidro duplo com espessura de vidro de 6mm e espaçamento variável, e painéis de vidro duplo com espessura de vidro variável e espaçamento fixo de 3mm. Inicialmente são feitas as simulações para espaçamentos de 3, 6 e 8mm de modo a verificar o efeito do espaçamento no desempenho térmico do sistema. Os resultados se encontram nas figuras (6.7) a (6.9) e mostram, quando comparados aos painéis de vidro simples, uma performance melhor no que diz respeito à transmissão de energia através do sistema. Esta melhora no desempenho deve ser atribuída à camada de ar como pode ser visto das curvas de distribuição de temperatura, onde o campo de temperatura no vidro interno é de uma ordem de grandeza menor que o do vidro externo.

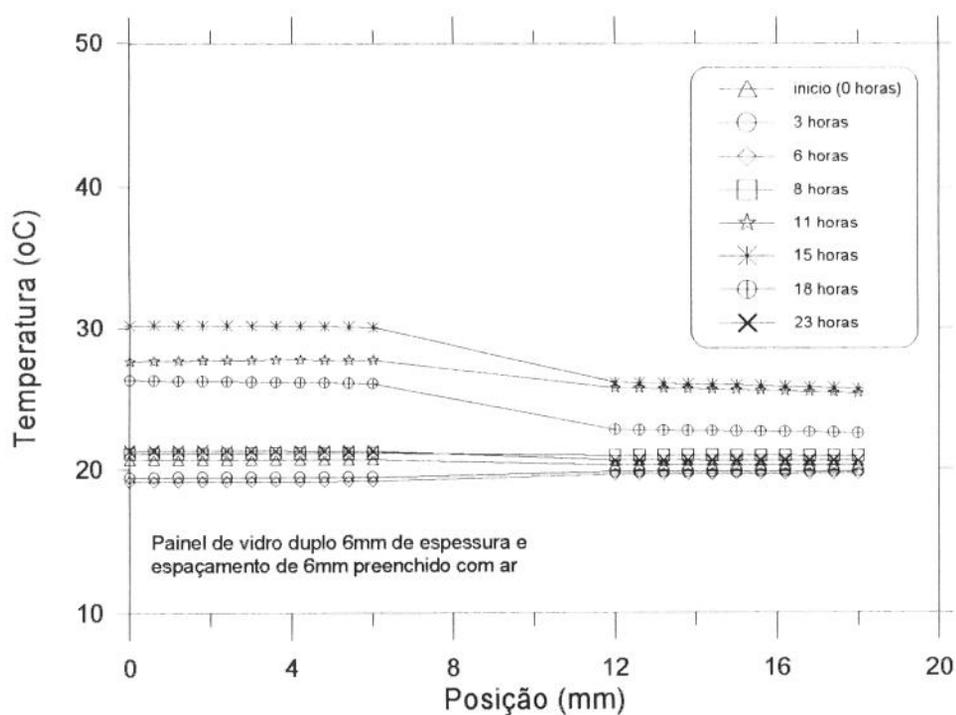


(a)

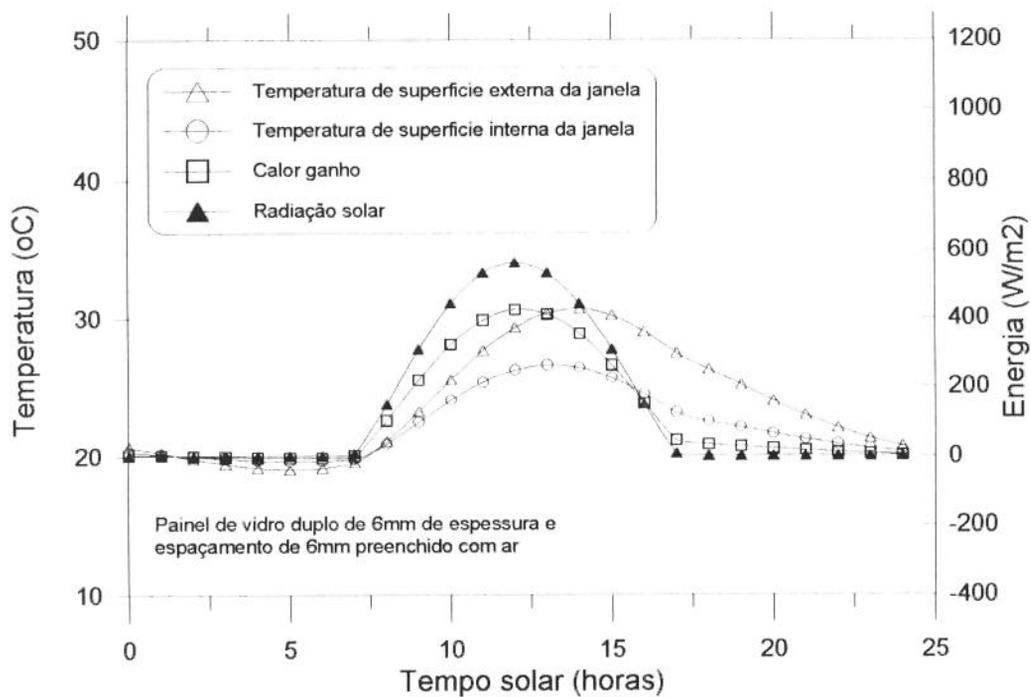


(b)

**Figura 6.7:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

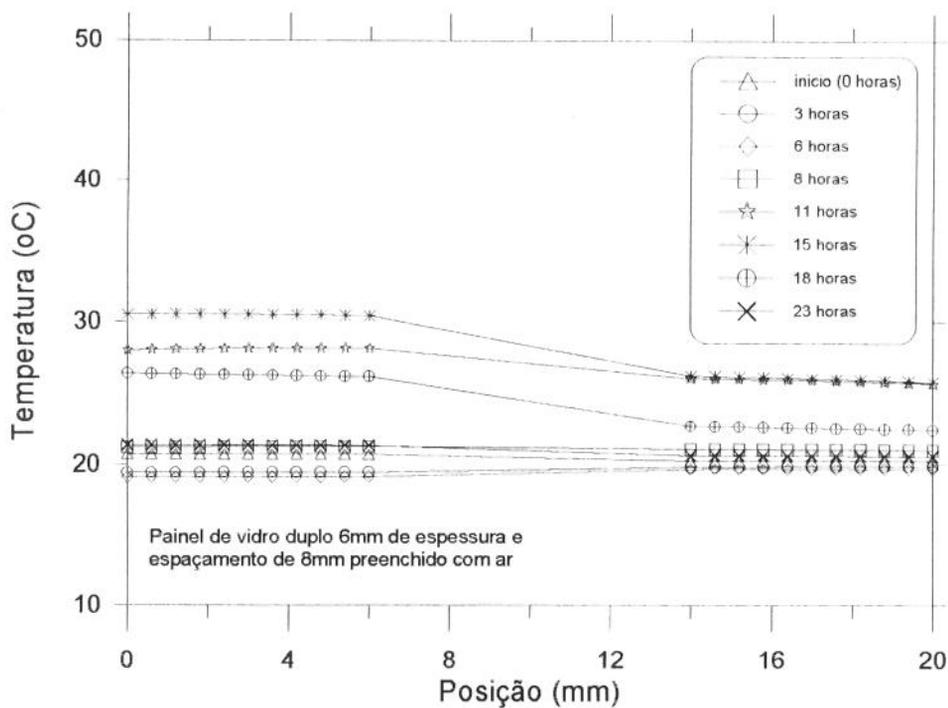


(a)

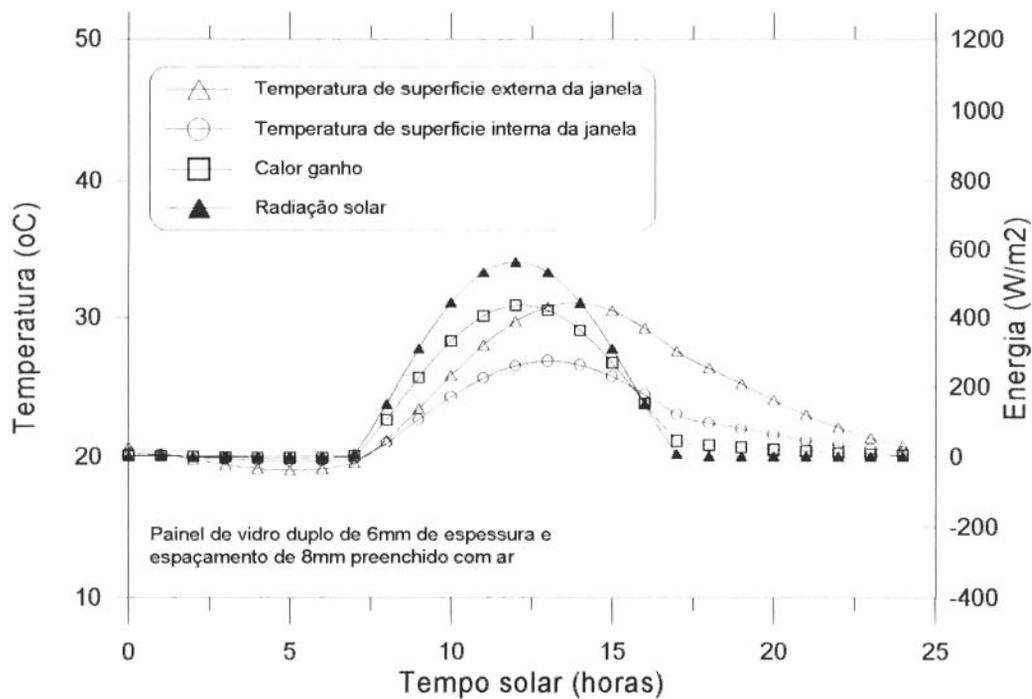


(b)

**Figura 6.8:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 6mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor



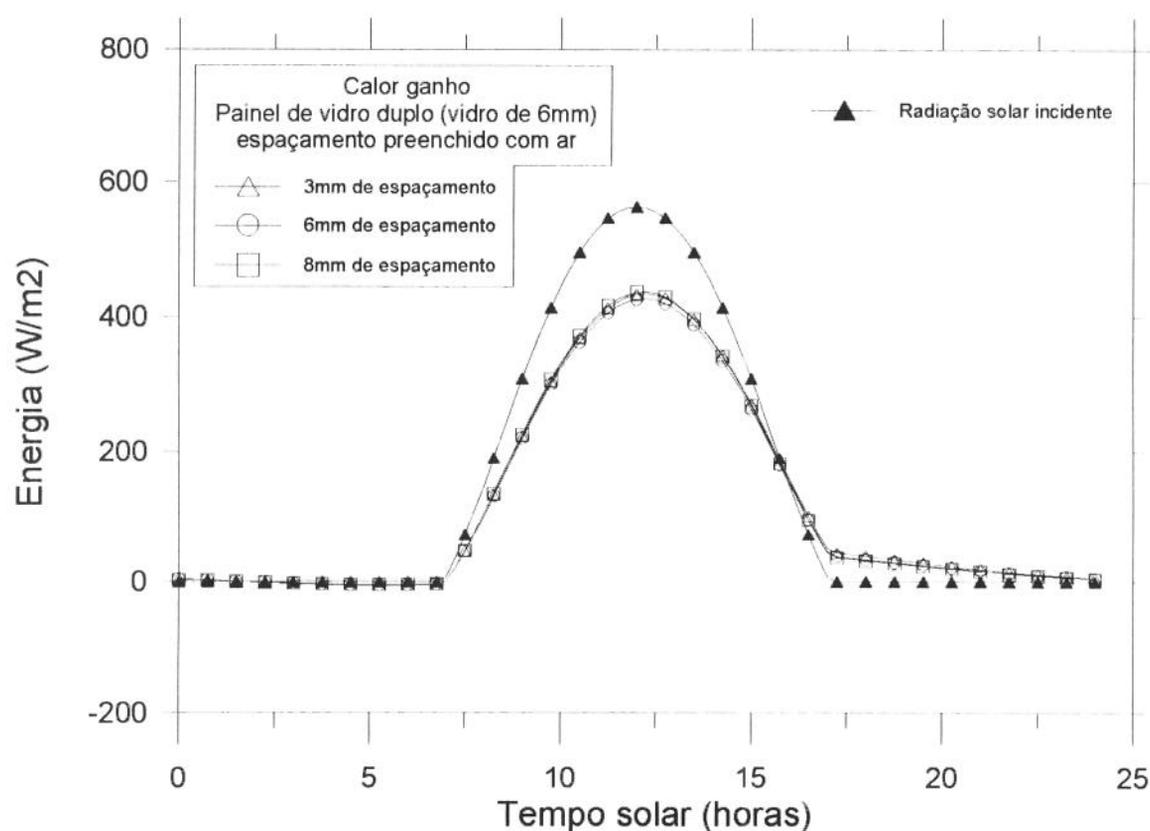
(a)



(b)

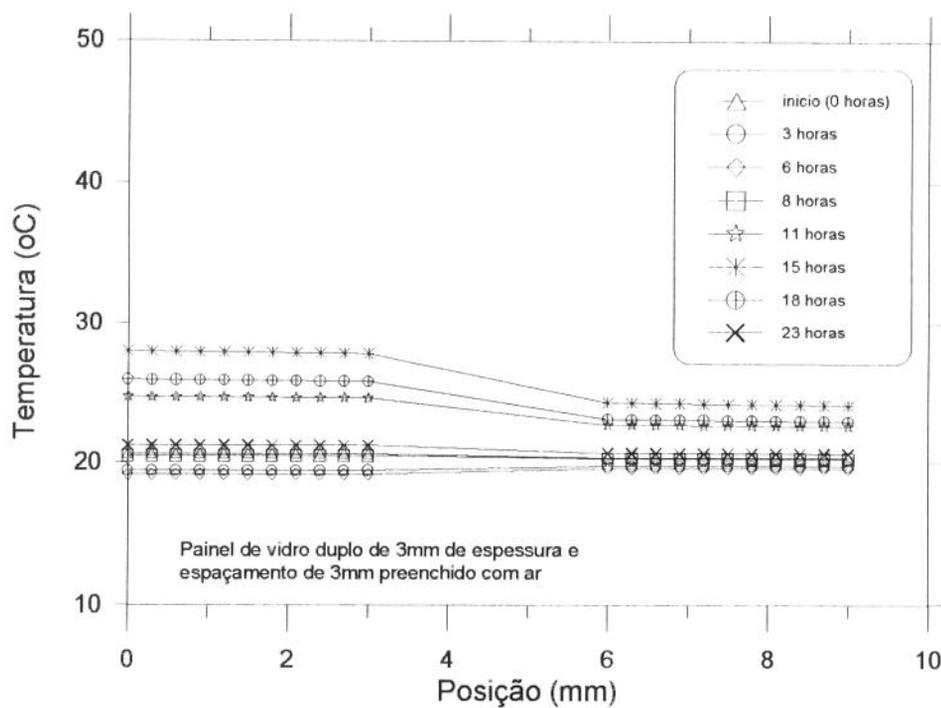
**Figura 6.9:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 8mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor

Na figura (6.10) é mostrado um gráfico com um resumo dos resultados de ganho de calor para sistemas formados por painéis de vidro duplo preenchidos com ar. A espessura do vidro é de 6mm e o espaçamento é variável. Comparando as curvas de ganho de calor com a radiação solar incidente vemos que o sistema apresenta uma boa performance no que se refere à redução da carga térmica ao mesmo tempo que o aumento da camada de ar parece não ter influência neste parâmetro.

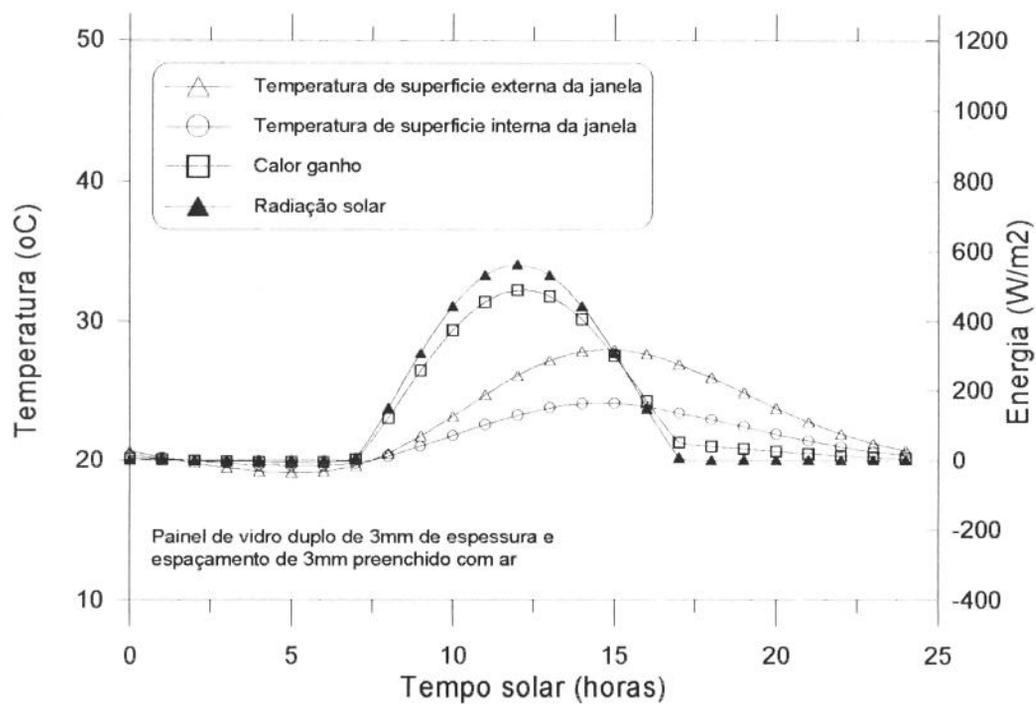


**Figura 6.10:** Ganho de calor para painéis de vidro duplo preenchido com ar, vidro de 6mm e espaçamento variável.

As figuras (6.11) a (6.14) mostram os resultados para as simulações dos painéis de vidros duplos com espaçamento fixo de 3mm, no qual as espessuras de vidros é variada desde 3mm até 8mm. Estas configurações também apresentam uma boa redução na carga térmica como mostra o resumo dos resultados na figura (6.15) quando comparadas as curvas de ganho de calor com a curva de energia incidente.

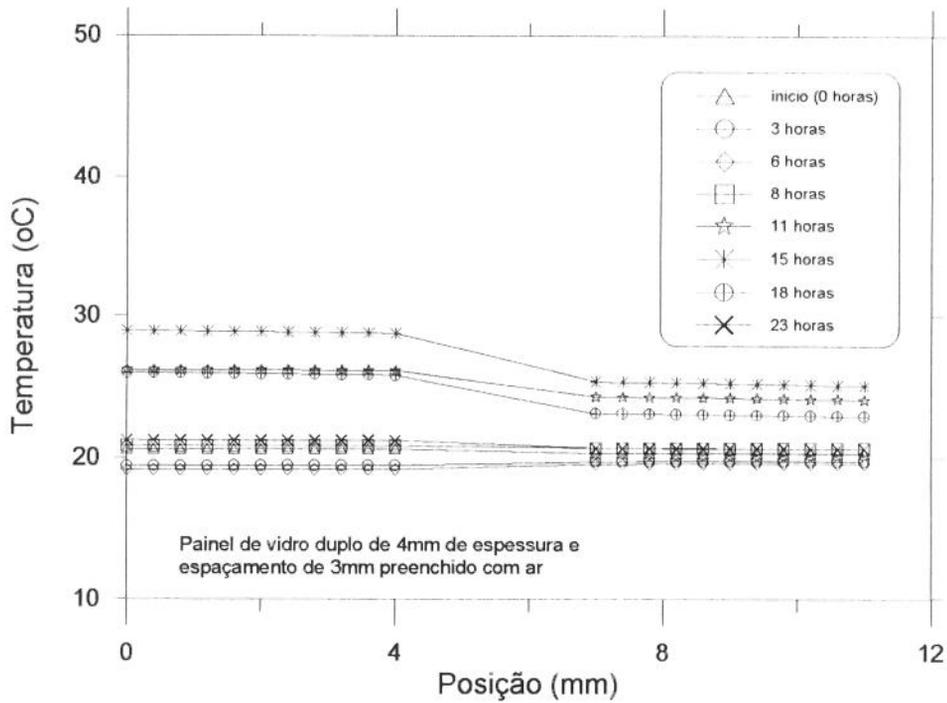


(a)

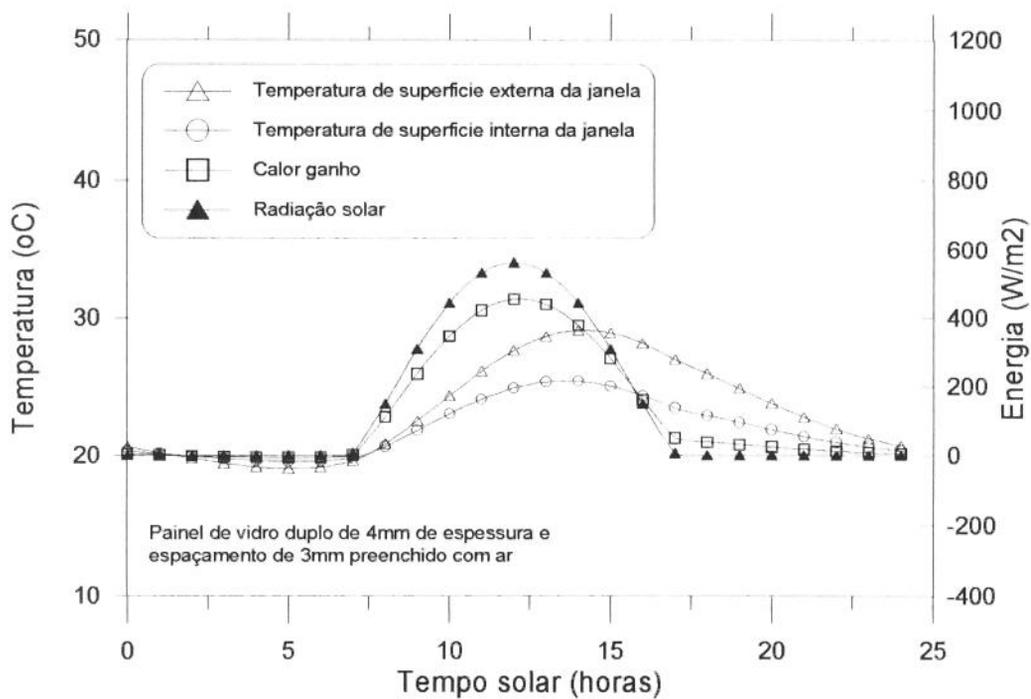


(b)

**Figura 6.11:** Simulação para painel de vidro duplo de 3mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

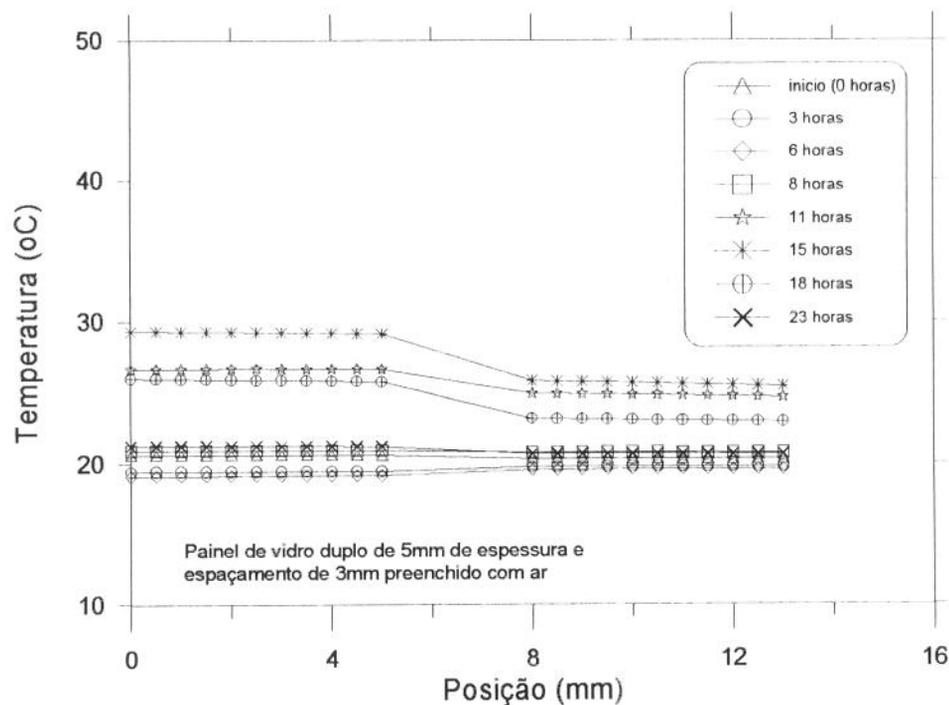


(a)

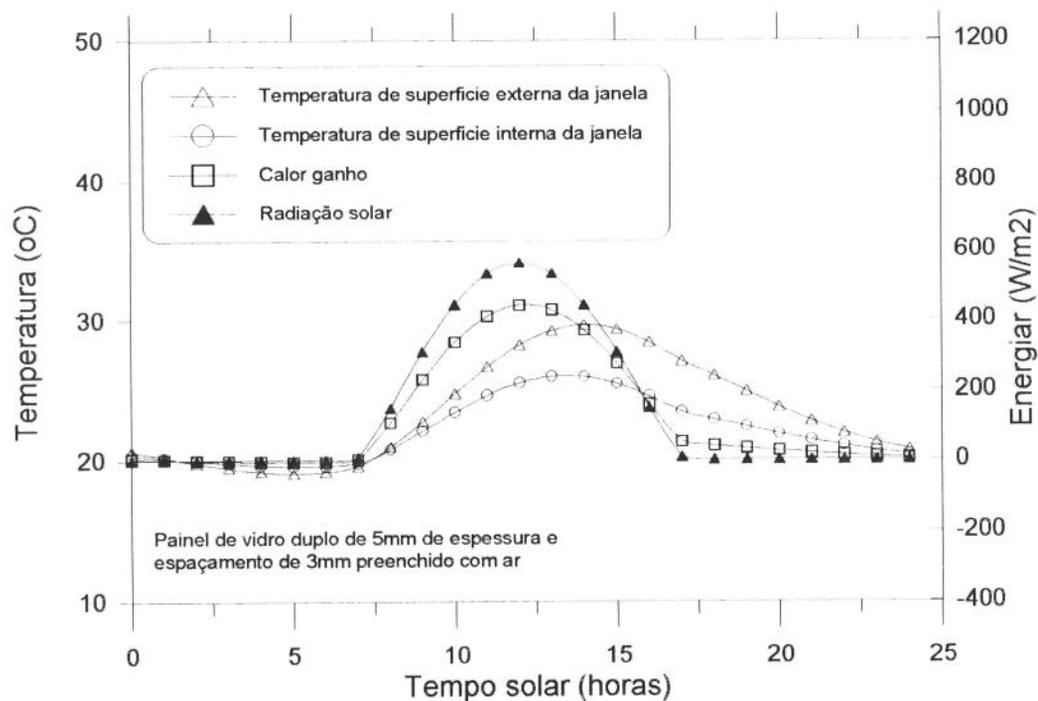


(b)

**Figura 6.12:** Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

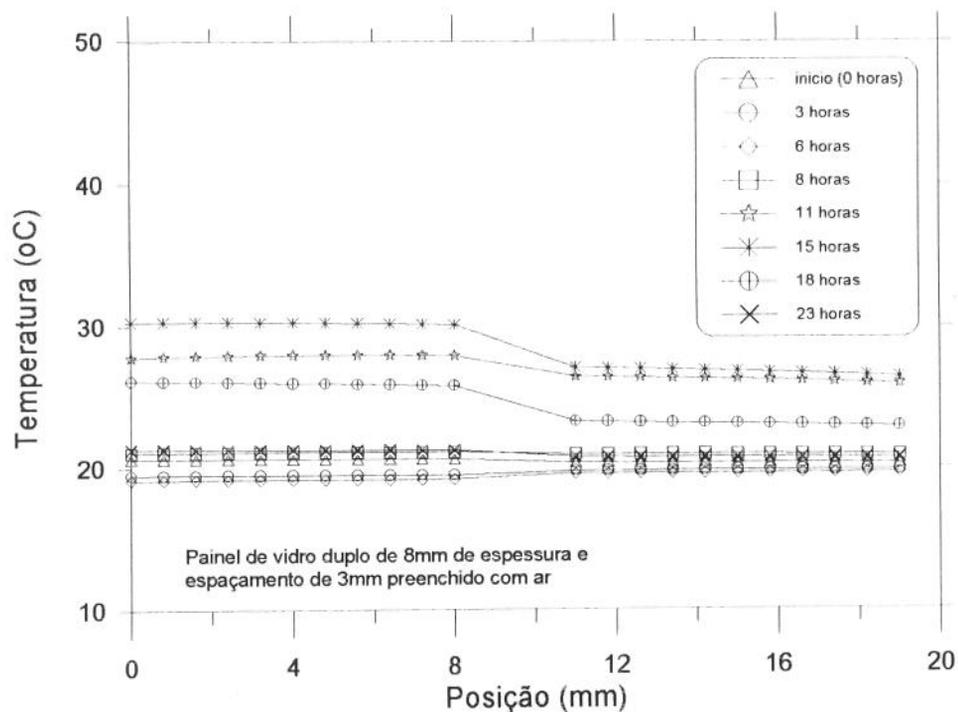


(a)

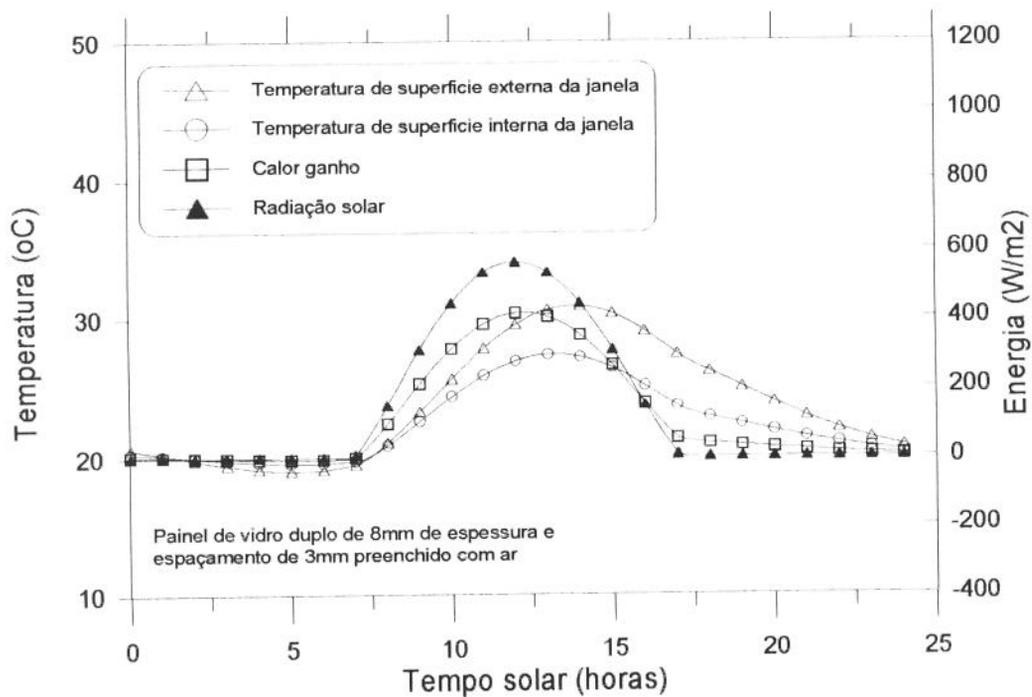


(b)

**Figura 6.13:** Simulação para painel de vidro duplo de 5mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

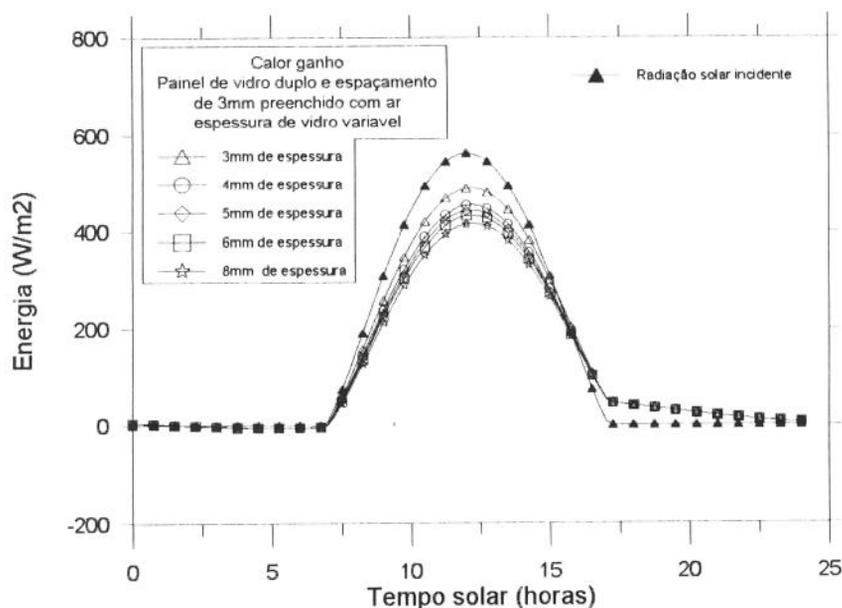


(a)



(b)

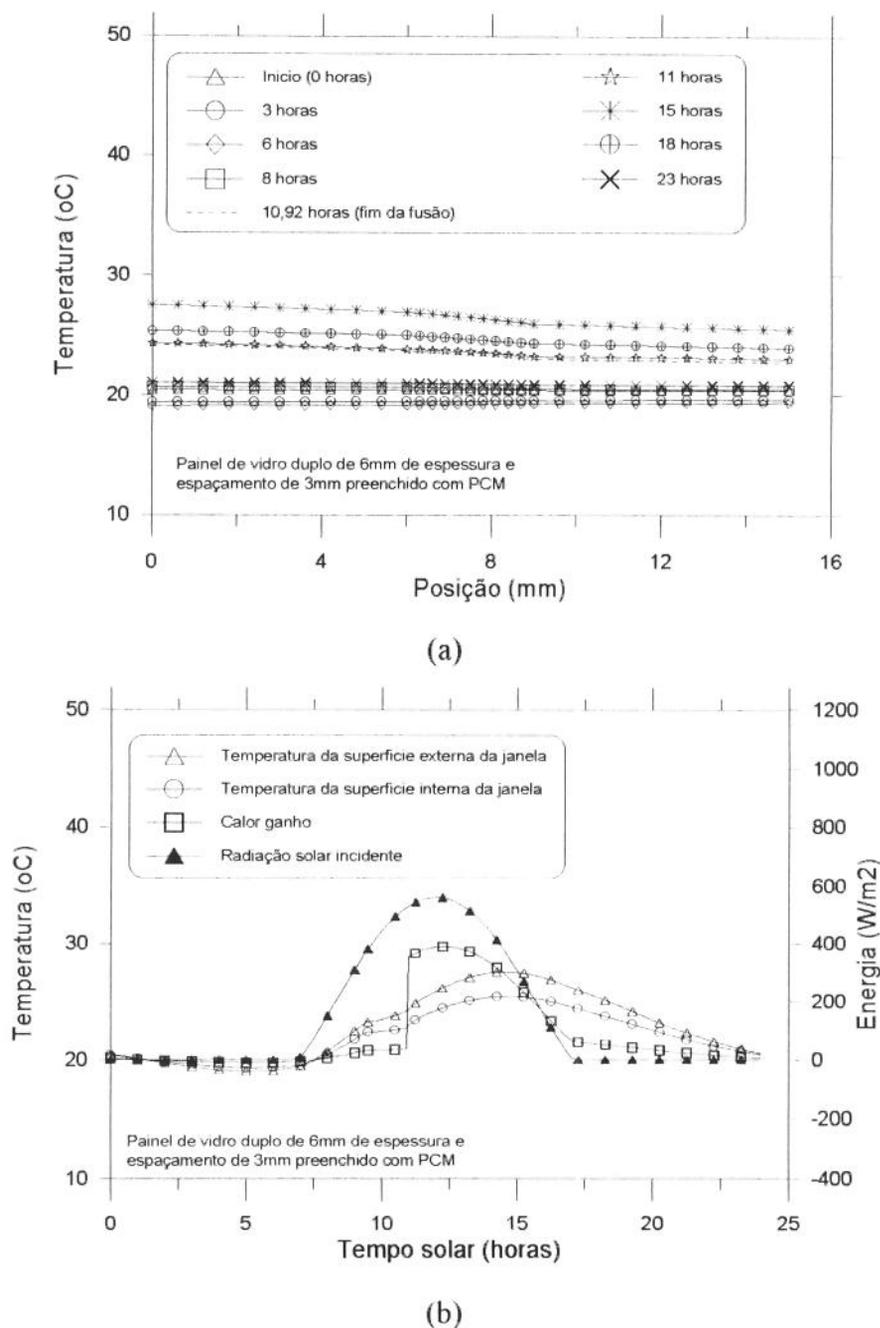
**Figura 6.14:** Simulação para painel de vidro duplo de 8mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com ar; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor



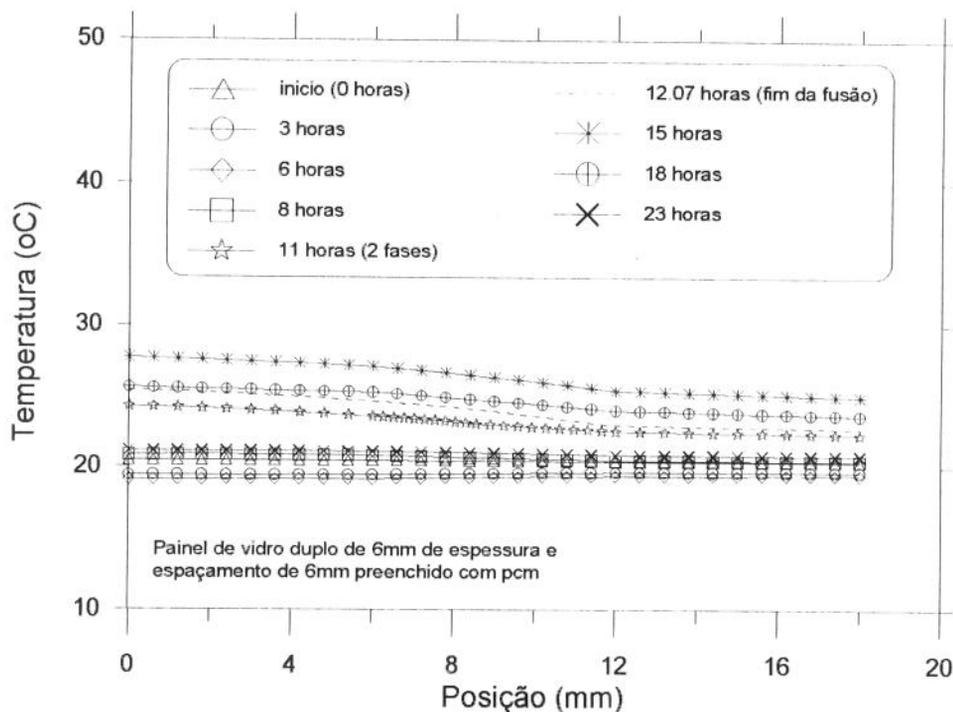
**Figura 6.15:** Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com ar, espaçamento fixo de 3mm e espessura do vidro variável

Também foram feitas simulações com painéis de vidro duplo preenchidos com pcm de forma a verificar o efeito da inclusão de material de mudança de fase entre os dois vidros, além disto o espaçamento foi variado desde 3mm até 15mm com a finalidade de investigar o desempenho térmico do painel em função da espessura da camada de pcm e poder comparar este com os resultados obtidos para o caso de vidro duplo com ar. Os resultados são mostrados nas figuras (6.16) a (6.19), onde, no gráfico correspondente à distribuição de temperatura, a linha tracejada representa o tempo final da fusão a partir do qual o material de mudança de fase encapsulado está totalmente líquido. Este tempo é um parâmetro bastante importante pois enquanto maior este é, melhor será o desempenho do sistema. Isto tem a ver com o fato de que enquanto coexistam as duas fases (sólido e líquido) do pcm, o calor vindo do meio ambiente externo será armazenado na camada de pcm e isto se traduz em uma menor carga térmica entrando no meio ambiente interno. Naturalmente como é de se esperar o aumento da camada de pcm corresponde um aumento deste tempo, por exemplo, para uma espessura de pcm de 3mm e nas condições assumidas na simulação o material estará totalmente líquido aproximadamente as 11 horas (solar), já para uma espessura de 15mm este tempo é aumentado para próximo das 13 horas (solar). Comparando qualitativamente os resultados obtidos com o painel duplo preenchido com pcm, com os resultados para painel duplo com ar e vidro simples, podemos observar a partir das curvas de ganho de calor, que a inclusão de pcm entre dois vidros representa uma melhora considerável no desempenho térmico. Na

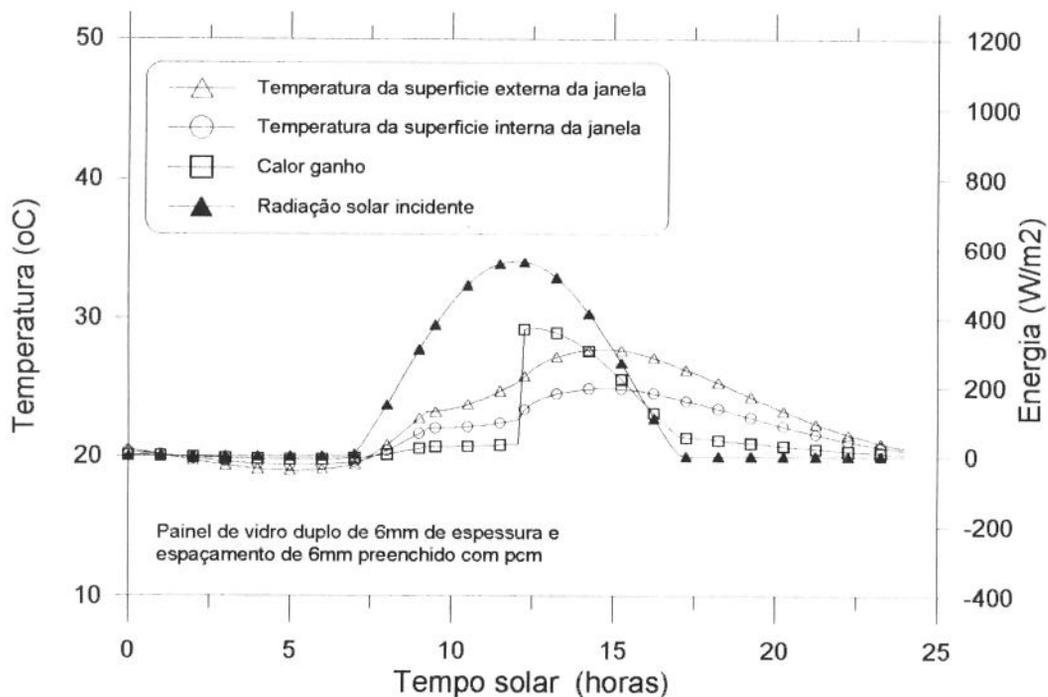
figura (6.20) é apresentado um gráfico com o resumo dos resultados obtidos com esta configuração e este mostra, qualitativamente, a redução do calor ganho com o aumento da espessura da camada de pcm



**Figura 6.16:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 3mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor

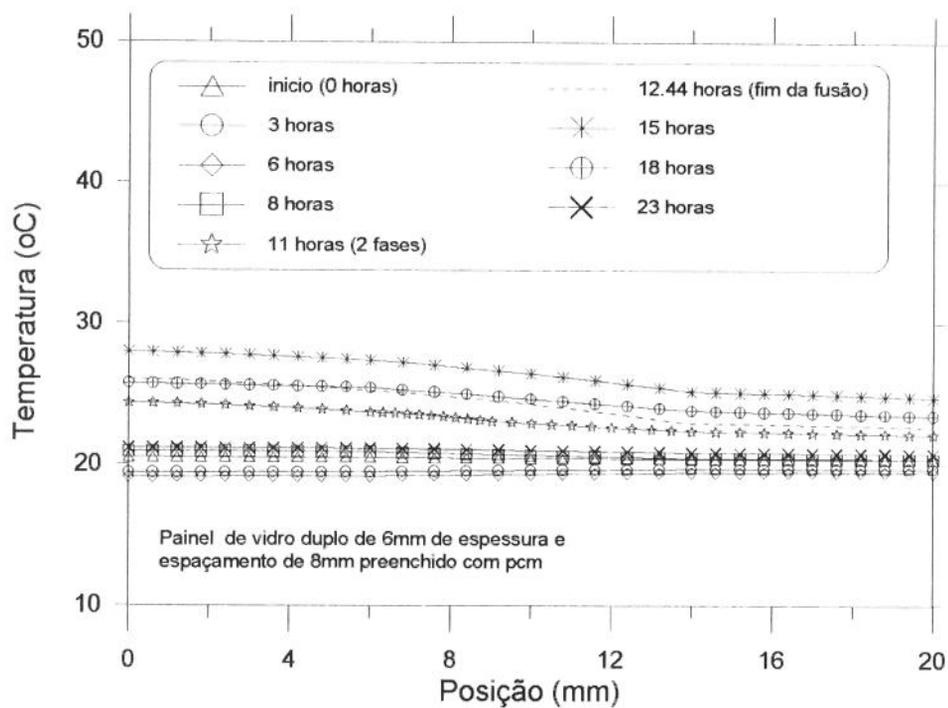


(a)

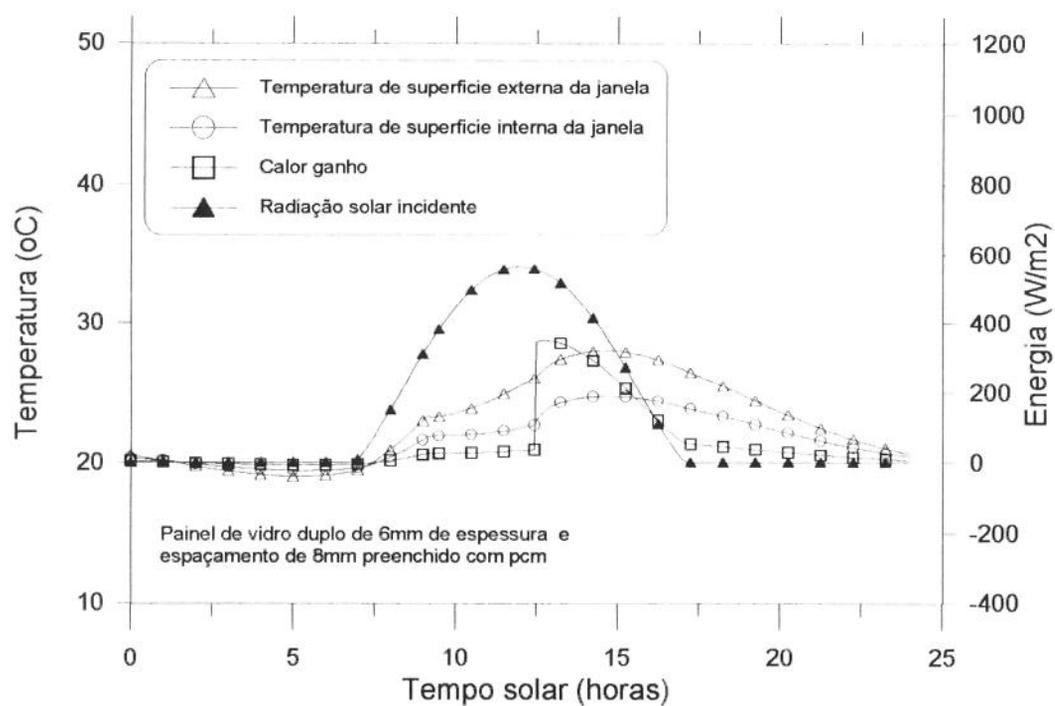


(b)

**Figura 6.17:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 6mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

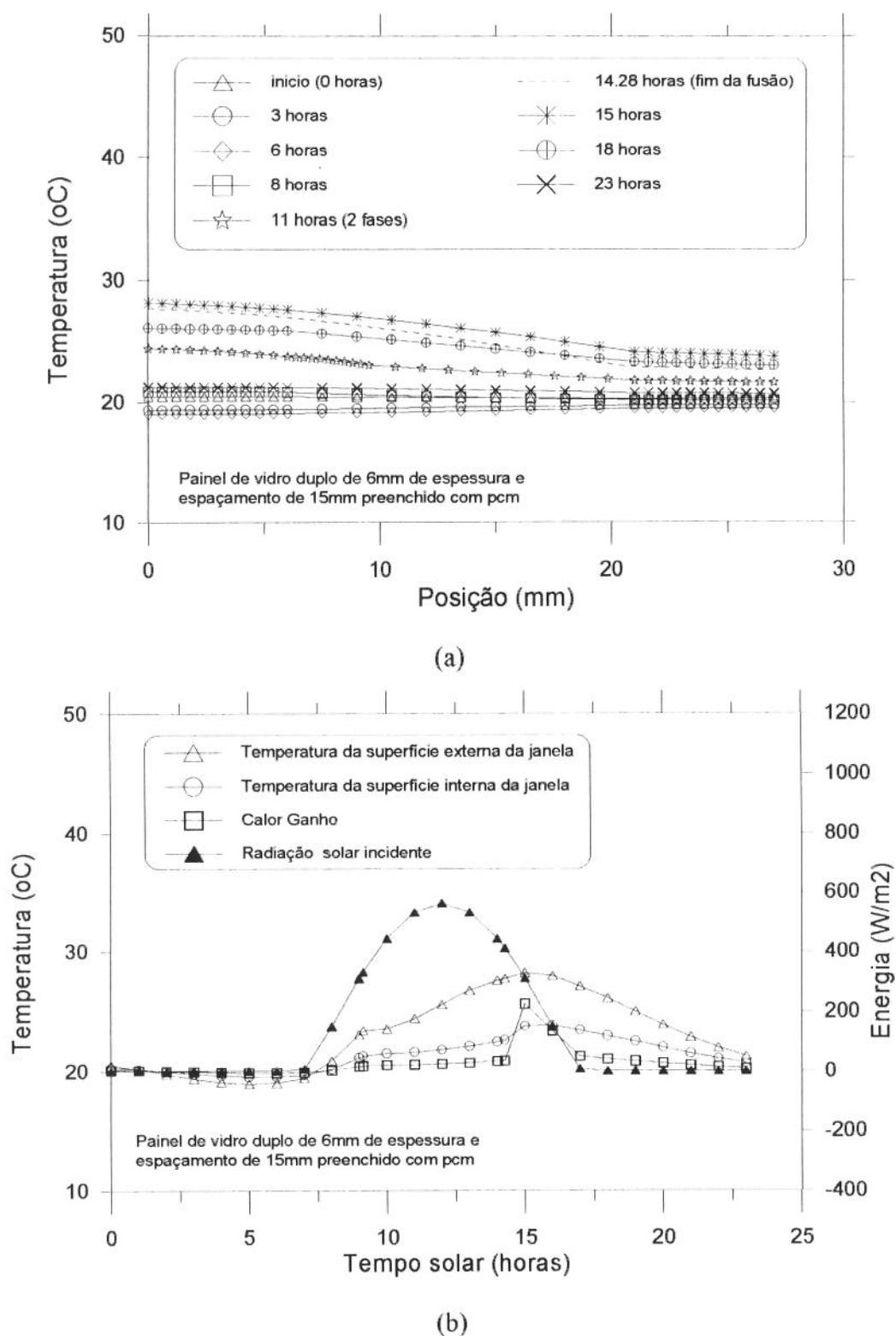


(a)

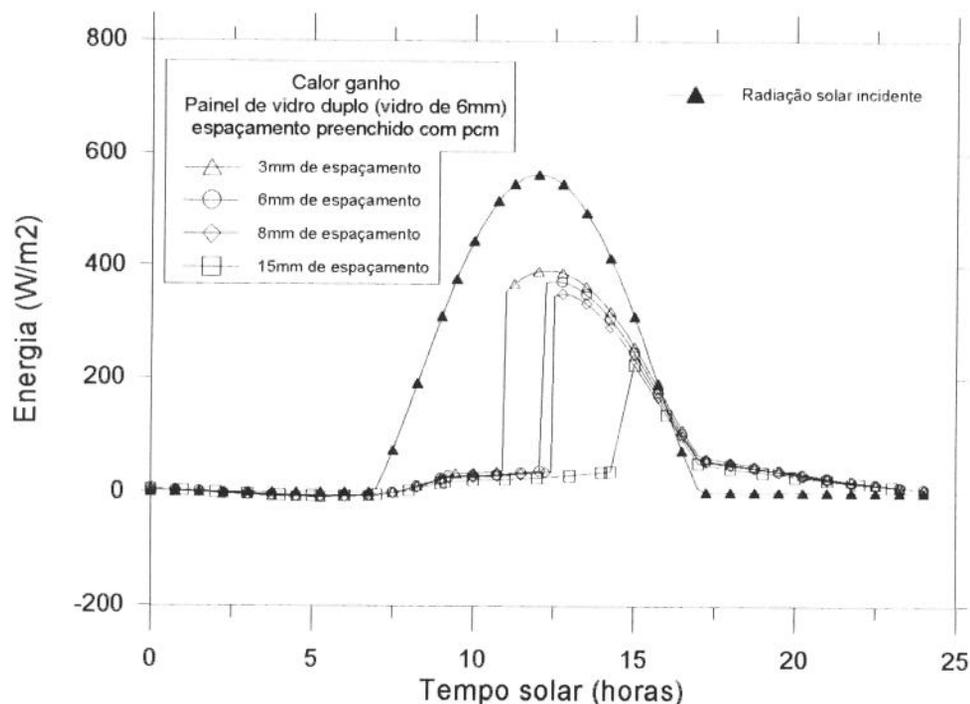


(b)

**Figura 6.18:** Simulação para painel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 8mm preenchido com pcm, (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor

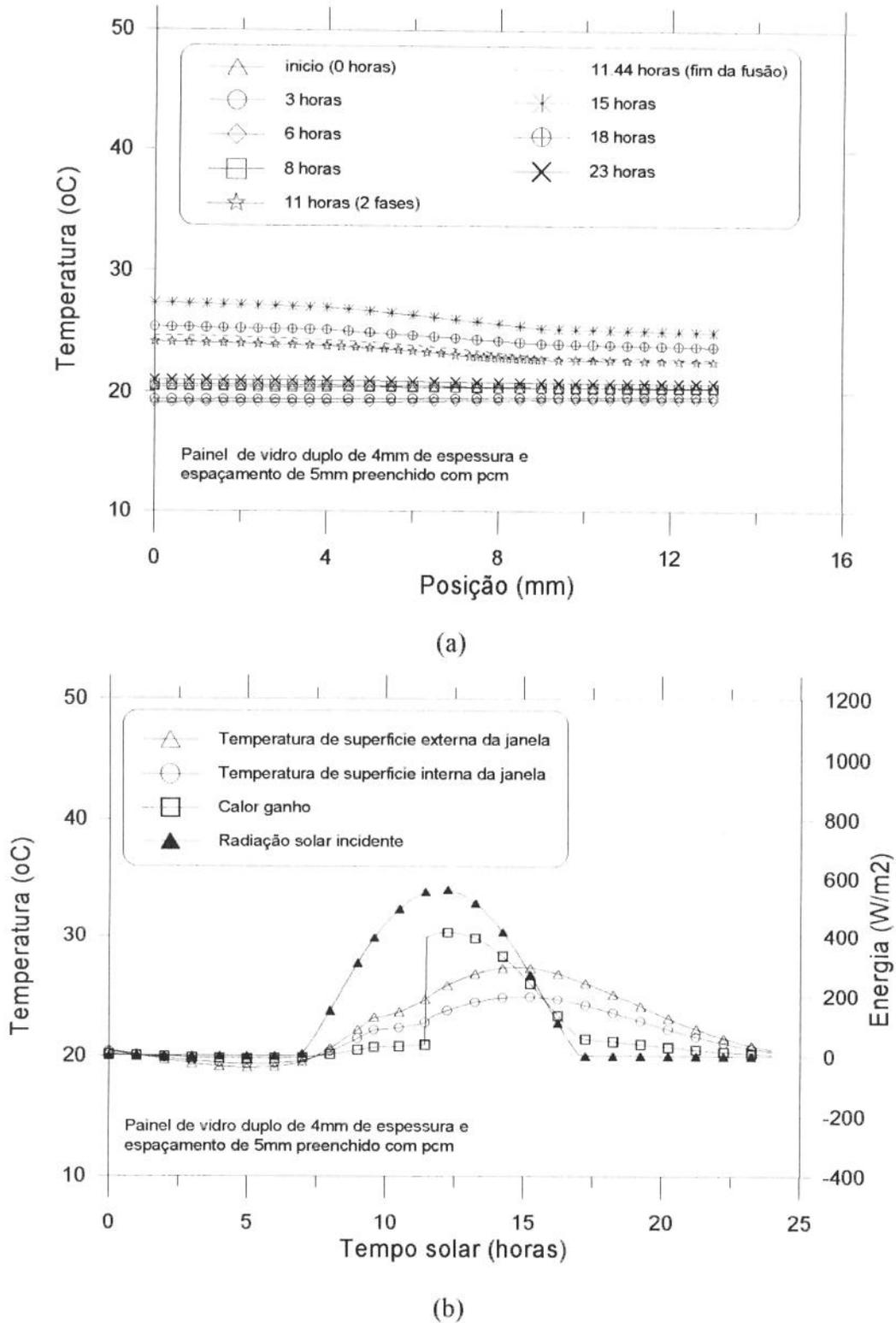


**Figura 6.19:** Simulação para pannel de vidro duplo de 6mm de espessura e espaçamento de 15mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor

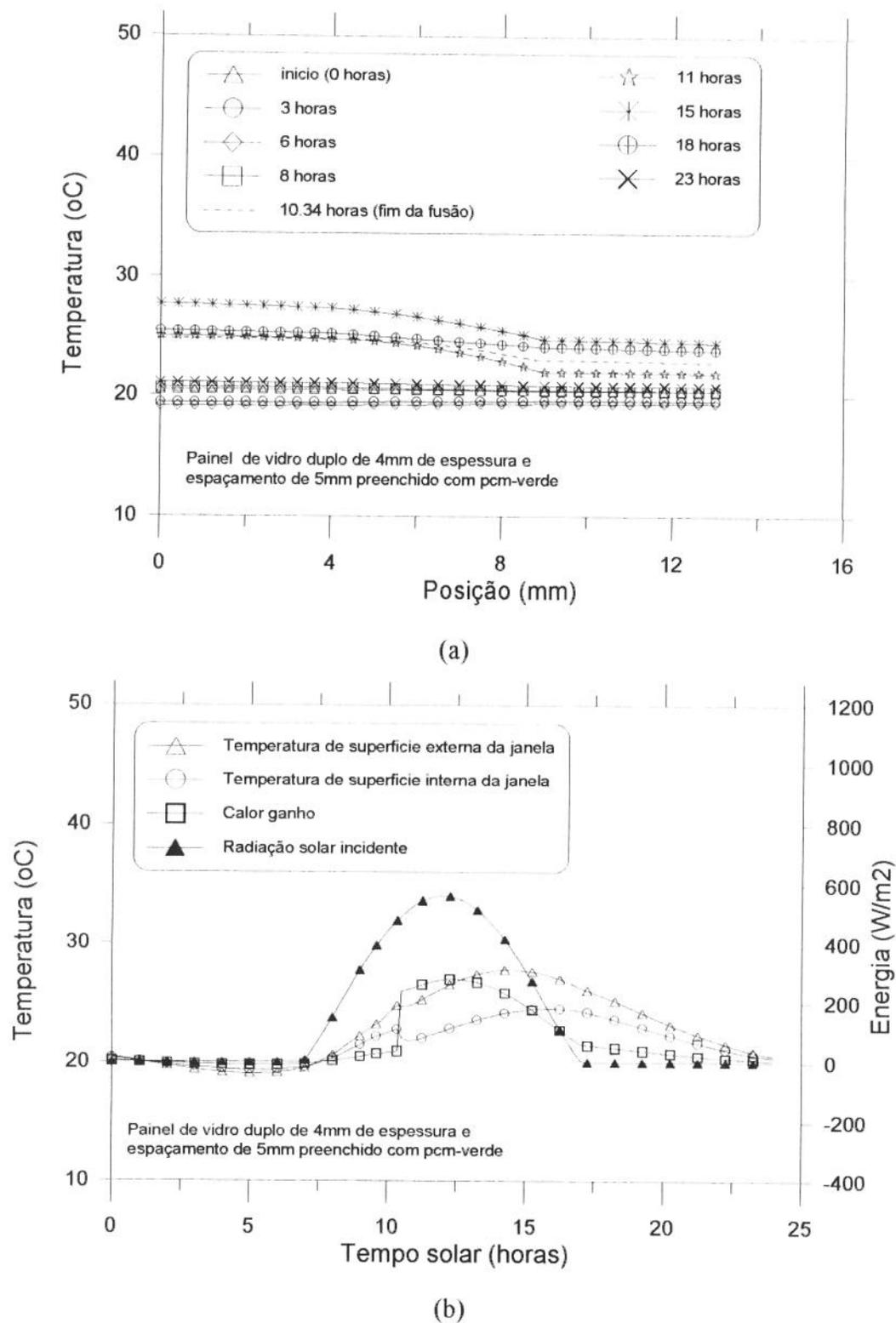


**Figura 6.20:** Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com pcm, vidro de 6mm de espessura e espaçamento variável

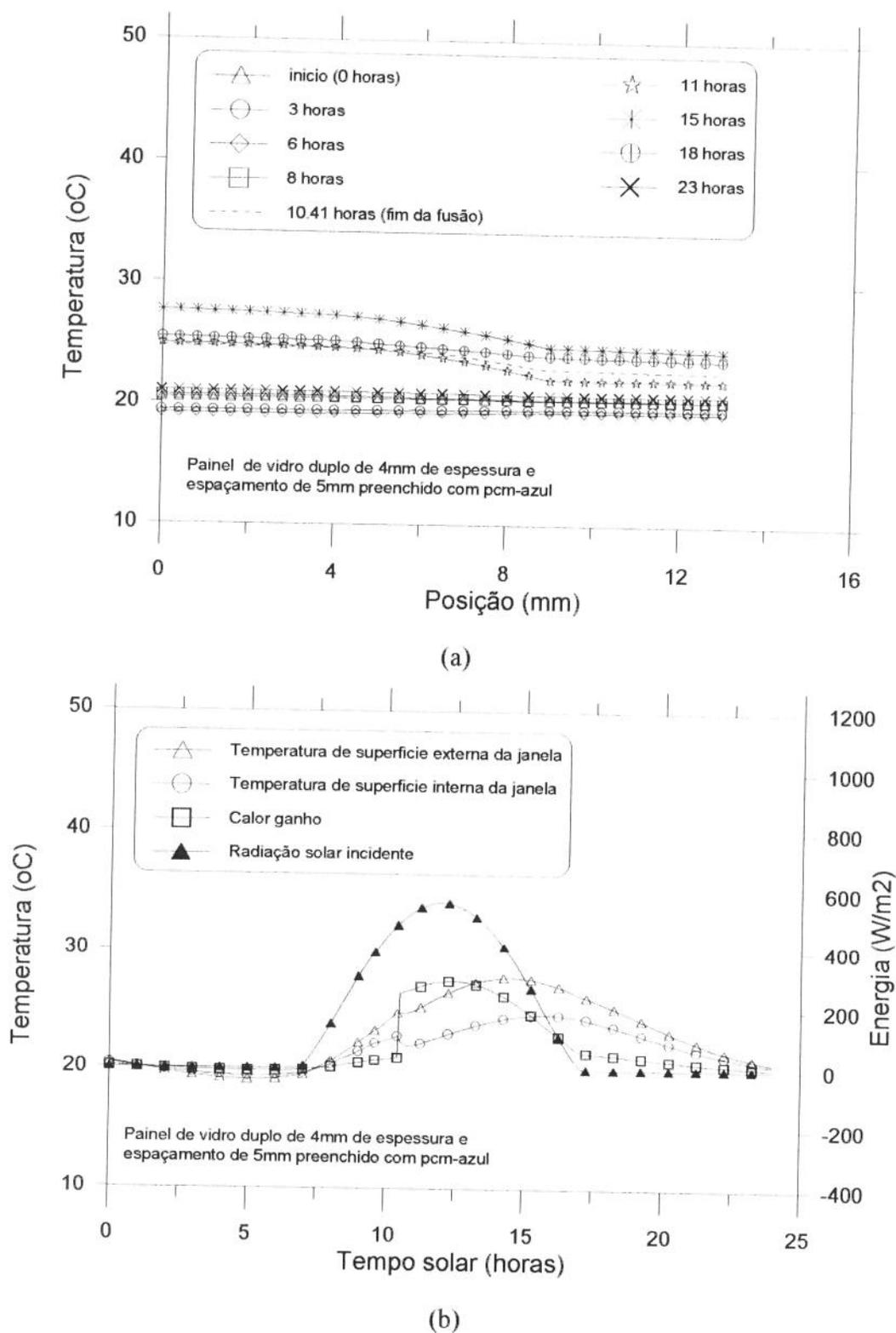
Simulações para painéis com pcm colorido também são feitas e os resultados estão nas figuras (6.21) a (6.23). A figura (6.21) mostra os resultados para pcm normal, enquanto que as figura (6.22) e (6.23) mostram os resultados para pcm verde e azul respectivamente. Nestes últimos três casos o sistema é formado por um painel de vidro duplo, onde a espessura do vidro é de 4mm e o espaçamento é de 5mm. Podemos observar que para os casos de pcm colorido, estes se fundem mais rápido que no caso do pcm sem cor. Isto se deve essencialmente a que o coeficiente de absorvância do pcm colorido é muito maior que o do pcm sem cor, de modo que estes concentram uma quantidade de energia bem maior na região do pcm. Porém este comportamento não se traduz necessariamente num pior desempenho. A explicação para isto é que o coeficiente de transmitância do pcm colorido é menor que o do pcm sem cor, e deste modo o pior desempenho térmico do painel com pcm colorido em relação ao painel com pcm sem cor é compensado por um melhor desempenho ótico e a soma destes dois efeitos é favorável ao caso do painel com pcm colorido. A figura (6.24) mostra um resumo destes resultados.



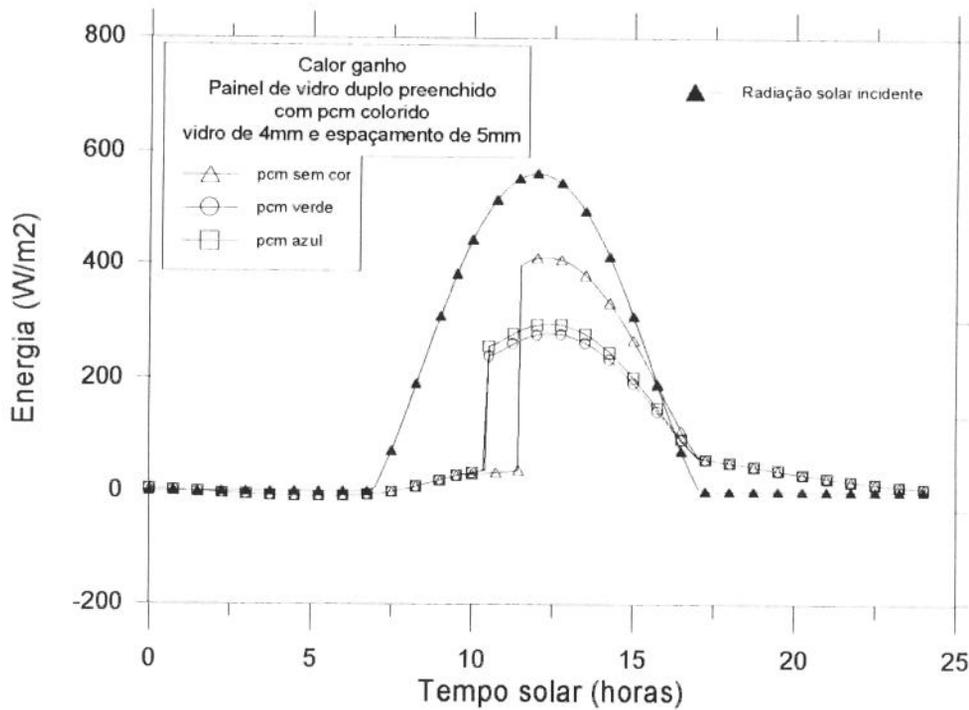
**Figura 6.21:** Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfícies externa e interna, e ganho de calor



**Figura 6.22:** Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm-verde; (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor



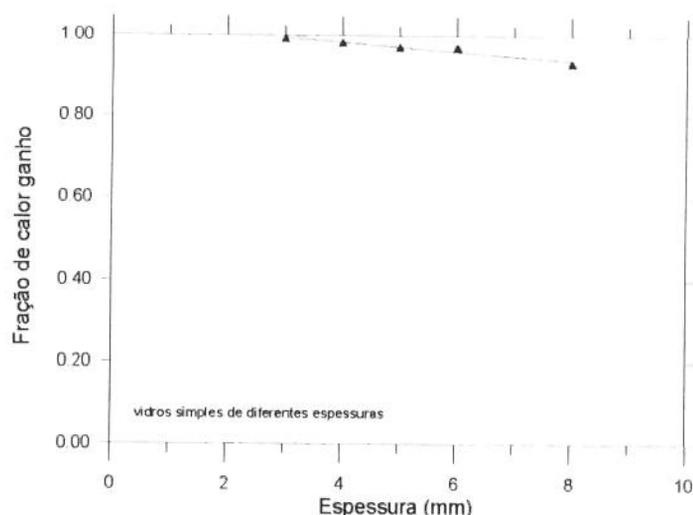
**Figura 6.23:** Simulação para painel de vidro duplo de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm preenchido com pcm-azul, (a) distribuição de temperatura, (b) temperaturas nas superfície externa e interna, e ganho de calor



**Figura 6.24:** Ganho de calor para painel de vidro duplo preenchido com pcm colorido, vidro de 4mm de espessura e espaçamento de 5mm.

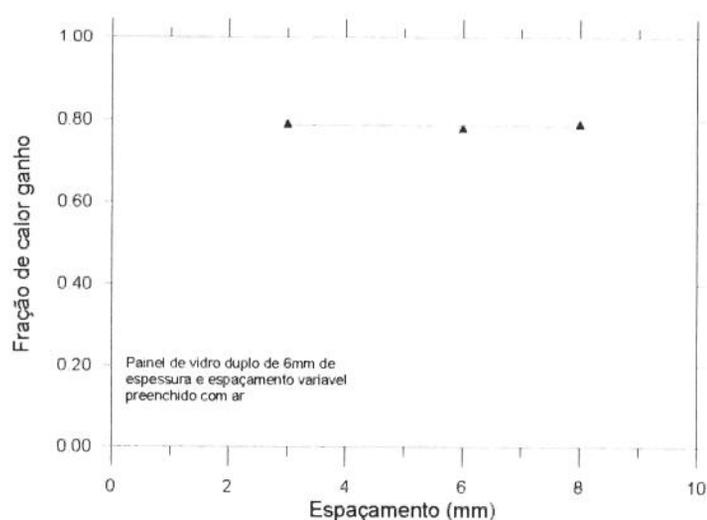
A discussão anterior sobre os efeitos da espessura, espaçamento e inclusão do pcm como material de enchimento foi mostrado nas figuras (6.6), (6.10), (6.15), (6.20) e (6.24). Uma integração numérica dessas curvas permite avaliar de forma mais precisa os efeitos dos parâmetros estudados. A metodologia aplicada consistiu em integrar a curva de ganho de calor e referir este valor ao valor total de radiação solar incidente no período de incidência solar sobre a superfície, obtendo deste modo um valor aqui chamado de fração de calor ganho que é característico para cada configuração. Os resultados desta estão mostrados nas figuras (6.25) a (6.28).

A figura (6.25) mostra os resultados para o conjunto de vidros simples confirmando a tendência, já apontada, de diminuição do ganho térmico com o aumento da espessura do vidro. Esta diminuição é pequena e não é economicamente viável em termos de custo-benefício e critérios de redução de carga térmica a utilização de vidros de espessura muito grande em janelas.



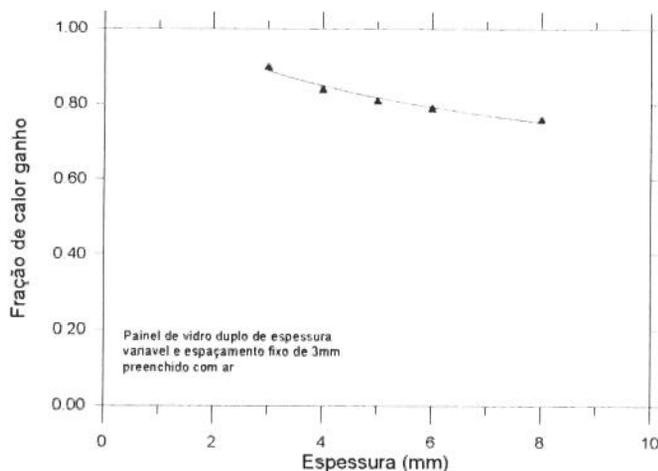
**Figura 6.25:** Fração de calor ganho pelo meio ambiente interno para vidros simples de diferentes espessuras.

Na figura (6.26) se encontram os resultados da fração de calor ganho para painéis de vidro duplo com vidros de 6mm de espessura e preenchidos com ar. Os valores são plotados no gráfico em função do espaçamento entre vidros e estes mostram que o aumento do espaçamento não tem nenhuma influencia no ganho de calor. Se comparados estes resultados com os obtidos para painel de vidro simples, podemos observar que a performance do painel de vidro duplo é melhor.



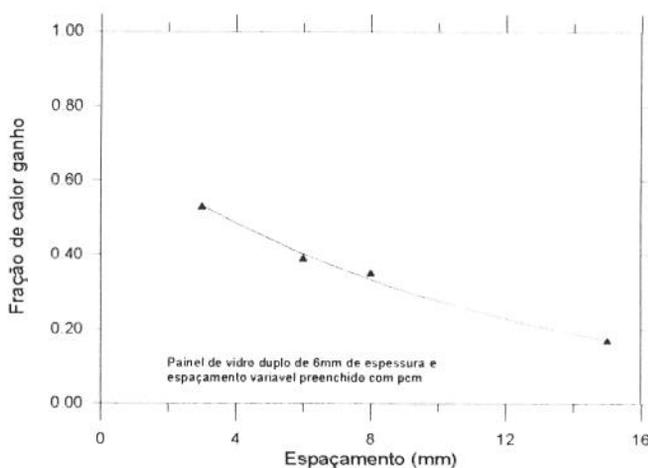
**Figura 6.26:** Fração de calor ganho para painel de vidro duplo de 6mm preenchido com ar em função do espaçamento entre vidros.

A figura (6.27) mostra um gráfico com os resultados da fração de calor ganho para um painel de vidro duplo com espaçamento de 3mm preenchido com ar. Do gráfico podemos observar novamente efeito redutor que tem o aumento da espessura do vidro.



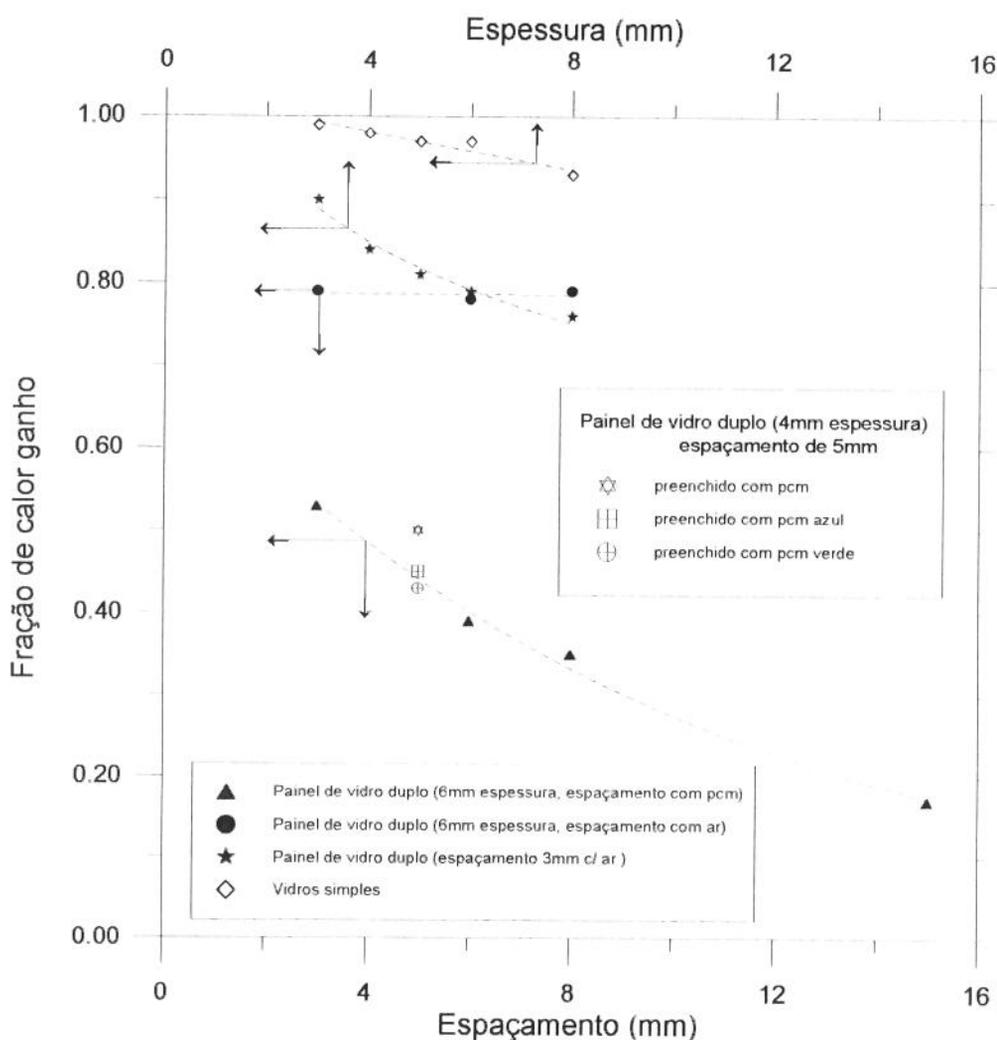
**Figura 6.27:** Fração de calor ganho em função da espessura do vidro, para painel de vidro duplo com espaçamento fixo de 3mm preenchido com ar

Na figura (6.28) são apresentados os resultados da fração de calor ganho para painéis de vidro duplo de 6mm preenchidos com material de mudança de fase. A curva indicada no gráfico mostra de forma clara o efeito redutor que tem a inclusão de pcm entre os dois vidros, ainda mais, podemos observar que o aumento da espessura da camada de pcm provoca uma diminuição acentuada na fração de calor ganho.



**Figura 6.28:** Fração de calor ganho para painel de vidro duplo de 6mm de espessura preenchido com material de mudança de fase.

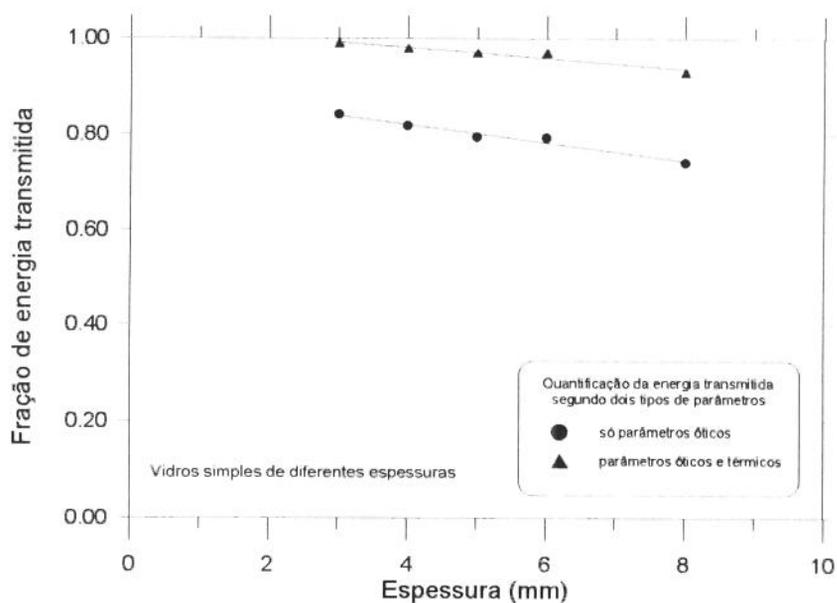
Na figura (6.29) é apresentado um gráfico comparativo que mostra os resultados obtidos com todas as configurações estudadas. Novamente podemos observar e de forma clara a vantagem que representa o encapsulamento de material de mudança de fase entre dois vidros, com a finalidade de reduzir a carga térmica que entra no meio ambiente interno devido à radiação solar incidente.



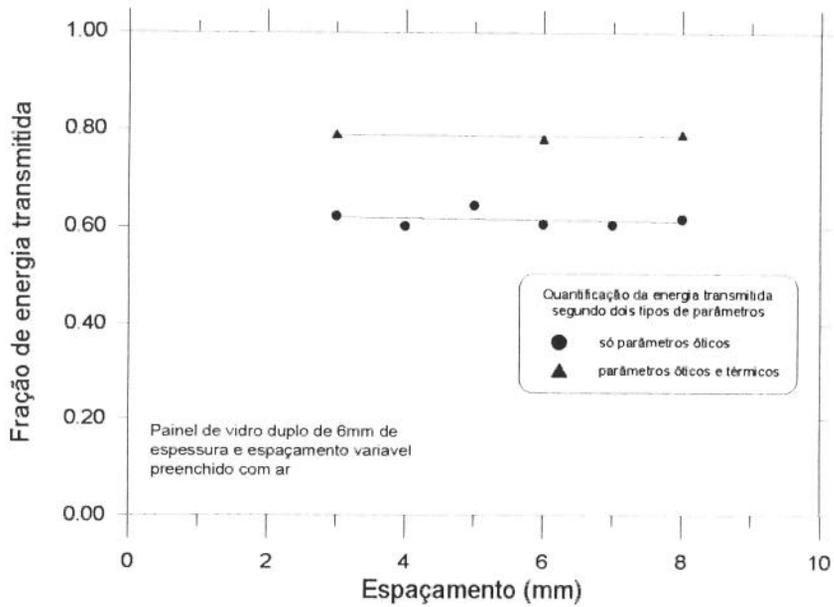
**Figura 6.29:** Fração de calor ganho para todas as configurações estudadas.

No capítulo 3 foram discutidas curvas de ganho de energia pelo meio ambiente interno, quantificando este ganho exclusivamente do parâmetro ótico transmitância. As curvas de ganho de calor discutidas aqui englobam todos os mecanismos pelos quais é transmitida a energia para o espaço interno e conseqüentemente são mais abrangentes. As figuras (6.30) a (6.33) mostram, comparativamente, as duas situações da avaliação do ganho térmico.

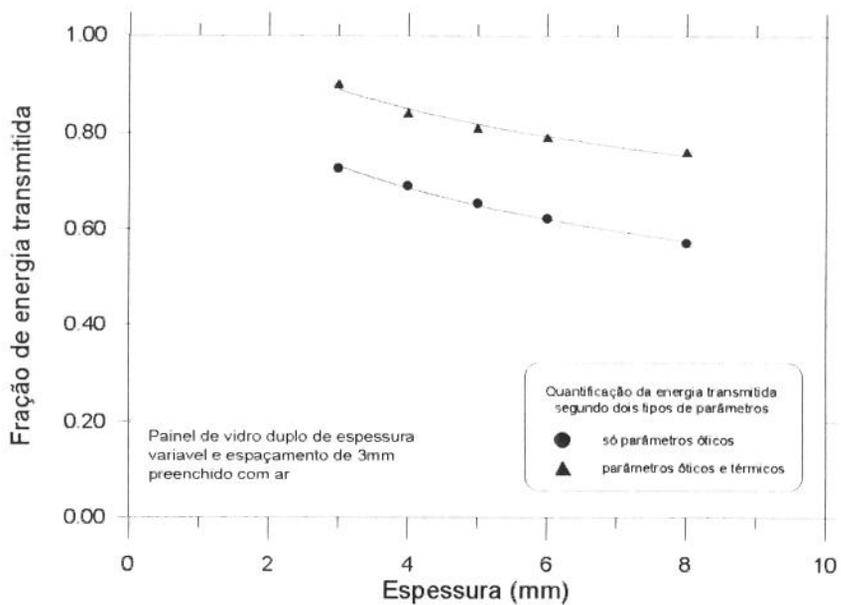
Nas figuras (6.30), (6.31) e (6.32) podemos observar que a fração de energia transmitida e que foi calculada a partir dos resultados obtidos na simulação numérica apresentam as mesmas tendências, porém valores maiores, que os resultados obtidos considerando exclusivamente o parâmetro de transmitância ótica. Isto se deve a que na simulação são considerados todos os mecanismos de transferência de calor presentes no problema e cada um deles contribui com uma parcela para o ganho térmico. No caso da figura (6.33), que corresponde ao ganho de energia para um sistema formado por um painel de vidro duplo preenchido com pcm, a fração de energia transmitida, que é calculada do parâmetro de transmitância ótica, é a que apresenta resultados de fração de energia maiores. A razão para isto, é que o cálculo é feito considerando o pcm completamente na fase líquida e o que ocorre na realidade é que o pcm se encontra nesta fase só a partir de um determinado momento logo após ser completamente fundido devido ao calor incidente, antes disto o pcm atua como um armazenador de calor evitando que este entre no meio ambiente interno. Esta é a grande vantagem da utilização do material de mudança de fase.



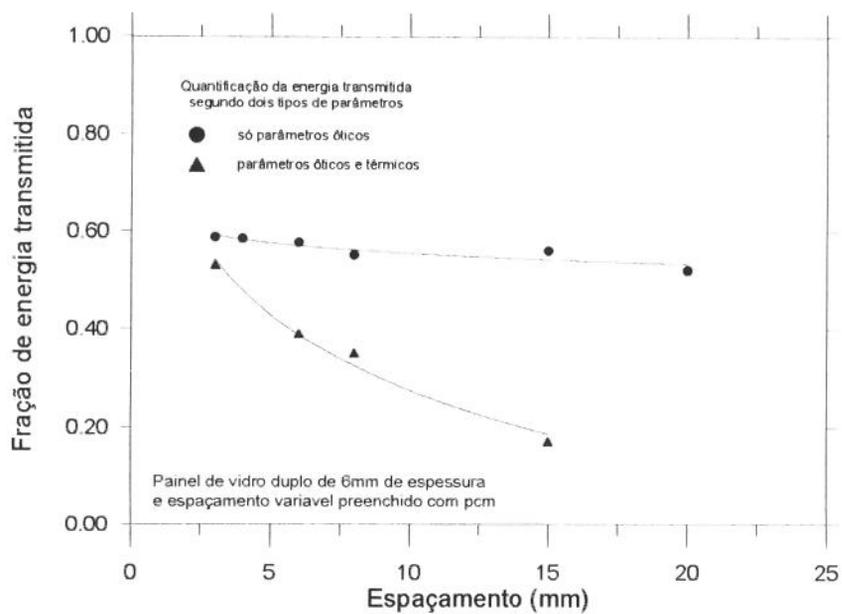
**Figura 6.30:** Avaliação da fração de energia transmitida para vidros simples segundo dois tipos de critérios.



**Figura 6.31:** Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro duplo de 6mm de espessura preenchido com ar, segundo dois tipos de critérios.



**Figura 6.32:** Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro duplo com espaçamento fixo de 3mm preenchido com ar, segundo dois tipos de critérios.



**Figura 6.33:** Avaliação da fração de energia transmitida para painel de vidro duplo de 6mm de espessura preenchido com pcm, segundo dois tipos de critérios.

## Capítulo 7

### Conclusões e Sugestões para próximos trabalhos

As conclusões mais importantes deste trabalho são as seguintes:

- No modelo, a energia absorvida foi tratada de três maneiras diferentes. O que mostrou melhores resultados foi considerando a absorção de energia radiante de forma distribuída exponencialmente através do painel.
- Foram levantados dados óticos experimentais de vidros nacionais de varias configurações e espessuras para utilização neste estudo.
- Janelas formadas por painéis de vidro duplo com pcm se mostram efetivas em reduzir a carga térmica, e o aumento da espessura da camada de pcm resulta num melhor desempenho.
- Painéis duplo com ar encapsulado também se mostram efetivos na redução da carga térmica, embora com um desempenho menor que no caso dos painéis com pcm. O aumento da camada de ar não tem nenhum efeito na redução.

#### Futuros trabalhos

- Foram iniciados testes reais das configurações usadas para comparação com as simulações numéricas
- Efeitos da altura hidrostática causa o rompimento dos painéis de vidro. A solução para este problema é a colocação de separadores entre os vidros e limitar a altura de vidros. Estudos mais detalhados estão sendo feitos para evitar este problema de ordem pratico.
- Esta sendo investigado o caso de vidro duplo com escoamento de ar e o caso de vidro duplo com gás absorvente de radiação

## Referências Bibliográficas

- ALEREZA, T., HOSSLI, R.I. Simplified Method of Calculating Heat Loss and Solar Gain Through Residential Windows During the Heating Season, *ASHRAE Transactions*, v. 84, part 2, p 582, 1979.
- ARASTEH, D., HARTMANN, J., RUBIN, M. Experimental Verification of a Model Heat Transfer Through Windows, *ASHRAE Transactions*, v. 93, part 1, p 1425, 1987
- ARASTEH, D., REILLY, M.S., RUBIN, M. A Versatile Procedure for Calculating Heat Transfer Through Windows, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 2, p 755, 1988.
- ARASTEH, D, BECK, F.A., GRIFFITH, B.T., BYARS, N., ACEVEDO-RUIZ, M. Using Infrared Thermography to Study Building heat Transfer, *ASHRAE Journal*, v. 34, nº 10, 1992, p 34-38
- BAKER, J.A., SULLIVAN, H.F., WRIGTH, J.L. Window (Glazing and Frame) Heat Transfer Modeling, *ASHRAE Transactions*, v. 96, part 1, p 901, 1990.
- BAUMAN, F.S., PLACE, J.B., THORTON J., HOWARD, T.C. Integrating Window Pyranometer for Beam Daylighting Measurements in Scale Model Building, *ASHRAE Transactions*, v. 92, part 1A, p 486, 1986.
- BÖER, K.W. The Solar Spectrum at Typical Clear Weather Days, *Solar Energy*, v. 19, p 525-538, 1977

- BROWN W., SCHUYLER, G. A calorimeter for measuring heat flow through walls, *Proceedings of the ASHRAE/DOE/ORNL Conference*, Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings, of, New York, 1979.
- CARPENTER, S.C., MCGOWAN, A.G. Frame and Spacer Effects on Window U- Value, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 1, p 604, 1989.
- CURCIJA, D, AMBS, L.L., GOSS, W.P. A Comparison of European and North American Window U-Value Calculation Procedures, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 1, p 575, 1989.
- DAHLEN, R.R. Low-E Films for Window Energy Control, *ASHRAE Transactions*, v. 93, part 1, p 1517, 1987.
- DICKINSON, W.C., CHEREMISINOFF, P. N. *Solar Energy Technology Handbook-Part A Engineering Fundamentals*, Marcel Dekker, INC., 1980
- DUBROUS, F.M., HARRISON, S.J. Comparison of Experimental Test Results and Analytical Calculation of Window Thermal Performance, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 2, p 747, 1988.
- DUFFIE J. A., BECKMAN W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley and Sons inc., 1980.
- EINASRUDE, M.A., HAEREID, S., WITTEW, W. Some Thermal and Optical Properties of a Transparent Silica Xerogel Material with Low Density, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 31, p 34-347, 1993.
- ELMAHDY, A.H. Joint Canadian/U.S. Research Project on Window Performance: Project Outline and Preliminary Results, *ASHRAE Transactions*, v. 96, part 2, p 896, 1990.
- ELMAHDY, A.H. Heat Transmission and R-value of Fenestration System Using IRC Hot Box, Procedure and Uncertainty Analysis, *ASHRAE Transactions*, v. 98, part 2, p 630-637, 1992.

- HARRISON, S.J., DUBROUS, F.M. Uncertainties in Evaluation of Window SITGC and U-values Measured Using an Indoor Solar Simulator Facility, *ASHRAE Transactions*, v. 98, part 2, p 638-645, 1992.
- HARRISON, S.J., VAN WONDEREN, S.J. Determining Window Solar Heat Gain Coefficient, *ASHRAE Journal*, v.36, n° 8, 1994, p 26-32
- HARTIG, K., MUNS, D., SCHERER, M. Industrial Realization of Low-Emittance Oxide/Metal/Oxide Films on Glass, *Solar Energy Materials*, v. 16, p 9-13, 1987.
- HEITZ W. L., WESTWATER J. W. Extension of the Numerical Method for Melting and Freezing Problems, *International Journal heat Mass Transfer*, v.13, p.1371-1375, 1970.
- HOLMAN J.P. *Transferência de Calor*, São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1980
- HONMANN, W. Integration of Window Design and Orientation with Room Environmental Requirements, *ASHRAE Transactions*, v.90, part 1B, p 816, 1984.
- HOTTEL, H. C. A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres, *Solar Energy*, v. 18, p 129-134, 1976
- ISMAIL, K.A., CASTRO, J.N. PCM Walls and Roofs for Passive Thermal Comfort, *World Renewable Energy Congress*, Reading 1990, UK, v.4, p 2660, 1990.
- JENNINGS, R. Some Reflections on Coated Glass, *The Steam and Heating Engineer*, v. 42,(449), p 22-5, 1972.
- KELLER, B, GREETHER, P., BRADER, K. New Window Systems Improve Comfort and Reduce Energy Demand, *ASHRAE Transactions*, v. 90, part 1B, p 905, 1984.
- KLEMS, J.H. U-Values, Solar Heat Gain and Thermal Performance: Recent Studies Using the MOWITT, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 1, p 609, 1989.
- KLEMS, J.H. Method of Measuring Nighttime U-values Using the Mobile Window Thermal Test Facility, *ASHRAE Transactions*, v. 98, part 2, p 619-629, 1992.

- KLEMS, J.H., KELLER, H. Thermal Performance of Sealed Insulating Glass Units With Low-E Coatings Using a Mobile Field Test Facility, *ASHRAE Transactions*, v. 93, part.1, p 1432, 1987.
- KREITH F. *Principio da Transmissão de Calor*, São Paulo, Edgar Blücher, 1977.
- LANE, G.A. *Solar Heat Storage: Latent Heat Materials*, CRC Press, v. 1, 1986.
- LEXEN, T.C. Development and Use of a Window Field Comparison Facility, *ASHRAE Transactions*, v. 94, part 2, p 1338, 1988.
- LIU, B.Y.H., JORDAN, R.C. The Interrelations and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, v. 4, n° 3, p 1-19, 1960
- LOWINSKI, J.F. Thermal Performance of Wood Windows and Doors, *ASHRAE Transactions*, v. 84, part 2, p 548, 1979.
- McCABE, M.E. U-Value Measurements for Windows and Movable Insulations from Hot Box Tests in Two Commercial Laboratories, *ASHRAE Transactions*, v.92, part 1A, p 453, 1986.
- McCABE, M.E., HILL, D. Field Measurements of Thermal and Solar Optical Properties of Insulating Glass Windows, *ASHRAE Transactions*, v. 93, part 1, p 1408, 1987.
- MURRAY W. D., LANDIS F. Numerical and Machine Solutions of Transiente Heat-Conduction Problems Involving Melting or Freezing,, *International Journal of Heat Transfer*, p 108-112, may 1959.
- ÖZISIK M. N. *Boundary Value Problems of Heat Conduction*, International Textbook Company, Scranton, Pennsylvania, 1968
- ÖZISIK M. N. *Heat Conduction*, New York, John Wiley, 1980.
- PARMELEE, G.V. The Transmission of Solar Radiation Through Flat Glass Under Summer Conditions, *ASHVE Transactions*, v. 51, 1945, p 317.

- REILLY, M.S., ARASTEH, D., RUBIN, M. The Effects of Infrared Absorbing Gases on Window Heat Transfer; a Comparison of Theory and Experiment, *Solar Energy Materials*, v. 20, 1990, p 279-288.
- RENNEKAMP, S.J. U-Value Testing of Windows Using a Modified Guarded Hot Box Technique, *ASHRAE Transactions*, v. 84, part 2, 1979, p 527.
- RIPATTI, H. Airflow Window System-Making Fenestration the Solution Rather than the Problem in Energy Use, *ASHRAE Transactions*, v. 90, part 1B, 1984, p 917.
- RUBIN, A.I., COLLINS, B.L., TIBBOTT, R.L. Window Usage at National Bureau of Standards Venetian Blinds as a Potential energy Saver, *ASHRAE Transactions*, v. 84, part 2, 1979, p 567.
- RUBIN, M., CRESWICK, R., SELKOWITZ, S. Transparent Heat-Mirrors for Windows: Thermal Performance, *Proc. 5th National Passive Solar Conference*, ed. C.M. Lambert, Pergamon Press, New York, 1980, p 990-4.
- RUBIN, M., LAMPERT, C.M. Transparente Silica Aerogels for Window Isulation, *Solar Energy Materials*, v. 7, 1983, p 393.
- SHAVIV, E. A Design Tool for Determining the Form of Fixed and Movable Sunshades, *ASHRAE Transactions*, v. 90, part 1b, 1984, p 948.
- STEPHENSON, D.G. Equations for Solar Heat Gain Through Windows, *Solar Energy*, v. 9, n<sup>o</sup>2, p 81-86, 1965.
- SULLIVAN, H.F., WRIGHT, J.L. Thermal Resistance of Glazing System Edge- Seals and Seal Materials Using a Guarded Heater Plate Apparatus, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 2, 1989, p 776.
- SULLIVAN, H.F., WRIGHT, J.L. Glazing System U-Value Measurement Using a Guarded Heater Plate Apparatus, *ASHRAE Transactions*, v. 94, part 2, 1988, p 1325.
- SWINBANK, W.C. Long-wave Radiation from Clear Skies, *Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 89, 1963, p 339-348

- THRELKELD J. L. *Thermal Environmental Engineering*, 2<sup>da</sup> Edition, Prentice-hall inc., 1970.
- TODOROVICH, B.B. Distribution of Solar Energy Following Its Transmittal Through Window Panes *ASHRAE Transactions*, v. 90, part 1B, 1984, p 806.
- VALKONEN, E. Optimization of Metal Based Multilayers for Transparent Heat Mirrors, *Int. J. Energy Resources*, v. 11(3), 1987, 397-403.
- WRIGTH, J.L. Summary and Comparison of Methods to Calculate Solar Heat Gain, *ASHRAE Transactions*, v. 101, part 1, 1995, p 802
- WRIGTH, J.L., SULLIVAN, H.F. Natural Convection in Sealed Glazing Units: A Review, *ASHRAE Transactions*, v. 95, part 1, 1989, p 592.
- YELLOT, J.I. Solar Optical Properties, Heat Transfer Coefficients and Shading Coefficients for Architectural Glass, *ASHRAE J.*, v. 13(3), março/1971, p 30-46.
- YELLOT, J.I. Thermal and Solar Control Effectiveness of "Scotchint" Window Films, *Report n. 8307-1 for 3M*, John Yellot Engineering Associates, Phoenix, Arizona, 1983.
- ASHRAE Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, New York, 1977
- ASHRAE Handbook Fundamentals*, Fenestration, American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, INC, Atlanta, 1985, capitulo 27.
- AAMA, Voluntary Test Method for Thermal Transmittance of Windows, Door and Glazed Wall Sections, Chicago: American Architectural Manufacturers Association, 1980, AAMA Standard 1503.1.
- ASTM, Standart Test Method for Thermal Conductance and Transmittance of Built-up Sections by Means of the Guarded Hot Box, ASTM C236-66 (Reapproved 1971).
- ASTM, Steady-State Performance of Building Assemblies by Means of a Guarded Hot Box, Annual Book of ASTM Standards, 1985a, ASTM Standard C236, v. 0406.

*ASTM*, Thermal Performance of Building Assemblies by Means of a Calibrated Hot Box, Annual Book of ASTM Standards, 1985b, ASTM Standard C976, v. 0406.

*ASTM*, Standard Test Method for Solar Energy Transmittance and Reflectance (Terrestrial) of Sheet Materials ASTM E424-71.

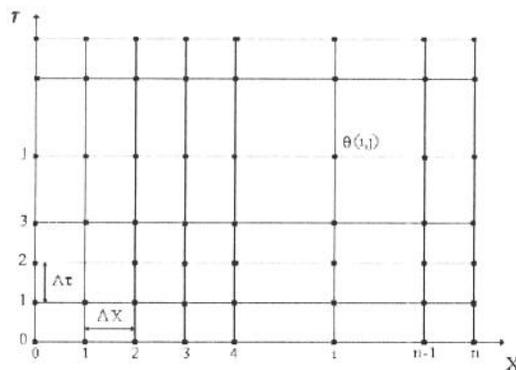
*ASTM*, Standard Methods of Test for Solar Energy Transmittance and Reflectance (terrestrial) of Materials, Annual Book of ASTM Standards, 1984a, ASTM Standard E424, v. 0406.

*ASTM*, Standard Method for Field Measurement of Air Leakage Through Installed Windows and Door, Annual Book of ASTM Standards, 1984b, ASTM Standard E783, v. 0407.

## Apêndice A

### Aproximação de derivadas por diferenças finitas

A derivada de uma função pode ser representada por diferenças finitas usando expansão de Taylor num determinado ponto. Considerando uma função  $\theta(X, \tau)$  que pode ser expandida em série de Taylor num determinado ponto  $(X, \tau)$  correspondente a  $(i, j)$  da figura 1-A



**Figura 1-A** Malha com seus pontos nodais.

A figura 1-A mostra uma grade regularmente espaçada na direção X e na direção t, cujo tamanho de espaçamento é  $\Delta X$  e  $\Delta \tau$  respectivamente. Então a posição no espaço e no tempo podem ser facilmente representados por;

$$X = i \Delta X \quad , \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\tau = j \Delta \tau \quad , \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

$$\theta(X + \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) + \Delta X \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j} + \frac{(\Delta X)^2}{2!} \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j} + \frac{(\Delta X)^3}{3!} \frac{\partial^3 \theta(X, \tau)}{\partial X^3} \Big|_{i,j} + \dots$$

$$\theta(X - \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) - \Delta X \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j} + \frac{(\Delta X)^2}{2!} \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j} - \frac{(\Delta X)^3}{3!} \frac{\partial^3 \theta(X, \tau)}{\partial X^3} \Big|_{i,j} + \dots$$

truncando as expressões acima a partir das derivas de ordem maior que dois

$$\theta(X + \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) + \Delta X \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j} + \frac{(\Delta X)^2}{2!} \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j} \quad (A1)$$

$$\theta(X - \Delta X, \tau) = \theta(X, \tau) - \Delta X \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j} + \frac{(\Delta X)^2}{2!} \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j} \quad (A2)$$

Combinando as equações (A1) e (A2) adequadamente podemos obter expressões para a primeira e segunda derivada.

Subtraindo (A2) de (A1)

$$\theta(X + \Delta X, \tau) - \theta(X - \Delta X, \tau) = 2\Delta X \frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j}$$

que pode ser rescrita como,

$$\frac{\partial \theta(X, \tau)}{\partial X} \Big|_{i,j} = \frac{\theta(X + \Delta X, \tau) - \theta(X - \Delta X, \tau)}{2\Delta X} \quad (A3)$$

Somando as expressões (A1) e (A2)

$$\theta(X + \Delta X, \tau) + \theta(X - \Delta X, \tau) = 2\theta(X, \tau) + (\Delta X)^2 \frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j}$$

colocando a segunda derivada em evidencia,

$$\frac{\partial^2 \theta(X, \tau)}{\partial X^2} \Big|_{i,j} = \frac{\theta(X + \Delta X, \tau) - 2\theta(X, \tau) + \theta(X - \Delta X, \tau)}{(\Delta X)^2} \quad (A4)$$

As expressões (A3) e (A4), escritas em termos de diferenças centradas (C.D.), podem ser usadas para qualquer ponto interno do domínio.

Agora se aplicamos o mesmo procedimento na direção do tempo podemos obter para a primeira derivada uma relação semelhante.

Fazendo a expansão de Taylor no ponto (i,j) na direção do tempo,

$$\theta(X, \tau + \Delta\tau) = \theta(X, \tau) + \Delta\tau \left. \frac{\partial\theta(X, \tau)}{\partial\tau} \right|_{i,j} + \frac{(\Delta\tau)^2}{2!} \left. \frac{\partial^2\theta(X, \tau)}{\partial\tau^2} \right|_{i,j} + \dots$$

truncando a serie após a derivada de primeira ordem obtemos uma expressão em diferenças finitas para a derivada de primeira ordem no tempo escrita em termos de diferenças para frente (F.D.),

$$\left. \frac{\partial\theta(X, \tau)}{\partial\tau} \right|_{i,j} = \frac{\theta(X, \tau + \Delta\tau) - \theta(X, \tau)}{\Delta\tau} \quad (A5)$$

As equações (A3), (A4) e (A5) podem ser rescritas levando em conta a notação da figura 1-A, de modo que  $\theta(X, \tau)$  para uma dada posição pode ser representada como,

$$\theta(i\Delta X, j\Delta\tau) \equiv \theta(i, j)$$

Assim,

$$\left. \frac{\partial\theta}{\partial X} \right|_{i,j} = \frac{\theta(i+1, j) - \theta(i-1, j)}{2\Delta X} \quad (A6)$$

$$\left. \frac{\partial^2\theta}{\partial X^2} \right|_{i,j} = \frac{\theta(i+1, j) - 2\theta(i, j) + \theta(i-1, j)}{(\Delta X)^2} \quad (A7)$$

$$\left. \frac{\partial\theta}{\partial\tau} \right|_{i,j} = \frac{\theta(i, j+1) - \theta(i, j)}{\Delta\tau} \quad (A8)$$

Aplicando estas definições à equação governante do problema, equação (4.1) e (4.23) do capítulo 4, ou a suas correspondentes adimensionalizadas para cada região, equações (4.19), (4.20) e (4.21).

$$\frac{\partial \theta_m}{\partial \tau} = \left( \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right) \frac{\partial^2 \theta_m}{\partial X^2} - \left( \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right) \frac{e}{k_m \text{TMF}} \frac{\partial I}{\partial X}, \quad m = 1, L, S, 3$$

$$\left( \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right) \frac{[\theta_m(i+1, j) - 2\theta_m(i, j) + \theta_m(i-1, j)]}{(\Delta X)^2} = \frac{\theta_m(i, j+1) - \theta_m(i, j)}{\Delta \tau} - \left( \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right) \frac{e}{k_m \text{TMF}} \frac{\Delta I}{\Delta X}$$

resolvendo para  $\theta_m(i, j+1)$

$$\theta_m(i, j+1) = r\theta_m(i-1, j) + (1-2r)\theta_m(i, j) + r\theta_m(i+1, j) - \frac{r\Delta X e}{k_m \text{TMF}} \Delta I \quad (\text{A9})$$

$$r = \frac{\Delta \tau}{(\Delta X)^2} \left( \frac{\alpha_m}{\alpha_L} \right)$$

Do apêndice C,  $\Delta I$  pode ser escrito como  $-A_i I_o$ , onde  $A_i$  representa a absorvância no nó (i).

A equação (A9) é válida para qualquer ponto interno do domínio. Dado que na maioria dos casos as condições de contorno do problema são condições de segunda espécie (condições de neumann) ou condições de terceira espécie, que corresponde, neste último caso, a existência de convecção na superfície, desconhecemos o valor da temperatura nos pontos extremos do domínio. Assim, a aplicação direta da equação (A9) para estes pontos não é possível por causa que  $\theta_m(-1, j)$  e  $\theta_m(n+1, j)$  são valores da função  $\theta_m$  em pontos imaginários (fora do domínio de estudo).

Se rescrevermos a segunda derivada a partir da expansão de Taylor da função  $\theta_m$ , dada pela expressão (A1), em torno do ponto ( $i=0$ ) e utilizando a notação da figura (1-A).

$$\left. \frac{\partial^2 \theta_m}{\partial X^2} \right|_{(0,j)} = \frac{2}{(\Delta X)^2} \left[ \theta_m(1, j) - \theta_m(0, j) - \Delta X \left. \frac{\partial \theta_m}{\partial X} \right|_{(0,j)} \right] \quad (\text{A10})$$

fazendo o mesmo no ponto ( $i=n$ ), só que neste caso utilizaremos a expressão (A2),

$$\left. \frac{\partial^2 \theta_m}{\partial X^2} \right|_{(n,j)} = \frac{2}{(\Delta X)^2} \left[ \theta_m(n-1, j) - \theta_m(n, j) + \Delta X \left. \frac{\partial \theta_m}{\partial X} \right|_{(n,j)} \right] \quad (\text{A11})$$

Substituindo as expressões (A10) e (A11), uma de cada vez, junto com a equação (A8) na equação governante do problema e resolvendo para  $\frac{\partial \theta_m}{\partial X}$ ,

$$\left. \frac{\partial \theta_m}{\partial X} \right|_{(0,j)} = \frac{1}{\Delta X} \theta_m(1,j) + \theta_m(0,j) \left[ \frac{\alpha_L \Delta X}{\alpha_m 2 \Delta \tau} - \frac{1}{\Delta X} \right] - \theta_m(0,j+1) \left[ \frac{\alpha_L \Delta X}{\alpha_m 2 \Delta \tau} \right] + \frac{e}{2k_m \text{TMF}} A_1 I_0 \quad (\text{A12})$$

e

$$\left. \frac{\partial \theta_m}{\partial X} \right|_{(n,j)} = -\frac{1}{\Delta X} \theta_m(n-1,j) + \theta_m(n,j) \left[ \frac{1}{\Delta X} - \frac{\alpha_L \Delta X}{\alpha_m 2 \Delta \tau} \right] + \theta_m(n,j+1) \left[ \frac{\alpha_L \Delta X}{\alpha_m 2 \Delta \tau} \right] - \frac{e}{2k_m \text{TMF}} A_1 I_0 \quad (\text{A13})$$

Supondo que as condições de contorno sejam dadas por uma equação do tipo  $-k \frac{\partial \theta}{\partial X} = f$ , onde  $f$  pode assumir a forma de  $q_s''$  (fluxo de calor na superfície) ou  $h[\theta_\infty - \theta(0, \tau)]$  (convecção na superfície) ou uma combinação de ambas, e sendo que as equações (A12) e (A13) foram derivadas da equação transiente da condução de calor, então estas podem ser associadas de forma a obter uma expressão para o cálculo do valor da função  $\theta$  nos pontos extremos do domínio.

## Apêndice B

### Modelos de Radiação Solar Incidente e Variação da Temperatura Atmosférica

#### B1 Radiação Solar Incidente.

A radiação emitida pelo Sol tem uma distribuição espectral semelhante à de um corpo negro ou radiador perfeito a uma temperatura de aproximadamente 5000K. Do total de radiação solar, 9% ocorre na região do ultravioleta que se encontra na faixa de comprimento de onda de 0,29 a 0,4  $\mu\text{m}$ , 38% ocorre na região do visível compreendido na faixa de 0,4 a 0,70  $\mu\text{m}$  e finalmente 46% na região do infravermelho próximo entre 0,74 e 3,5  $\mu\text{m}$ . A radiação solar fora destes limites é importante mas é de baixa intensidade quando comparada com a intensidade máxima que ocorre na região do visível.

A integral da curva de distribuição ao longo de todo o comprimento de onda representa o que se tem convencionado em chamar de constante solar  $I_0$ , e corresponde a energia disponível fora da atmosfera terrestre. Na realidade  $I_0$  não é exatamente uma constante no sentido rigoroso, pois sabemos que a intensidade da radiação extraterrestre varia inversamente com a distância Terra-Sol e que a órbita da Terra é elíptica com o Sol posicionado num dos focos da elipse, de forma que a radiação que chega à atmosfera terrestre varia periodicamente, atingindo um máximo de 1417  $\text{W/m}^2$  no dia 3 de janeiro e um mínimo de 1328  $\text{W/m}^2$  no dia 6 de julho. O valor de  $I_0$  é assumido então como sendo o valor médio entre os valores máximo e mínimo. A tabela 1-B, extraída do ASHRAE Handbook -1985 Fundamentals, mostra, a modo de ilustração, a intensidade de radiação para o dia 21 de cada mês com base no ano de 1964.

Os efeitos da atmosfera sobre a radiação solar tem sido estudados por diversos pesquisadores e ao longo de muitos anos. Estas pesquisas tem mostrado que quando a radiação atravessa a atmosfera terrestre sofre uma atenuação causada pela dispersão e absorção nos diferentes constituintes da própria atmosfera. Uma parte da radiação é interceptada por moléculas de ar seco, moléculas de água e partículas de poeira, resultando em uma dispersão da radiação em praticamente todas as direções. Uma outra parte da radiação é absorvida principalmente por moléculas de ozônio na região mais alta da atmosfera e por vapor de água próximo da superfície da Terra.

**Tabela 1-B** Intensidade de radiação solar para o dia 21 de cada mês com base no ano de 1964

Mês	$I_0$ W/m <sup>2</sup>	Declinação (d) graus
Janeiro	1416	-20.00
Fevereiro	1404	-10.80
Março	1383	0.00
Abril	1360	11.60
Mai	1339	20.00
Junho	1330	23.45
Julho	1328	20.60
Agosto	1343	12.30
Setembro	1364	0.00
Outubro	1386	-10.50
Novembro	1408	-19.80
Dezembro	1417	-23.45

A magnitude desta atenuação fica caracterizada pela composição da atmosfera e pela distância percorrida pelos raios do Sol desde o limite externo da atmosfera até a superfície da Terra. Esta distância é expressa em termos da massa de ar ( $m$ ), que é a razão entre o caminho percorrido pelos raios do Sol e a espessura da atmosfera com o Sol na posição zenital. Pode ser demonstrado que uma relação para  $m$  pode ser escrita como:

$$m = \frac{1}{\cos(z)} \quad (B1)$$

onde  $z$  é o ângulo de zênite.

A massa de ar ( $m$ ) varia conforme a hora do dia e o dia do ano e esta tem uma grande influencia na distribuição da energia no espectro solar. O caso em que  $m = 0$  (Air Mass 0) corresponde à distribuição espectral da luz do Sol fora da atmosfera terrestre e a área sob a curva de distribuição está associada à constante solar. Uma discussão mais detalhada sobre os efeitos das componentes da atmosfera na distribuição da radiação é dada por K. W. Böer[1977].

O ângulo de zênite varia com a latitude do local, a hora do dia e a declinação solar. A latitude local  $L$  pode ser obtida de um atlas ou um globo. A hora do dia é expressa em função do ângulo horário  $h$ , que indica a rotação aparente da esfera celeste ao redor do eixo da Terra. Como resultado da rotação da terra,  $h$  varia de zero no meio-dia local a um máximo ao nascer ou pôr do Sol. A declinação solar  $d$  é a distância angular dos raios do Sol em relação ao equador. A declinação do Sol para um mesmo dia varia ligeiramente de ano para ano por causa do que o ano civil não coincide exatamente com uma revolução completa da Terra ao redor do Sol, porem, para os cálculos usuais a declinação pode ser considerada constante para todos os anos.

Existe uma relação bastante difundida na literatura especializada para o cálculo da declinação como segue:

$$d = 23.45 \sin \left[ 360 \frac{(284 + n)}{365} \right] \quad (B2)$$

onde  $n$  representa o número de dias a partir do dia primeiro de janeiro e pode ser obtido da tabela-3.1 do Solar Energy Technology Handbook[1980], a qual oferece uma conversão da data para o número de dias do ano.

A radiação solar disponível na superfície da Terra pode ser tanto de caracter direta quanto difusa. A radiação solar direta é definida como sendo aquela que chega à superfície da Terra vindo diretamente do Sol sem ser dispersada pela atmosfera, enquanto que a radiação difusa corresponde a aquela radiação recebida na superfície da Terra depois de ter sido dispersada pela atmosfera, de forma que é uma radiação que chega de todas as direções. A

radiação difusa é também denominada de radiação do céu ou radiação solar do céu. É necessário diferenciar aqui entre a radiação difusa e a radiação emitida pela atmosfera, sendo que esta última corresponde a radiação de comprimentos de ondas longas.

Quantificar a radiação solar incidente em superfícies inclinadas é muito importante para a simulação de sistemas de aproveitamento de energia solar tais como coletores solares e do comportamento térmicos de edificações ao longo do tempo. Para que isto seja efetivo é necessário ter acesso a dados de radiação solar em base horária ou em intervalos de tempo menores.

Dados de radiação são normalmente oferecidos por estações meteorológicas e obtidos através de monitoramento em diversos pontos da superfície terrestre, constituindo a melhor fonte de informação para estimar a média da radiação incidente. Uma outra forma de gerar estes dados é através de correlações semi-empíricas estudadas por diversos autores e fartamente disponíveis na literatura especializada. Este último método tem uma grande aplicabilidade em localidades nas quais não se dispõe de registros de radiação solar de longo prazo, assim como também na simulação numérica da radiação solar incidente.

A radiação total incidente numa superfície inclinada é constituída por três parcelas; radiação solar direta ( $I_D$ ), radiação solar difusa ( $I_d$ ) e radiação refletida do chão ( $I_R$ ). Assim a radiação total pode ser escrita como segue.

$$I_T = I_D + I_d + I_R \quad (B3)$$

A intensidade da componente direta que alcança uma superfície inclinada é o produto da irradiação normal direta ( $I_{DN}$ ) e o coseno do ângulo de incidência  $\theta$  entre o raio solar incidente e a linha normal à superfície.

$$I_D = I_{DN} \cos(\theta) \quad (B4)$$

A posição do Sol pode ser expressa em termos de três ângulos básicos pelo ângulo de altitude ( $\beta$ ) e o ângulo de azimute ( $\phi$ ). A posição dos ângulos solares e ângulos de incidência para uma superfície inclinada são mostrados na figura 1-B.

$$\sin(\beta) = \cos(L) \cos(d) \cos(h) + \sin(L) \sin(d) \quad (B5)$$

$$\cos(\phi) = [\cos(L) \sin(d) - \cos(d) \sin(L) \cos(h)] / \cos(\beta) \quad (B6)$$

$$\sin(\phi) = \cos(d) \sin(h) / \cos(\beta) \quad (B7)$$

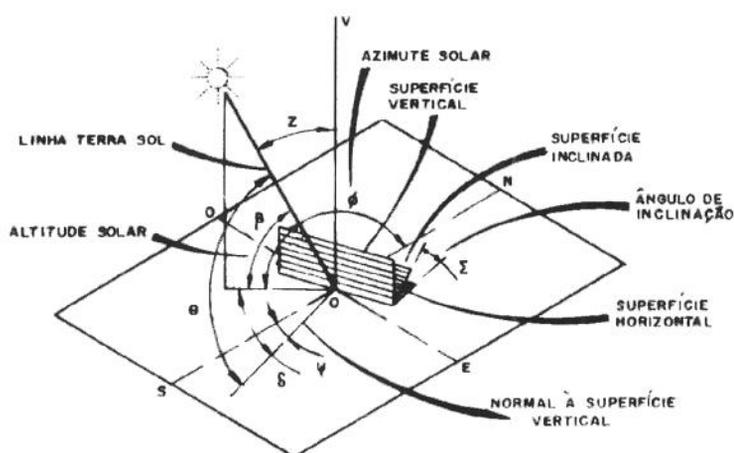


Figura 1-B.- Ângulos solares e incidência para uma superfície inclinada

Na figura (1-B), ( $\beta$ ) é a altitude solar; ( $\gamma$ ) é o ângulo azimute Sol-parede (superfície); ( $\Sigma$ ) é o ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal; ( $\phi$ ) é o ângulo solar azimute; ( $\psi$ ) é o ângulo azimute de superfície e finalmente ( $z$ ) é o ângulo zênite.

As equações (B5), (B6) e (B7) permitem calcular os ângulos de altitude e azimute se a declinação, o ângulo horário e a latitude forem conhecidos. Na utilização destas equações deve-se ter o cuidado de usar corretamente os sinais para os ângulos de latitude e declinação.

- Latitude sul é considerada negativa

- o ângulo de declinação é positivo entre o 22 de março e o 22 de setembro
- o ângulo de declinação é negativo entre o 23 de setembro e o 21 de março
- o ângulo horário é medido de ambos os lados do meio dia solar e varia de 0 a  $\pi$

Na utilização das equações (B6) e (B7) lembrar que o ângulo de azimute é medido no sentido horário, a partir do norte, antes do meio dia solar e anti-horário após o meio dia solar. O ângulo de azimute varia de 0 a  $\pi$

É conveniente expressar a posição do Sol em relação à superfície em termos do ângulo de incidência ( $\theta$ )

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\gamma) \sin(\Sigma) + \sin(\beta) \cos(\Sigma) \quad (\text{B8})$$

para superfícies verticais  $\Sigma = 90^\circ$ , de forma que a equação (B8) pode ser simplificada

$$\cos(\theta) = \cos(\beta) \cos(\gamma) \quad (\text{B9})$$

Um modelo simples foi proposto por Hottel[1976] para estimar a radiação direta normal num dia claro (sem nuvens), através da equação (B10)

$$I_{DN} = I_{0,N} \tau_D \quad (\text{B10})$$

onde  $\tau$  é a transmitância da radiação solar através da atmosfera em dias claros e é definido por

$$\tau = a_0 + a_1 e^{k/\cos(z)}, \text{ ou}$$

$$\tau = a_0 + a_1 e^{k/\cos(90 - \beta)} \quad (\text{B11})$$

As constantes  $a_0$ ,  $a_1$  e  $k$  são funções da altitude e da visibilidade. Estas constantes podem ser modificadas segundo índices que dependem só do tipo de clima (tropical, verão e inverno em latitudes médias, e verão sub-ártico) e que variam entre 0.92 e 1.04

Correlações para o cálculo de  $a_0$ ,  $a_1$  e  $k$ , já corrigidas para clima tropical, são dadas a seguir;

- para visibilidade de 23 km

$$a_0 = 0,4025 - 0,00780 (6 - A)^2$$

$$a_1 = 0,4953 + 0,00583 (6,5 - A)^2$$

$$k = 0,2765 + 0,01895 (2,5 - A)^2$$

- para visibilidade de 5 km

$$a_0 = 0,2335 - 0,0058 (6 - A)^2$$

$$a_1 = 0,7524 + 0,00098 (6,5 - A)^2$$

$$k = 0,2540 + 0,083 (2,5 - A)^2$$

Nas correlações acima a variável "A" se refere à altitude da localidade em km. Para visibilidade intermediária deve-se fazer interpolação linear entre 5 e 23 km.

Devido a sua natureza não direcional a radiação difusa é mais difícil de analisar que a radiação incidente direta. Stephenson[1965] mostra que para dias claros existe uma relação direta entre a radiação difusa e a radiação solar direta que atingem uma superfície horizontal.

$$I_{dh} = B I_{DN} \tag{B12}$$

onde B representa a seguinte correlação

$$B = \left( \frac{\tau_d}{\tau_D} \right) \sin(\beta)$$

Liu e Jordam[1960] desenvolveram uma correlação empírica que relaciona os coeficiente de transmissão para radiação difusa e direta para dias claros

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939 \tau_D \quad (B13)$$

O valor da radiação difusa incidente numa superfície vertical pode ser escrita como;

$$I_d = I_{dh} F_{cs} \quad (B14)$$

onde o  $F_{ss}$  é o fator de forma entre o céu e a superfície. Para superfícies verticais  $F_{cs} = 0,5$  e para superfícies horizontais  $F_{cs} = 1,0$

A parcela de radiação refletida do chão inclui a radiação difusa e direta incidente numa superfície horizontal. De modo que a radiação refletida do chão para uma superfície vertical pode ser escrita como;

$$I_R = \rho_g F_{gs} [I_{dh} + I_{DN} \sin(\beta)] \quad (B15)$$

onde,  $\rho_g$  é a refletividade do solo e  $F_{gs}$  é o fator de forma entre o solo e a superfície e pode ser escrito do seguinte modo

$$F_{gs} = \frac{1 - \cos(\Sigma)}{2}$$

para superfície vertical  $F_{gs} = 0,5$

A refletividade pode ser obtida da tabela 12 do ASHRAE Handbook fundamental para diferentes tipos de superfície e diferentes ângulos de incidência.

Somando as três parcelas de radiação incidente, temos

$$I_T = I_{DN} \cos(\theta) + \left( \frac{\tau_d}{\tau_D} \right) \sin(\beta) I_{DN} F_{cs} + \rho_g F_{gs} \left[ \left( \frac{\tau_d}{\tau_D} \right) \sin(\beta) I_{DN} + I_{DN} \sin(\beta) \right] \quad (B16)$$

sendo que para superfícies verticais  $F_{cs} = F_{gs}$  e  $I_{DN} = I_{0,N} \tau_D$  a relação acima pode ser rescrita da seguinte forma;

$$I_T = I_{0,N} \left\{ \tau_D \cos(\theta) + 0,5 \sin(\beta) \left[ \tau_d + \rho_g \tau_d + \rho_g \tau_D \right] \right\} \quad (B17)$$

## B2 Temperatura Atmosférica.

Para o cálculo da variação horária da temperatura atmosférica podemos utilizar o método descrito no ASHRAE Handbook - Fundamentals[1985]

A temperatura ambiente horária pode ser calculada dos valores da temperatura ambiente máxima e mínima, usando a equação (B18)

$$T_{amb}(t) = T_{max} - \left( \frac{f}{100} \right) (T_{max} - T_{min}) \quad (B18)$$

o fator  $f$  é obtido da tabela 2-B

**Tabela 2-B** Fator  $f$  para cada hora do dia

Hora	fator (f)	Hora	fator (f)	Hora	fator (f)
1	87	9	71	17	10
2	92	10	56	18	21
3	96	11	39	19	34
4	99	12	23	20	47
5	100	13	11	21	58
6	98	14	3	22	68
7	93	15	0	23	76
8	84	16	3	24	82

Para obter valores intermediários do fator (f) os dados foram plotados contra o tempo e foi ajustada uma curva polinomial de grau 9, obtendo assim uma equação para o cálculo do fator em qualquer instante de tempo. A curva e os coeficientes do polinômio se encontram na figura (2-B)

Os valores de  $T_{\max}$  e  $T_{\min}$  são obtidos de dados meteorológicos locais. A tabela 3-B mostra as médias mensais de  $\bar{T}_{\max}$  e  $\bar{T}_{\min}$  durante um ano para a cidade de Campinas-SP

**Tabela 3-B** Temperatura médias (máximas e mínimas) durante um ano para a cidade de Campinas

Mês	$\bar{T}_{\max}$ (°C)	$\bar{T}_{\min}$ (°C)	Mês	$\bar{T}_{\max}$ (°C)	$\bar{T}_{\min}$ (°C)
Janeiro	29,7	18,6	Julho	24,7	11,6
Fevereiro	29,5	18,7	Agosto	26,8	12,8
Março	29,4	18,0	Setembro	28,4	14,9
Abril	27,6	15,8	Outubro	28,4	15,2
Maio	25,3	13,5	Novembro	28,7	16,7
Junho	24,4	11,9	Dezembro	29,0	17,9

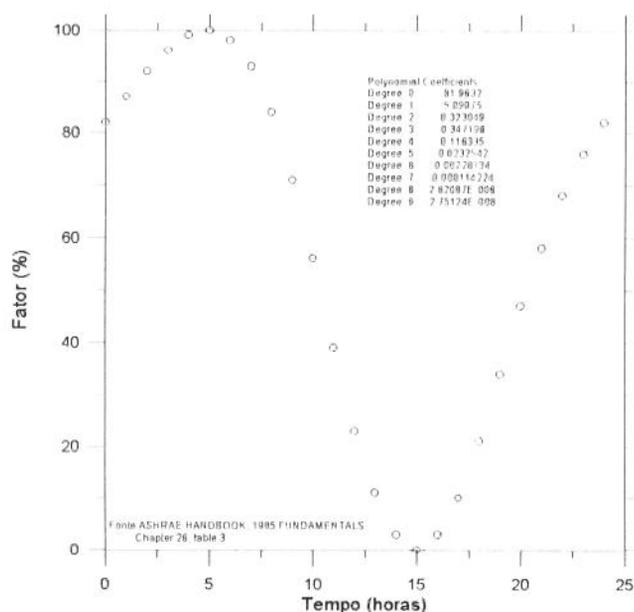


Figura 2-B.- Curva interpolada do fator (f) em função do tempo

## Apêndice C

### Modelo de Absorção para a Radiação Solar Incidente

Quando a radiação solar atravessa um meio semitransparente esta sofre uma atenuação devido a processos de absorção no material e esta absorção deve ocorrer ao longo de todo o caminho percorrido pelo raio dentro do material.

Considerando que esta atenuação é proporcional à intensidade da radiação e ao caminho percorrido pelo raio que entra no meio, podemos escrever;

$$dI = -P I dx \quad (C1)$$

onde P é uma constante de proporcionalidade denominada coeficiente de extinção.

Integrando a equação (C1) entre os limites  $x = 0$  e uma posição  $x$  qualquer

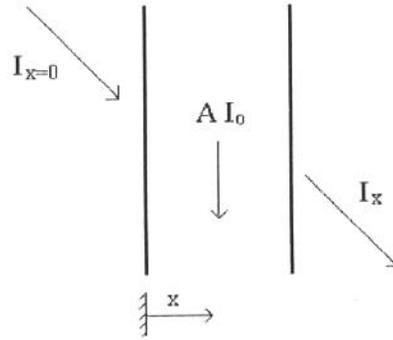
$$\int_{I_{x=0}}^{I_x} \frac{dI}{I} = \int_0^x -P dx \quad (C2)$$

resulta na seguinte expressão, após ser arranjada adequadamente

$$\frac{I_{x=0} - I_x}{I_{x=0}} = (1 - e^{-Px}) \quad (C3)$$

onde a expressão entre parêntesis, no lado direito da equação (C3) representa a fração de radiação absorvida ao longo da distância  $x$ , como mostra a figura (1-C), portanto

$$I_{x=0} - I_x = A_x I_{x=0} \quad (C4)$$



**Figura 1-C** Radiação absorvida ao longo da distância  $x$

Admitindo que a espessura do meio semitransparente possa ser subdividido em pequenos intervalos infinitesimais de largura  $\Delta x$  como mostra a figura (2-C) e que a radiação é absorvida em cada um dos nós a medida que o raio atravessa o meio, podemos escrever a seguinte relação;

$$I_{x+0} - I_{x+\Delta x} = A_{x+\Delta} I_{x+0} \quad (C5)$$

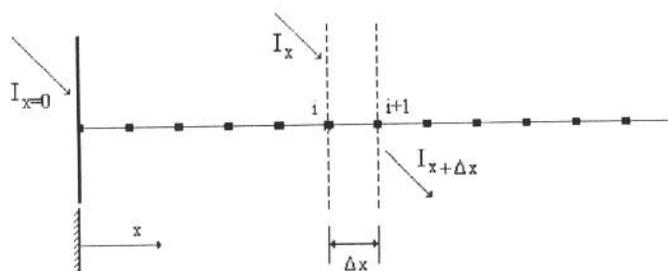
Subtraindo (C4) de (C5)

$$I_{x+\Delta x} - I_x = -A_{\Delta x} I_x \quad (C6)$$

A diferença entre a intensidade da radiação disponível no nó (i) e a intensidade da radiação no nó (i+1) corresponde à radiação absorvida no intervalo  $\Delta x$  e que será computada como radiação absorvida no nó (i)

Este procedimento permite distribuir a radiação absorvida no meio semitransparente de uma forma exponencial. Usando a notação da figura (2-C)

$$I_{i+1} - I_i = -A_i I_i \quad (C7)$$



**Figura 2-C** Representação da radiação absorvida no nó (i)

## Apêndice D

### Definições

Neste apêndice são definidos alguns conceitos utilizados no decorrer da apresentação do presente trabalho, e que não foram claramente explicados no momento do seu uso para não sobrecarregar o texto. São conceitos simples e suficientemente claros para profissionais da área de conforto térmico e transferência de calor, e a sua inclusão neste apêndice é para uma compreensão maior deste trabalho por parte de pessoas de fora da área que na eventualidade venham consulta-lo.

**Coefficiente Global de Transferência de Calor (U):** Este coeficiente fornece uma medida da transferência de calor de uma janela devido à diferença de temperatura entre o meio ambiente interno e o meio ambiente externo, e é definido como:

$$U = \frac{q}{A(T_{\text{ext}} - T_{\text{int}})} \quad (\text{D1})$$

onde  $q$  é o calor transferido através da janela e esta baseado na soma dos fluxos de calor convectivos e radiativos (radiação térmica). O valor de  $U$  pode também ser definido como:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{G,\text{ext}}} + \frac{1}{D} + \frac{1}{h_{G,\text{int}}}} \quad (\text{D2})$$

onde  $h_{G,\text{ext}}$  e  $h_{G,\text{int}}$  são o coeficiente de película global que inclui os efeitos convectivos e radiativos tanto no meio ambiente externo quanto no meio ambiente interno, e o termo  $D$  corresponde à **Conductância** térmica da janela e esta é definida como:

$$D = \frac{q}{A(T_{S,ext} - T_{S,int})} \quad (D3)$$

onde  $(T_{S,ext} - T_{S,int})$  corresponde à diferença de temperatura entre a superfície externa e interna da janela.

**Coefficiente de Ganho de Calor Solar (SHGC):** É definido como a fração de radiação solar incidente sobre a janela que alcança o meio ambiente interno. Esta fração é composta de duas parcelas;

1. Radiação solar que atravessa diretamente a janela e é absorvida pelo ambiente interno
2. Radiação solar absorvida dentro do vidro e direcionada para o espaço interno por mecanismos de transferência de calor (radiação e condução).

**Coefficiente de Sombreamento (SC):** É um indicador usado para caracterizar a performance de janelas. O coeficiente de sombreamento é definido em termos do coeficiente de ganho de calor solar (SHGC) e é a razão entre o SHGC da janela em estudo e o SHGC de uma janela adotada como padrão. A janela adotada como padrão é formada por um painel de vidro simples com 0,86 de transmitância, 0,08 de refletância e 0,06 de absortância.

**Parâmetros óticos:** Quando a radiação solar incide sobre uma superfície semitransparente, uma parte desta radiação é refletida, uma outra parte é absorvida no material e a parcela restante é diretamente transmitida. Em geral nos temos:

$$R + T + A = 1 \quad (D4)$$

onde R corresponde ao coeficiente de **refletância**, T é o coeficiente de **transmitância** e, finalmente, A corresponde ao coeficiente de **absortância**.

Os valores dos coeficientes de refletância e transmitância são normalmente obtidos em testes de laboratório através de medidas diretas e de forma relativamente fácil, usando para isto um espectrofotômetro. Na determinação experimental do valor do coeficiente de absortância as dificuldades são maiores e raramente é medido diretamente em laboratório. A sua determinação é de forma indireta através do conhecimento dos valores de refletância e transmitância e usando a relação (D4)