

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Aplicação de Conceitos de Conforto Térmico**  
**Passivo na Construção Civil em São Luís**

Autora: Lílian Leite Marques

Orientador: Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail

09/07

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Aplicação de Conceitos de Conforto Térmico Passivo na Construção Civil em São Luís**

Autora: Lílian Leite Marques  
Orientador: Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail

Curso: Mestrado Profissional em Engenharia Mecânica-UNICAMP  
Área de concentração: Refrigeração e Condicionamento Ambiental

Trabalho Final apresentado à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Refrigeração e Condicionamento Ambiental.

São Luís-MA  
2007

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

M348a Marques, Lílian Leite  
Aplicação de conceitos de conforto térmico passivo  
na construção civil em São Luís / Lílian Leite Marques.  
--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail  
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade  
Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia  
Mecânica.

1. Temperatura. 2. Conforto térmico. 3. Telhado -  
Construção. I. Ismail, Kamal Abdel Radi. II.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

Titulo em Inglês: Application of concepts of thermal parcial confort in civil  
construction in São Luís

Palavras-chave em Inglês: Temperature, Thermal confort, Inclination of the roof

Área de concentração: Refrigeração e Condicionamento Ambiental

Titulação: Mestre em Engenharia Mecânica

Banca examinadora: Waldemir Silva de Lima e Sandra Maria Oliveira Sá

Data da defesa: 12/06/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Trabalho Final de Mestrado Profissional**

**Aplicação de Conceitos de Conforto Térmico**  
**Passivo na Construção Civil em São Luís**

Autora: Lillian Leite Marques

Orientador: Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail



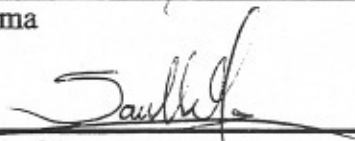
---

Prof. Dr. Kamal A. R. Ismail  
FEM / UNICAMP



---

Prof. Dr. Waldemir Silva de Lima  
DEMECP / UEMA



---

Profª. Drª. Sandra Maria Oliveira Sá  
CENA / USP - PIRACICABA

São Luís, 12 de junho de 2007

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho a minha mãe Rachel, a meu pai Waldemir, a meus irmãos Fred e José Maria e a meus filhos Braga Neto e Graziella.

Dedico, especialmente, ao querido companheiro Daniel Leite.

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus por tudo, principalmente pela minha saúde restabelecida e por toda a natureza existente.

Ao primo João Luís Leite Frazão (in memoriam).

Aos parentes e amigos que me ampararam no momento crítico da minha vida, como: Amaro Santana, Clementina, Maria do Carmo, Aldenora, Elvira Carvalhal, Paulo Lyra, Jairo, Benê, Socorro, Amália, Magali, Edmée, Bira, pelo apoio no momento em que mais precisei.

Aos professores e amigos: Celso Lago, Sólon, Waldemir, Valdirson, Paulino, Juca, Abelardo e Narciso, pelas suas valiosas contribuições, além da paciência ao longo deste trabalho.

Aos servidores administrativos da Universidade Estadual do Maranhão: Maria de Lourdes, João Goulart, José Magno Silva e Flávia Zenha, e também aos amigos Tonnyfran e Giovanni Bruno, pelo incentivo e contribuição.

Aos prestadores de serviço de conservação Aquiles e Maria das Dores, por sua presteza nas necessidades deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, confiaram e contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Grandes realizações são possíveis quando se dá  
importância aos pequenos começos.”*

## **Resumo**

MARQUES, Lílian Leite, Aplicação de Conceitos de Conforto Térmico Passivo na Construção Civil em São Luís, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

Neste trabalho procurou-se desenvolver propostas que maximizem o conforto térmico natural das habitações situadas em São Luís-MA, próximo à linha do Equador, com um clima quente e úmido. Assim alterou-se a geometria do telhado para ser analisada, conforme a inclinação trabalhada, a temperatura mais confortável no interior de um protótipo de 3,00m x 3,00m. Para tanto, monitoraram-se também as temperaturas das paredes, tanto internas como externas e do telhado, do protótipo, tendo-se verificado que quanto maiores as inclinações do telhado, tanto menor a temperatura, ou seja, mais confortável termicamente.

Palavras chave:

- temperatura, conforto térmico, inclinação do telhado.



## **Abstract**

MARQUES, Lílian Leite, Application of Concepts of Thermal Partial Confort in Civil Construction in São Luís, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2007. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

In this work has tried to develop proposals that improvise the natural thermal confort of the habitations situated in São Luís – MA, next to the equator line, with a hot and humid weather, thus, have been done the alteration of the roof's geometry for analysis, in agreement the worked inclination, was looked to show the most comfortable temperature inside a 3,00 x 3,00 meters prototype. For such, has been monitored the internal and externals temperatures of the walls and roofs. Was verified that how much the inclination of the roof is increased, the temperature decrease, so more thermal confort.

Key words:

- temperature, thermal confort, inclination of the roof.

## Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Nomenclatura	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão da Literatura	3
2.1 Transferência de Calor	3
2.2 Formas de Transferência de Calor	3
2.2.1 Condução	3
2.2.2 Radiação	8
2.3 Convecção natural	12
2.3.1 Equações Simplificadas para a Camada Limite em Placas Verticais	13
2.3.2 Análise de Escala do Regime Laminar	16
2.3.3 Fluxo de Calor Uniforme na Parede	22
2.3.4 Placas Inclínadas	24
3 Material e Métodos	27
3.1 Descrição do Protótipo	27
3.2 Instrumentos de Medida	30
3.3 Condições Operacionais	32
3.4 Metodologia	32
4 Resultados e Discussão	34
5 Conclusão e Sugestões para próximos trabalhos	48
Referências Bibliográficas	49
Anexos	50

## Lista de Figuras

2.1	Definição do conceito de temperatura a partir da transferência de calor e da obtenção do equilíbrio térmico .....	4
2.2	Condução unidimensional num corpo sólido com geração interna de calor .....	4
2.3	Classificação do meio condutor térmico em relação à homogeneidade e isotropia ..	6
2.4	Condutibilidade térmica em função da temperatura .....	7
2.5	Radiação térmica num espaço evacuado .....	9
2.6	Transferência de calor convectiva externa .....	10
2.7	Transferência de calor convectiva interna .....	11
2.8	Jato parietal movido por empuxo numa parede .....	13
2.9	Estrutura das camadas limites, térmicas e hidrodinâmica, numa parede vertical (o nº de Prandtl do fluido é alto) .....	14
2.10	Estrutura das camadas limites, térmicas e hidrodinâmica, numa parede vertical (o nº de Prandtl do fluido é baixo) .....	20
2.11	Placas inclinadas em relação à direção vertical .....	25
3.1	Planta baixa com norte, cobertura e fachada do protótipo .....	28
3.2	Foto do protótipo com telhado na inclinação 45° .....	29
3.3	Foto do protótipo com telhado na inclinação 37,5° .....	29
3.4	Foto do protótipo com telhado na inclinação 35° .....	29
3.5	Foto do protótipo com telhado na inclinação 30° .....	29
3.6	Foto do protótipo com telhado na inclinação 25° .....	30
3.7	Foto do protótipo com telhado na inclinação 15° .....	30
3.8	Foto do protótipo com telhado na inclinação 0° .....	30
3.9	Local dos termopares no protótipo .....	31

3.10	Saída dos termopares, seletores, termômetro digital e termômetro de vidro .....	32
4.1	Temperatura ambiente de cada inclinação em função da hora .....	34
4.2	Radiação solar de cada inclinação em função da hora .....	35
4.3	Velocidade do vento de cada inclinação em função da hora .....	35
4.4	Empena baixa de cada inclinação em função da hora .....	36
4.5	Centro médio de cada inclinação em função da hora .....	37
4.6	Centro baixo de cada inclinação em função da hora .....	37
4.7	Cumeeira externa de cada inclinação em função da hora .....	38
4.8	Cumeeira interna de cada inclinação em função da hora .....	38
4.9	Empena alta de cada inclinação em função da hora .....	39
4.10	Empena média de cada inclinação em função da hora .....	39
A.I	Telhado externo (E) de cada inclinação em função da hora.....	51
A.II	Telhado externo (W) de cada inclinação em função da hora.....	51
A.III	Telhado interno (E) de cada inclinação em função da hora.....	52
A.IV	Telhado interno (W) de cada inclinação em função da hora.....	52
A.V	Beiral externo (E) de cada inclinação em função da hora.....	53
A.VI	Beiral externo (W) de cada inclinação em função da hora.....	53
A.VII	Beiral interno (E) de cada inclinação em função da hora.....	54
A.VIII	Beiral interno (W) de cada inclinação em função da hora.....	54
A.IX	Parede interna (E) de cada inclinação em função da hora.....	55
A.X	Parede interna (W) de cada inclinação em função da hora.....	55
A.XI	Parede interna (S) de cada inclinação em função da hora.....	56
A.XII	Parede interna (N) de cada inclinação em função da hora.....	56
A.XIII	Parede externa (E) de cada inclinação em função da hora.....	57
A.XIV	Parede externa (W) de cada inclinação em função da hora.....	57
A.XV	Parede externa (S) de cada inclinação em função da hora.....	58
A.XVI	Parede externa (N) de cada inclinação em função da hora.....	58

## Lista de Tabelas

4.1	Inclinação: 45°, $H_{emp} = 1,50$ m, Situação da casa: fechada .....	40
4.2	Inclinação: 37,5°, $H_{emp} = 1,32$ m, Situação da casa: fechada .....	41
4.3	Inclinação: 35°, $H_{emp} = 1,26$ m, Situação da casa: fechada .....	42
4.4	Inclinação: 30°, $H_{emp} = 0,86$ m, Situação da casa: fechada .....	43
4.5	Inclinação: 25°, $H_{emp} = 0,70$ m, Situação da casa: fechada .....	44
4.6	Inclinação: 15°, $H_{emp} = 0,40$ m, Situação da casa: fechada .....	45
4.7	Inclinação: 0°, $H_{emp} = 0,00$ m, Situação da casa: fechada .....	46
4.8	Velocidade do vento e radiação solar horária das inclinações trabalhadas .....	47

## Nomenclatura

### *Letras Latinas*

$Bo_y$	número de Boussinesq, $Bo_y = Ra_y Pr$
$g$	aceleração da gravidade ( $m/s^2$ )
$Gr_y$	número de Grashof baseado na diferença de temperatura e altura $y$ , $Gr_y = g\beta y^3 \Delta T / \nu^2 = Ra_y / Pr$
$h_y$	coeficiente local de transferência de calor na posição $y$ ( $W/m^2.K$ )
$k$	condutibilidade térmica ( $W/m.K$ )
$Pr$	número de Prandtl ( $Pr = \nu / \alpha$ )
$q''$	fluxo de calor ( $W/m^2$ )
$q''_{w,y}$	fluxo de calor local na parede ( $W/m^2$ )
$Ra_y$	número de Rayleigh baseado na diferença de temperatura e altura $y$ ( $Ra_y = g\beta y^3 \Delta T / \alpha \nu$ )
$Ra_y^*$	número de Rayleigh baseado no fluxo de calor e altura $y$ ( $Ra_y^* = g\beta q''_{w,y} y^4 / \alpha \nu k$ )
$T_w$	temperatura de parede (K ou °C)
$T_\infty$	temperatura ao longe ou do reservatório (K ou °C)
$u$	componente do vetor velocidade no eixo $x$ (m/s)
$v$	componente do vetor velocidade no eixo $y$ (m/s)
$x$	coordenada cartesiana (m)
$y$	coordenada cartesiana (m)

### *Letras Gregas*

$\alpha$	difusibilidade térmica, $\alpha = k / \rho c_p$ , (m <sup>2</sup> /s)
$\beta$	coeficiente de expansão térmica, (K <sup>-1</sup> )
$\delta$	espessura de camada limite de velocidade, (m)
$\delta_s$	espessura da camada viscosa, (m)
$\delta_T$	espessura da camada limite térmica (m)
$\Delta T$	diferença de temperatura (K)
$\rho$	massa específica (kg/m <sup>3</sup> )
$\phi$	ângulo de inclinação da placa (rad)

### *Superescritos*

( )' *flutuação*

### *Subscritos*

( )<sub>w</sub> parede

( )<sub>∞</sub> ao longe

# Capítulo 1

## Introdução

O corpo humano, como uma máquina bioquímica que é, precisa dissipar calor para funcionar. A sensação de conforto vem quando o calor dissipado é exatamente aquele de que se necessita, o que varia de pessoa para pessoa e de momento para momento. Assim, têm-se sensações de frio, conforto e calor, dependendo da dissipação de calor no corpo. A dissipação de calor depende da temperatura, da ventilação e da umidade.

Desde que a temperatura do ar seja menor que a do corpo humano, a ventilação pode transformar uma atmosfera dita quente em agradável, apenas variando sua intensidade (mantendo-se a temperatura do ar).

O ar úmido conduz muito mais calor que o ar seco, e, portanto, é preciso levar em conta a condutibilidade térmica do ar em toda a sua extensão.

Com uma classificação climática úmida, em São Luís, os materiais de construção não devem ter inércia muito grande, pois esta dificultaria a retirada de calor interno armazenado durante o dia, prejudicando o resfriamento da construção quando a temperatura externa estivesse mais agradável que internamente.

A quantidade de radiação solar incidente é a variável climática que mais interfere no desempenho térmico na cidade de São Luís situada à latitude  $2^{\circ}35'$ , podendo-se afirmar que quanto menor for a latitude, maior será a quantidade de radiação solar recebida, e, portanto mais elevadas serão as temperaturas do ar.



Diante disso, pensou-se, desenvolver uma moradia com materiais de construção civil de uso consagrado, que proporcione aos moradores conforto térmico de modo passivo, ou seja, sem a necessidade de potência externa, como o consumo de energia cada vez maior, gerada pelo uso de condicionador de ar, fruto de desperdício da arquitetura moderna.

Outra decisão para a escolha do tema foi o uso de técnicas construtivas simples, mas racionais, que visem ao aproveitamento das condições favoráveis da natureza para o condicionamento ambiental.

Os materiais utilizados para a construção do protótipo foram: alvenaria de tijolo cerâmico, com revestimento interno e externo de argamassa de cimento e areia no traço 1:6 esp. 2,0 cm, esquadrias em aço de chapa ondulada. Optou-se também pela utilização de telhas onduladas de fibrocimento, por serem de baixo custo e facilitarem a alteração da geometria do telhado, que é o objeto deste trabalho.

Essa idéia da alteração da geometria do telhado é devida à reclamação dos habitantes de casas cobertas com telhas de fibrocimento quanto à falta de conforto térmico, o que se pretende avaliar com a influência da inclinação do telhado acima citado. Assim, analisaram-se as inclinações: 45° (100%), 37,5° (87,9%), 35° (83,9%), 30° (57,7%), 25° (46,6%), 15° (26,8%) e 0°, para todas as inclinações, deixando-se um beiral de 30 cm.

Para refletir mais a radiação solar e, portanto, permitir que menos calor atravessasse os vedos, a pintura das paredes, tanto interna como externamente, foi de cor clara, a saber, branca.

## Capítulo 2

### Revisão da Literatura

#### 2.1 Transferência de Calor

A interação que ocorre quando dois sistemas, sistema (A) e seu meio (B), de temperaturas diferentes são colocados em contato térmico é o que se define como transferência de calor. Por isso, a transferência de calor descreve como a diferença entre a temperatura do sistema A e a do meio B influencia a taxa de transferência de calor entre os sistemas, o que é complicado devido não ser função única da diferença de temperaturas, mas também de outros fatores como a configuração física formada pelos corpos que interagem termicamente. Assim,

$$q = \text{função}(T_A, T_B, \text{tempo, propriedades termofísicas, tamanhos, formas geométricas, movimento relativo ou escoamento dos corpos A e B}) \quad (2.1)$$

A definição de equilíbrio térmico e temperatura, Fig. 2.1, sugere que a função taxa de transferência de calor, Eq. 2.1, apresenta uma propriedade especial, ou seja,

$$q=0 \quad \text{quando} \quad T_A = T_B \quad (2.2)$$

Para a função taxa de transferência de calor, analisar-se-ão separadamente os três modos específicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

#### 2.2 Formas de Transferência de Calor

##### 2.2.1 Condução

A barra de material sólido mostrado na Fig. 2.2 apresenta as quatro superfícies laterais

adiabáticas e, deste modo, a transferência de calor só pode ocorrer na direção  $x$ . Do ponto de vista termodinâmico, cada fatia da barra com espessura  $\Delta x$  pode ser considerada como um sistema, porque a massa de cada fatia é fixa. A aplicação da primeira lei da termodinâmica a este sistema resulta em:

$$q_x - q_{x+\Delta x} - w = \frac{\partial E}{\partial \tau} \quad (2.3)$$

onde a taxa de transferência de calor na barra  $q_x$  será considerada positiva quando a transferência ocorrer no sentido crescente do eixo  $x$ .

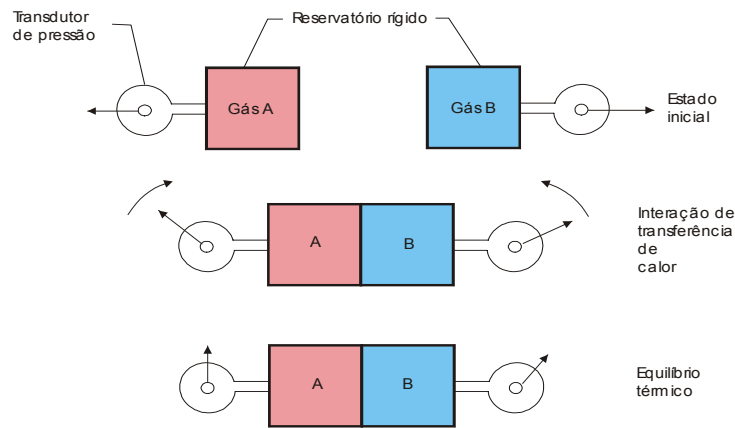


Figura 2.1 Definição do conceito de temperatura a partir da transferência de calor e da obtenção do equilíbrio térmico.

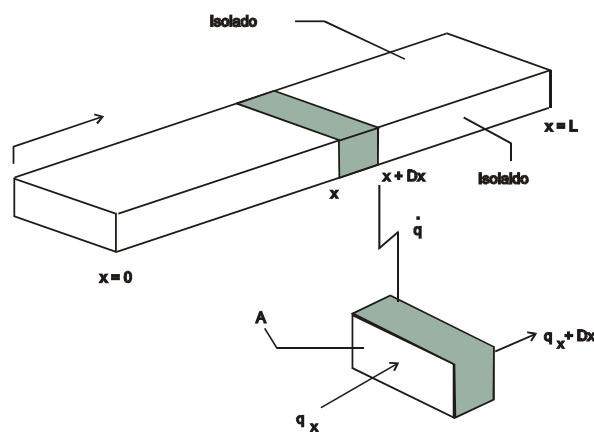


Figura 2.2 Condução unidimensional num corpo sólido com geração interna de calor.

Far-se-á uma modificação relativa ao modelo que será utilizado para a taxa de transferência de calor na barra  $q_x$ . Note-se que a Eq. 2.2 mostra que esta taxa é nula quando a barra apresenta temperatura uniforme. Assim, vamos admitir que  $q_x$  seja proporcional à diferença local de temperaturas na direção  $x$ , ou seja,  $q_x = C(T_x - T_{x+\Delta x})$ . O resultado de várias experiências sempre mostrou que a constante  $C$  é aproximadamente proporcional a  $A/\Delta x$ . Assim, pode-se admitir que  $C = kA/\Delta x$ , onde  $k$  é a condutibilidade térmica do material da barra. Se tomarmos o limite para espessura do sistema ( $\Delta x \rightarrow 0$ ), obter-se-á a equação para a taxa de transferência de calor local na barra.

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.4)$$

Essa equação é conhecida como a lei de Fourier para a condução de calor ou como a lei de Fourier para a difusão de calor. Essa equação também define de  $k$ , a condutibilidade térmica, cujo valor precisa ser determinado experimentalmente.

Como o valor da condutibilidade térmica é sempre positivo (veja a Fig. 2.4), o sinal negativo no lado direito da Eq. 2.4 é um reflexo da segunda lei da termodinâmica (que determina que  $q_x$  sempre ocorre no sentido decrescente das temperaturas).

Aplicando essas modificações à equação da primeira lei da termodinâmica, Eq. 2.3, obtém-se uma equação a derivadas parciais referentes ao campo de temperaturas,  $T(x, y)$ , que é conhecida como equação da condução.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.5)$$

Condução longitudinal	+ Geração de calor interna	=	Inércia térmica
--------------------------	-------------------------------	---	--------------------

Essa equação mostra os três efeitos importantes no balanço de energia em qualquer ponto da barra: a taxa de geração interna de calor, a inércia térmica e a transferência líquida de calor por condução longitudinal. A unidade de todos os termos que fazem parte da Eq. 2.5 é  $W/m^3$ .

O termo referente à inércia térmica mostra que é necessária uma transferência líquida de calor positiva para conseguir-se um aumento na temperatura de uma quantidade finita de massa (no caso onde a geração interna de calor é nula). Quando esta taxa de transferência de calor é fixa, a taxa de aumento de temperatura é mais alta quanto mais baixo for o valor do produto  $\rho c$ . O grupo  $\rho c$  representa a inércia térmica por unidade de volume ou a capacidade térmica específica do meio.

A condutibilidade térmica pode ser determinada a partir da Eq. 2.4 se se utilizar um aparato experimental que reproduza as condições mostradas na Fig. 2.2 e uma instrumentação que forneça os valores da taxa de transferência de calor e do gradiente de temperatura. Geralmente, o valor medido dependerá do estado termodinâmico local do material da amostra, da orientação relativa da amostra em relação à direção associada ao fluxo de calor e do ponto onde as medições forem realizadas. O caso geral é relativo a um meio condutor anisotrópico e não homogêneo. Um exemplo desse tipo de meio está mostrado na Fig. 2.3 *a*.

As outras ilustrações da Fig. 2.3 são referentes a três classes especiais de materiais. As medições de  $k$  revelaram que, para os casos de materiais não homogêneos e isotrópicos (Fig.2.3b), a condutibilidade térmica depende do ponto onde a medição é realizada.

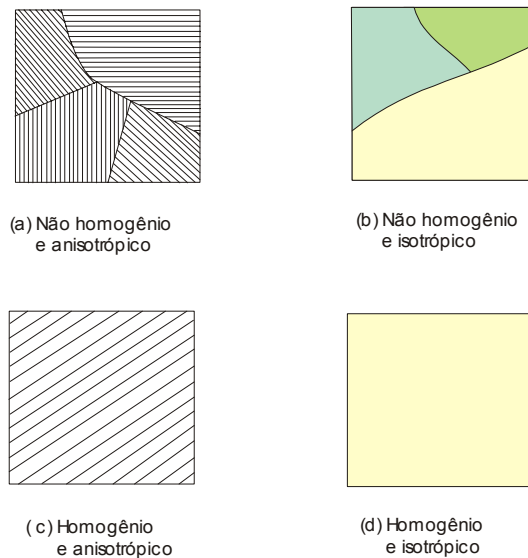


Figura 2.3 Classificação do meio condutor térmico em relação à homogeneidade e isotropia.

Os sólidos cristalinos, a madeira e alguns tipos de isolamentos elétricos são enquadrados como material homogêneo e anisotrópico (Fig.2.3c) desde que a distância entre as fibras, ou lâminas adjacentes sejam muito menores que o tamanho da amostra.

A maioria dos dados de condutibilidade térmica encontrados nos livros e manuais são referentes aos materiais isotrópicos e homogêneos (Fig. 2.3d), e as relações existentes entre  $k$  e  $T$  estão mostradas na Fig. 2.4. A temperatura pode alterar significativamente o valor de  $k$ , que pode diferenciar os materiais entre “bons” e “maus” condutores.

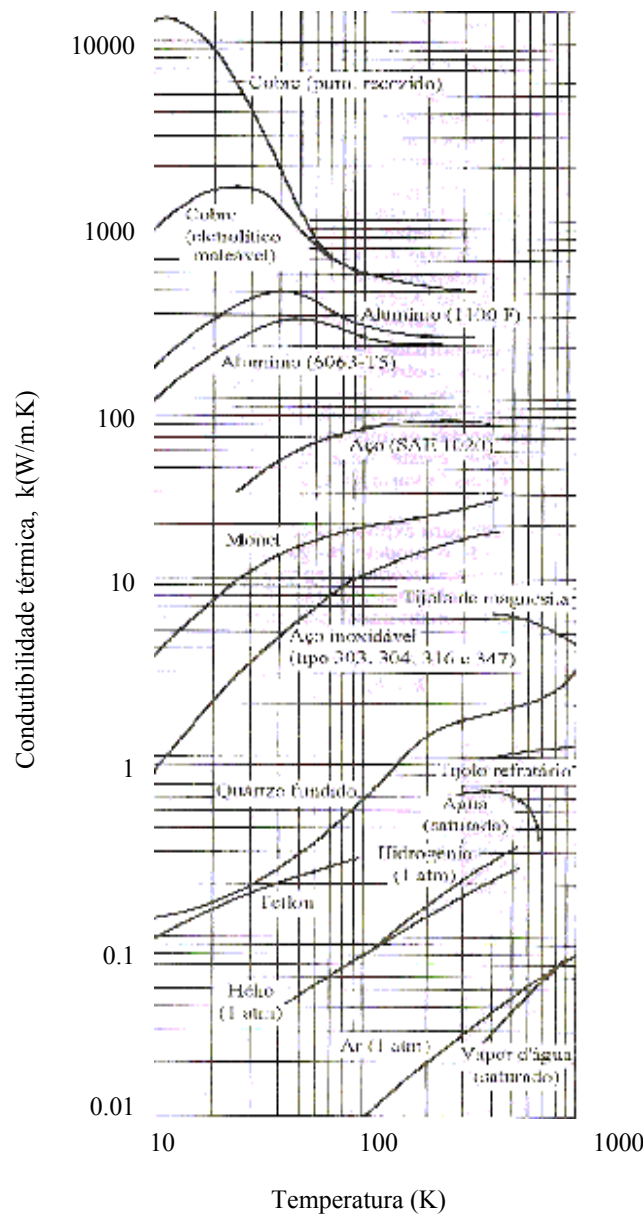


Figura 2.4 Condutibilidade térmica em função da temperatura.

### 2.2.2 Radiação

O espaço evacuado, que circunda o vaso esférico B mostrado na Fig. 2.5, é uma “camisa de vácuo”, um tipo de isolamento utilizado em muitos equipamentos, como por exemplo, nos vasos de armazenamento de líquidos criogênicos (principalmente nos de nitrogênio e hélio). Este espaço evacuado funciona adequadamente como isolante térmico porque o material que poderia atuar como condutor, ou escoar e provocar a convecção, está ausente. Se um fluido estivesse presente no espaço anular (por exemplo: ar ou o vapor da tinta utilizada no recobrimento das superfícies que limitam este espaço), as forças de empuxo promoveriam um escoamento fechado no fluido, conhecido como circulação, e provocaria uma transferência de calor convectiva.

A experiência mostra que existe uma transferência de calor finita do vaso externo (quente) para o vaso interno (frio) mesmo que o espaço entre eles esteja completamente evacuado. Esta taxa líquida de transferência de calor é devida a uma interação térmica entre dois corpos que pode ser efetuada a distância e sem a necessidade de um meio interveniente, ou seja, a radiação térmica.

A teoria eletromagnética explica os efeitos da radiação térmica. A taxa líquida de transferência de calor (de A para B na fig. 2.5) representa a diferença entre o fluxo de energia que a superfície quente “bombardeia” a superfície fria e o fluxo de energia mais fraco que emana da superfície fria. Sob certas condições, a taxa de transferência líquida,  $q_{A-B}$ , é dada por

$$q_{A-B} = \beta A (T_A^4 - T_B^4) \quad (2.6)$$

onde A é a área de um dos vasos,  $T_A$  e  $T_B$  são as temperaturas absolutas das superfícies dos vasos.

O fator de proporcionalidade  $\beta$  normalmente depende das temperaturas  $T_A$  e  $T_B$ , do tamanho e posição relativa das duas superfícies, do material, acabamento, estado e limpeza destas superfícies. A Eq. 2.6 representa um outro caso especial da função taxa de transferência de calor apresentada nas Eqs. 2.1 e 2.2.

Concluindo, o que diferencia a transferência de calor por radiação dos outros modos, é que a radiação pode ocorrer na ausência de um meio contínuo. De fato, a transferência de calor também pode ocorrer quando o meio contínuo que separa as superfícies de transferência de calor for suficientemente transparente (por exemplo, o ar). Um dos muitos desafios presentes na aplicação da engenharia térmica é avaliar a taxa total de transferência de calor em problemas onde todos esses mecanismos (radiação, convecção e condução) atuam simultaneamente.

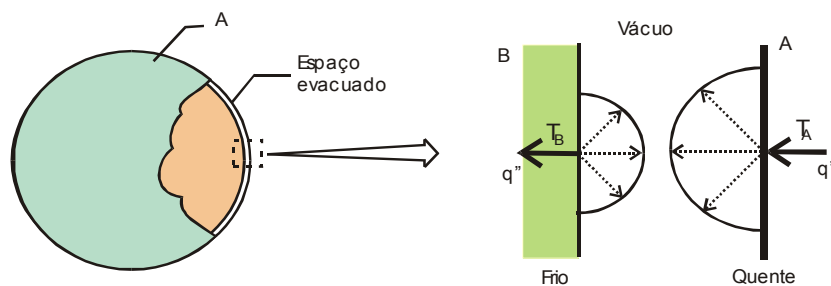


Figura 2.5 Radiação térmica num espaço evacuado.

### 2.2.3 Convecção

Convecção é o processo de transferência de calor executado pelo escoamento do fluido. O fluido atua como agente transportador da energia que é transferida da parede (ou para a parede). As duas entidades mais comuns e importantes nas interações de transferência de calor por convecção são as paredes sólidas e o escoamento de fluido em contato com estas paredes. As características do escoamento (por exemplo, perfil de velocidade e turbulência) afetam, de modo significativo, a taxa de transferência de calor entre a parede e o escoamento.

Na configuração de escoamento externo, Fig. 2.6, o escoamento envolve o corpo com que interage termicamente. Na camada limite (região do escoamento que recobre a parede sólida) ocorre a transição entre a temperatura da parede ( $T_p$ ) e a temperatura do fluido ao longe ( $T_\infty$ ). Nesta região do escoamento, a velocidade decresce do valor referente ao longe



para o valor nulo na superfície da parede. Para a taxa de transferência de calor entre a superfície sólida e o fluido ser afetada por estas temperaturas extremas ( $T_p$ ,  $T_\infty$ ) e pelo escoamento é preciso conhecer-se o fluxo de calor local e integrá-lo para obter a taxa de transferência de calor do corpo para o fluido.

Assim, definir-se-á primeiramente o coeficiente de transferência de calor externo do seguinte modo:

$$q'' = h(T_p - T_\infty) \quad (2.7)$$

Desta forma, o fluxo de calor se anula quando as temperaturas da superfície do sólido e do fluido são iguais. O questionamento do parágrafo anterior se reduz à determinação do coeficiente de transferência de calor e, em particular, como  $h$  é influenciado pelas características do escoamento. Para esta análise, precisa-se conhecer tanto a distribuição de temperaturas na região do escoamento próxima da parede como a distribuição de velocidades nesta região. Assim, as análises da convecção serão baseadas não somente nas generalizações da aplicação do princípio de conservação de energia, mas também da conservação da massa e da quantidade de movimento do escoamento.

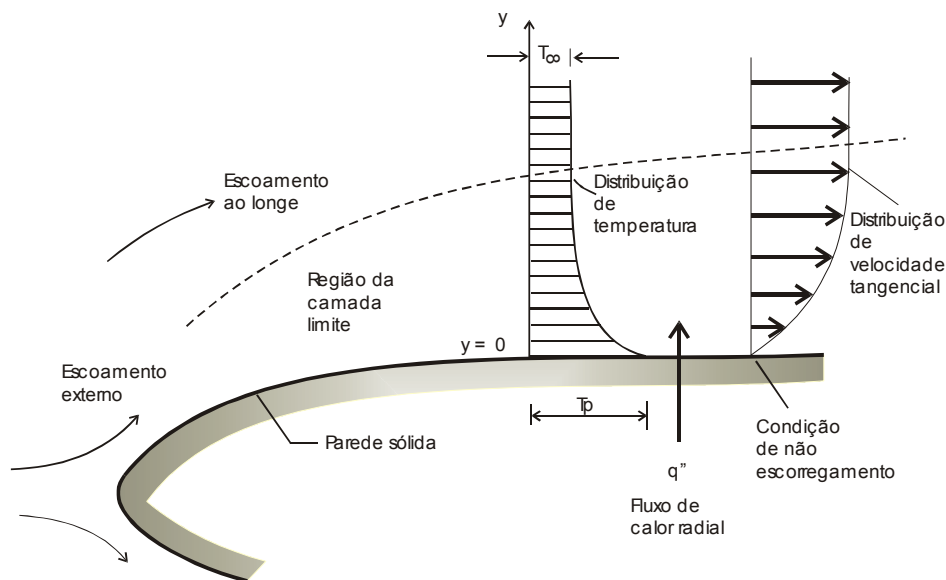


Figura 2.6 Transferência de calor convectiva externa.

A configuração de transferência de calor é dita interna, quando a superfície sólida engloba e guia o escoamento. A Fig. 2.7 mostra os aspectos principais das distribuições de temperatura e de velocidade na vizinhança da parede. A pergunta básica sobre a transferência de calor pode ser reduzida, novamente, ao problema de determinar o coeficiente de transferência de calor. Entretanto, nesta situação, não é possível identificar a temperatura ao longe do escoamento ( $T_\infty$ ). A maneira alternativa de definir o  $h$  é

$$q'' = h (T_p - T_m) \quad (2.8)$$

onde  $T_m$  é a temperatura média na seção transversal do escoamento. Um ponto importante a ser lembrado é que a definição do coeficiente de transferência de calor no escoamento interno (Eq. 2.8) é diferente da referente ao escoamento externo (Eq. 2.7).

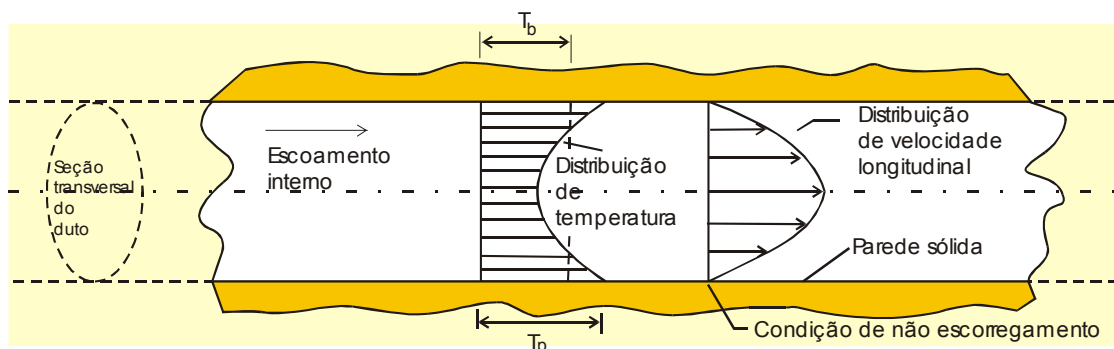


Figura 2.7 Transferência de calor convectiva interna.

Nos escoamentos internos e externos, observando-se a região do fluido próxima à parede sólida, pode-se determinar  $h$ . As Figs. 2.6 e 2.7 mostram que a velocidade da camada infinitesimal de fluido situada em  $y=0^+$  é nula; na mecânica dos fluidos este fato é descrito como a condição de não escorregamento na superfície sólida. Como a camada de fluido apresenta velocidade nula, a transferência de calor ocorre por condução pura. Assim, a aplicação da lei de Fourier nesta camada resulta em:

$$q'' = -k \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (2.9)$$

onde  $k$  é a condutibilidade térmica do fluido e  $T$  é a distribuição de temperatura no fluido. Combinando as Eqs. 2.7, 2.8 e 2.9 nós descobrimos que:

$$h = - \frac{k}{T_p - T_\infty} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0^+} \quad (\text{escoamento externo}) \quad (2.10)$$

$$h = - \frac{k}{T_p - T_m} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0^+} \quad (\text{escoamento interno}) \quad (2.11)$$

Então, para calcular  $h$ , é preciso determinar a distribuição de temperatura, do fluido, na região próxima à parede. Esta distribuição de temperatura, por sua vez, depende da distribuição de velocidade do escoamento. Assim, o pré-requisito para a determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção é entender o escoamento na região próxima à parede, ou seja, entender a mecânica dos fluidos da configuração convectiva.

Escoamentos que ocorrem naturalmente são aqueles provocados pelas forças de empuxo.

### 2.3 Convecção natural

Na convecção natural, o fluido escoar sem a presença de um dispositivo externo, isto é, “naturalmente”, porque o movimento é provocado pelos efeitos do empuxo. Este efeito atua distribuídamente no fluido e está associado à tendência geral de os fluidos se expandirem quando aquecidos à pressão constante. Na Fig. 2.8, a camada de fluido sente os efeitos da transferência de calor da parede vertical aquecida, que fica mais leve que o resto do fluido. Assim, o fluido escoar para cima enquanto interage termicamente com a parede, onde o escoamento é um jato vertical paralelo à parede, enquanto que o fluido, situado a uma certa distância da parede, permanece estagnado.

Uma máquina térmica deste tipo (moto perpétuo de primeira espécie) não opera perpetuamente. Mostrar-se-á quais são os princípios responsáveis pela movimentação do fluido na convecção natural. Considere-se a evolução de um pacote de fluido pequeno, com massa  $\Delta m$ , que se movimenta no sentido horário pelo circuito mostrado na Fig. 2.8. Enquanto o sistema está na vizinhança da parede vertical, ele é aquecido por difusão térmica da parede. Nesta região, o sistema expande-se, porque o pacote se movimenta para locais onde a pressão hidrostática, imposta pelo fluido ao longe, é menor.

A conservação da massa requer que o escoamento ascendente seja complementado por um escoamento descendente no reservatório de fluido frio. Assim, o sistema com massa  $\Delta m$  poderá retornar para a parede aquecida, escoando-se vagarosamente para baixo no reservatório de fluido, onde o pacote de fluido é resfriado e comprimido enquanto escoar para níveis que apresentam pressões maiores.

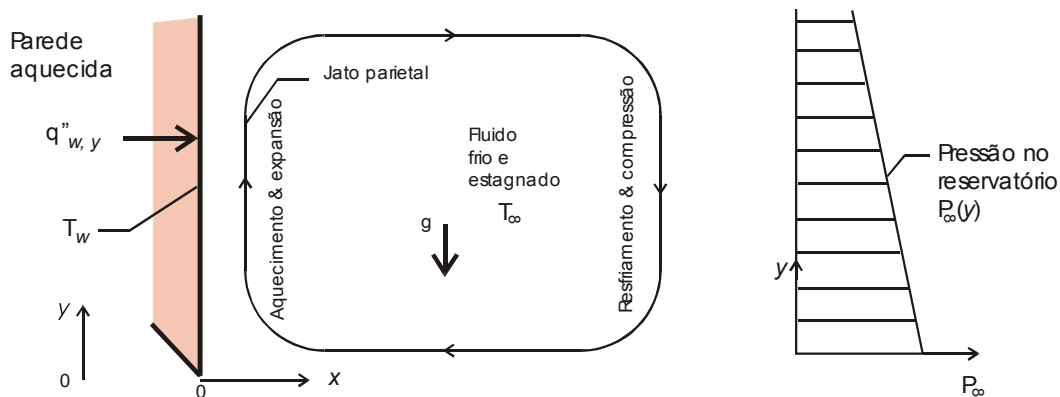


Figura 2.8 Jato parietal movido por empuxo numa parede aquecida e distribuição de pressão no reservatório de fluido frio.

### 2.3.1 Equações Simplificadas para a Camada Limite em Placas Verticais

Do ponto de vista da transferência de calor, o desafio é novamente determinar o coeficiente local de transferência de calor por convecção.

$$h_y = \frac{q''_{wy}}{T_w - T_\infty} = \frac{-k(\partial T / \partial y)_{x=0}}{T_w - T_\infty} \quad (2.12)$$

O numerador que aparece no lado direito da Eq. 2.12 considera o problema de determinação da distribuição de temperatura no fluido na região próxima à parede. Nas equações básicas que modelam o escoamento bidimensional e fornecem a distribuição de temperatura, a força de campo na direção  $x$  é nula ( $X=0$ ) e a referente a direção  $y$  é  $y = -\rho g$ . Assim,

$$(m) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (2.13)$$

$$(M_x) \quad \rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2.14)$$

$$(M_y) \quad \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \rho g \quad (2.15)$$

$$(E) \quad u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (2.16)$$

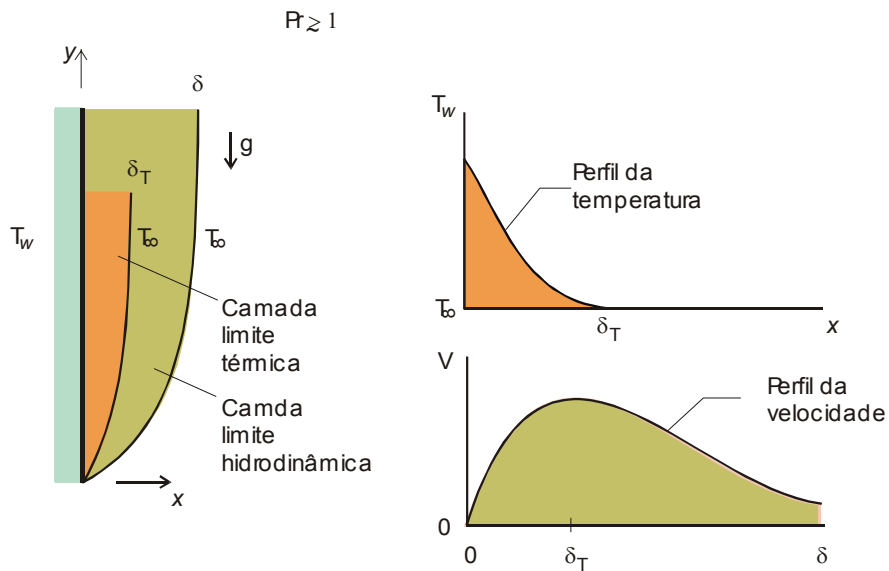


Figura 2.9 Estrutura das camadas limite, térmica e hidrodinâmica, numa parede vertical (o número de Prandtl do fluido é alto).

A Fig. 2.9 mostra uma parede vertical com um sistema de coordenada cartesiana bidimensional  $x - y$ . Note-se que  $x$  aponta para fora da parede e que  $g$  é negativo neste sistema de coordenadas.

Considera-se somente a região de escoamento adjacente à parede vertical. A única hipótese que se formulará em relação à temperatura da parede,  $T_w$ , é que ela é diferente da temperatura do fluido no reservatório,  $T_\infty$ .

A espessura da região próxima à parede,  $\delta_r$ , pode ser definida como a distância transversal (horizontal) para que a temperatura varie do valor da parede,  $T_w$ , até um valor comparável ao da temperatura do fluido no reservatório,  $T_\infty$ . Uma definição para a ordem de grandeza desta espessura é:

$$\left(-\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x=0} \sim \frac{\Delta T}{\delta_r} \quad (2.17)$$

onde  $\Delta T = T_w - T_\infty$ . Considerando que a espessura desta camada é muito menor do que  $y$  pode-se tratá-la como uma camada limite térmica,

$$\delta_r \ll y \quad (2.18)$$

Esta característica da camada de fluido (Eq. 2.18) pode simplificar as equações básicas que modelam o fenômeno, primeiramente com todos os termos de curvatura longitudinal,  $\partial^2/\partial y^2$ , desprezados em relação aos termos de curvatura transversal,  $\partial^2/\partial x^2$ , nos lados direitos das Eqs. 2.14 – 2.16.

Outra simplificação é que a pressão não varia significativamente numa seção transversal da camada limite térmica, como se pode ver a partir da equação de conservação da quantidade de movimento na direção  $x$ :

$$p(x, y) \cong p(y) = p_\infty(y) \quad (2.19)$$

Como no lado direito da Fig. 2.8, a distribuição de pressão no reservatório é hidrostática:

$$\frac{dp_\infty}{dy} = -\rho_\infty g \quad (2.20)$$

As Eqs. 2.19 e 2.20 mostram que o gradiente longitudinal de pressão,  $\partial p/\partial y$ , na Eq. 2.15 pode ser trocado pela quantidade  $-\rho_\infty g$ . A massa específica do fluido no reservatório de fluido frio é  $\rho_\infty$ .

Com as duas simplificações possibilitadas pela hipótese de que a camada limite é fina, Eq. 2.18, obtêm-se as versões das equações de conservação da quantidade de movimento na direção longitudinal e a da energia;

$$(M) \quad \rho \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - (\rho_\infty - \rho)g \quad (2.21)$$

$$(E) \quad u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (2.22)$$

Note-se que se apresentou somente a equação da conservação da quantidade de movimento na direção x, Eq. 2.21, porque a outra Eq. 2.14 foi utilizada para escrever a Eq. 2.19, ou seja, para eliminar  $p$  das incógnitas do problema.

### 2.3.2 Análise de Escala do Regime Laminar

Considerando a Eq. 2.12, e a Eq. 2.17, calcula-se o coeficiente local de transferência de calor,  $h_y$ , a partir da análise de escalas:

$$h_y \sim \frac{k}{\delta_r} \quad (2.23)$$

Determina-se, assim, a espessura da camada limite térmica,  $\delta_r$ . Adotando  $u$  e  $v$  como as escalas para os componentes do vetor velocidade nas direções horizontal e vertical, dentro da região com espessura  $\delta$  e num plano com altura  $y$ , as equações de conservação da massa, quantidade de movimento e energia aplicáveis requerem que:

$$(m) \quad \frac{u}{\delta_r} \sim \frac{v}{y} \quad (2.24)$$

$$(M) \quad u \frac{v}{\delta_r}, v \frac{v}{y} \sim v \frac{v}{\delta_r^2}, g\beta\Delta T \quad (2.25)$$

$$(E) \quad u \frac{\Delta T}{\delta_r}, v \frac{\Delta T}{y} \sim \alpha \frac{\Delta T}{\delta_r^2} \quad (2.26)$$

Sendo que a relação referente à conservação da massa (Eq. 2.24) mostra que as duas escalas de convecção presentes no lado direito da Eq. 2.26 apresentam a mesma ordem de grandeza,  $v\Delta T / y$ , o que pode ser reduzida para:

$$(E) \quad \underbrace{v \frac{\Delta T}{y}} \sim \underbrace{\alpha \frac{\Delta T}{\delta_r^2}} \quad (2.27)$$

Convecção                      Condução Transversal

Considere os dois casos limites descritos a seguir:

(a) **Empuxo Compensado por Atrito.** A relação referente à equação de conservação da quantidade de movimento, nesta condição limite, se reduz a:

$$(M) \quad v \frac{v}{\delta_r^2} \sim g\beta\Delta T \quad (2.28)$$

A solução do sistema de equações algébricas aproximadas (Eqs. 2.28, 2.27 e 2.24) que contém três incógnitas ( $u$ ,  $v$  e  $\delta_r$ ) é:

$$u \sim \frac{\alpha}{y} Ra_y^{1/4} \quad (2.29a)$$

$$v \sim \frac{\alpha}{y} Ra_y^{1/2} \quad (2.29b)$$

$$\delta_r \sim y Ra_y^{-1/4} \quad (2.29c)$$

onde  $Ra_y$  é o grupo adimensional de Rayleigh baseado na altura  $y$ :

$$Ra_y = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)y^3}{\alpha\nu} \quad (2.30)$$



O motivo para que o valor de  $Ra_y$  seja sempre alto, é mostrado na Eq. 2.29 pelo número de Rayleigh, com a mesma ordem de grandeza da relação  $y/\delta_r$  elevada à quarta potência. A Eq. 2.29c também fornece a resposta para a questão que motivou esta análise (Eq. 2.23):

$$h_y \sim \frac{k}{y} Ra_y^{1/4} \quad (2.31)$$

Esta conclusão é tradicionalmente apresentada na forma adimensional e utilizando o número de Nusselt local definido por

$$Nu_y = \frac{h_y y}{k} \quad (2.32)$$

A Eq. 2.31 é equivalente, assim, a:

$$Nu_y \sim Ra_y^{1/4} \quad (2.33)$$

As Eqs. 2.29 e 2.33 são válidas quando o empuxo está equilibrado pelas forças de atrito, a saber, quando a escala de inércia  $v^2/y$  é desprezível em relação às escalas de empuxo e de atrito. Assim, estas equações são válidas se:

$$\frac{v^2}{y} < v \frac{\nu}{\delta_r^2} \quad (2.34)$$

Aplicando as escalas para  $\nu$  e  $\delta_r$  apresentadas nas Eqs. 2.29b e c nesta relação, conclui-se que a desigualdade é equivalente às seguintes relações:  $\alpha > \nu$  ou  $1 < Pr$ . Concluindo, diante dos resultados obtidos, Eqs. 2.29 e 2.33, a camada limite térmica para fluidos com  $Pr \geq 1$  é caracterizada pelo equilíbrio entre os efeitos de empuxo e os de atrito.

Quando a viscosidade cinemática é maior que a difusibilidade térmica, o escoamento na camada limite térmica arrasta para cima uma camada adicional de fluido, que apresenta temperatura aproximadamente constante ( $T_\infty$ ). É possível mostrar que a espessura desta camada externa é da ordem de:

$$\delta \sim y Ra_y^{-1/4} Pr^{1/2} \quad (2.35)$$

A camada externa é mais espessa que a camada limite térmica porque, de acordo com as Eqs. 2.29 e 2.35,

$$\frac{\delta}{\delta_r} \sim Pr^{1/2} > 1 \quad (2.36)$$

A estrutura e a posição relativa dos perfis das camadas perturbadas térmica e hidrodinamicamente, para fluidos com  $Pr \geq 1$ , estão ilustradas na Fig. 2.9. O perfil de velocidade apresenta duas escalas de comprimento: a distância da parede até o ponto onde a velocidade é máxima ( $\delta$ ) e a distância da parede até o local onde a temperatura do fluido é próxima da do reservatório ( $\delta_r$ ). Combinando as Eqs. 2.29 e 2.35 com o critério de esbelteza, Eq. 2.18, nota-se que as camadas com espessuras  $\delta_r$  e  $\delta$  são, de fato, camadas limite se:

$$Ra_y^{1/4} > 1 \quad Ra_y^{1/4} Pr^{-1/2} > 1 \quad (2.37a, b)$$

Os escoamentos nas camadas limite formadas por convecção natural de escoamentos com altos números de Rayleigh devem-se ao fato de o segundo critério ser mais restritivo que o primeiro porque  $Pr \geq 1$ .

**(b) Empuxo Compensado por Inércia.** Quando a contribuição feita pelo atrito é desprezível, a equação de conservação da quantidade de movimento, pode ser aproximada por:

$$(M) \quad \frac{v^2}{y} \sim g\beta\Delta T \quad (2.38)$$

Esta equação e as Eqs. 2.24 e 2.27 determinam as escalas na camada com espessura  $\delta_r$ . Assim,

$$u \sim \frac{\alpha}{y} (Ra_y Pr)^{1/4} \quad (2.39a)$$

$$v \sim \frac{\alpha}{y} (Ra_y Pr)^{1/2} \quad (2.39b)$$

$$\delta_T \sim y (Ra_y Pr)^{-1/4} \quad (2.39c)$$

Estes resultados revelam um novo grupo adimensional ( $Ra_y Pr$ ) cuja característica importante é não conter a viscosidade cinemática do fluido no denominador;

$$Ra_y Pr = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)y^3}{\alpha^2} \quad (2.40)$$

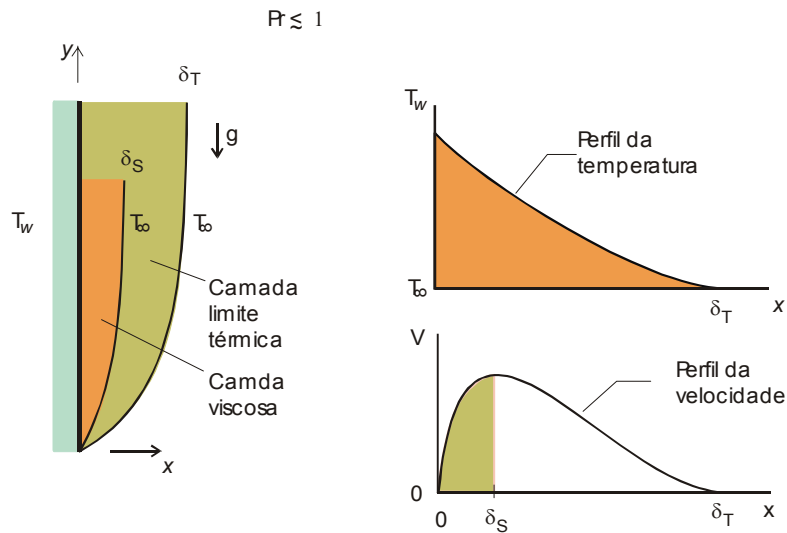


Figura 2.10 Estrutura das camadas limite, térmica e hidrodinâmica numa parede vertical (o número de Prandtl do fluido é baixo).

Este grupo é denominado número de Boussinesq ( $Bo_y$ ). Para realçar a diferença entre os resultados fornecidos pelas Eqs. 2.29a – c daqueles das Eqs. 2.39a – c (que correspondem a números de Prandtl menores do que 1) utilizar-se-á o produto adimensional  $Ra_y Pr$  em vez do  $Bo_y$ .

O número de Nusselt local,  $Nu_y$ , pode ser avaliado a partir da combinação das 2.23, 2.32 e 2.39c. Assim,

$$Nu_y \sim (Ra_y Pr)^{1/4} \quad (2.41)$$

Os resultados fornecidos pelas Eqs. 2.39 a – c e 2.41 são aplicáveis quando o efeito do atrito é desprezível na equação de conservação da quantidade de movimento. Aplicando as escalas para  $v$  e  $\delta_r$ , Eqs. 2.39b e c, na desigualdade, obtém-se que  $\alpha > \nu$ . Assim, os resultados apresentados neste item são válidos para os escoamentos de fluidos que apresentem  $Pr \leq 1$ .

Na Fig. 2.10 está ilustrada a estrutura dos perfis de temperatura e velocidade no escoamento provocado por convecção natural numa parede vertical. O jato parietal é tão largo quanto o perfil de temperatura ( $\delta_r$ ). Observe-se que existe uma camada fina, localizada na sub-região adjacente a parede, onde os efeitos do atrito são importantes. É possível demonstrar que a espessura desta camada fina, onde os efeitos do atrito são importantes, é da ordem de:

$$\delta_s \sim y \left( \frac{Ra_y}{Pr} \right)^{-1/4} \quad (2.42)$$

Este resultado mostra que  $\delta_s$  é menor do que  $\delta_r$ , ou seja,

$$\frac{\delta_s}{\delta_r} \sim Pr^{1/2} < 1 \quad (2.43)$$

O grupo adimensional ( $Ra_y / Pr$ ) é conhecido como o número de Grashof,

$$Gr_y = \frac{Ra_y}{Pr} = \frac{g\beta(T_w - T_\infty)y^3}{\nu^2} \quad (2.44)$$

A difusibilidade térmica  $\alpha$  não faz parte do número de Grashof.

Os resultados desenvolvidos neste caso limite, onde o número de Prandtl é baixo, são válidos desde que as camadas com espessura  $\delta_s$  e  $\delta_r$  sejam esbeltas. Estas condições levam, respectivamente, às seguintes desigualdades:

$$\left( \frac{Ra_y}{Pr} \right)^{1/4} > 1 \quad (Ra_y Pr)^{1/4} > 1 \quad (2.45a, b)$$

A segunda desigualdade é mais restrigente que a primeira, porque o número de Prandtl é da ordem de 1 ou menor do que 1. Assim, a esbeltez da camada limite está garantida se  $Ray > Pr^{-1}$ , isto é, quando o número de Rayleigh é suficientemente alto.

Os casos limites (a) e (b) desta seção correspondem, respectivamente, às situações limite onde o número de Prandtl é aproximadamente igual ou maior do que 1, e aproximadamente igual ou menor de que 1. Os resultados para os escoamentos de fluidos com número de Prandtl da ordem de 1 (por exemplo, o ar) estão situados na intersecção dos dois conjuntos de resultados obtidos nesta seção. Vale notar que as duas equações obtidas para  $Nu_y$ , Eqs. 2.33 e 2.41, fornecem o mesmo resultado quando o número de Prandtl é de ordem 1.

### 2.3.3 Fluxo de Calor Uniforme na Parede

Quando a parede vertical é aquecida uniformemente,  $q_w'' = \text{constante}$ , a temperatura superficial aumenta sem variação na direção  $y$ . No regime laminar, a diferença de temperaturas  $T_w - T_\infty$  aumenta proporcionalmente a  $y^{1/5}$ . Esta relação é uma consequência das Eqs. 2.33 e 2.41 (que são aplicáveis aos escoamentos normalmente encontrados em convecção natural). Por exemplo, no caso em que o fluido apresenta  $Pr$  alto, a Eq. 2.33 fornece:

$$\frac{q_w''}{[T_w(y) - T_\infty]k} \frac{y}{k} \sim \left[ \frac{g\beta(T_w - T_\infty)y^3}{\alpha\nu} \right]^{1/4} \quad (2.46)$$

Este resultado pode ser rearranjado para mostrar que  $T_w - T_\infty$  é, de fato, proporcional a  $y^{1/5}$ .

Analogamente, a Eq. 2.46 pode ser reescrita de modo que o lado direito da equação não contenha a diferença de temperatura  $T_w - T_\infty$ , ou seja,

$$\frac{q_w''}{[T_w(y) - T_\infty]k} \frac{y}{k} \sim \left[ \frac{g\beta q_w'' y^4}{\alpha\nu k} \right]^{1/5} \quad (2.47)$$

O grupo que está dentro do colchete do lado direito desta equação é o número de Rayleigh baseado no fluxo de calor constante,

$$Ra_y^* = \frac{g\beta q_w y^4}{\alpha v k} \quad (2.48)$$

enquanto que o lado esquerdo da Eq. 2.47 continua a mostrar o número de Nusselt definido na Eq. 2.32. Concluindo, as ordens de grandeza de  $Nu_y$  e  $Ra_y^{*1/5}$  são iguais no escoamento de fluidos que apresentam altos números de Prandtl. Este fato é confirmado pela solução similar do caso, onde o fluxo de calor é constante na parede, e a próxima equação representa bem estes resultados.

$$Nu_y \cong 0,616 \left( \frac{Pr}{Pr+0,8} \right)^{1/5} Ra_y^{*1/5} \quad (2.49)$$

Para fluidos que apresentam número de Prandtl na faixa limitada pelos números de Prandtl do ar e da água, a transição para o regime turbulento ocorre na vizinhança de  $Ra_y^* \sim 10^{13}$ . Vliet e Liu recomendam as seguintes expressões para calcular os números de Nusselt local e médio:

$$Nu_y = 0,6 Ra_y^{*1/5} \quad \overline{Nu}_y = 0,75 Ra_y^{*1/5} \quad \text{laminar, } 10^5 < Ra_y^* < 10^{13} \quad (2.50)$$

$$Nu_y = 0,568 Ra_y^{*0,22} \quad \overline{Nu}_y = 0,645 Ra_y^{*0,22} \quad \text{turbulento, } 10^{13} < Ra_y^* < 10^{16} \quad (2.51)$$

O número de Nusselt médio é baseado na diferença média de temperatura na placa,  $T_w - T_\infty$ . Para calcular a transferência de calor para o ar, Vliet e Ross recomendam as seguintes expressões:

$$Nu_y = 0,55 Ra_y^{*1/5} \quad (\text{laminar}) \quad (2.52a)$$

$$\overline{Nu}_y = 0,17 Ra_y^{*1/4} \quad (\text{turbulento}) \quad (2.52b)$$

Uma correlação que é válida para todos os números de Rayleigh e Prandtl foi proposta por Churchill e Chu:

$$\overline{Nu}_y = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 Ra_y^{1/6}}{[1 + (0,437 / Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.53)$$

onde  $Ra_y$  é baseado na diferença média de temperatura na direção vertical. Se o fluido que escoar é ar e as condições são as do ambiente, a correlação anterior se reduz para:

$$\overline{Nu}_y = (0,825 + 0,328 Ra_y^{1/6})^2 \quad (\text{Pr}=0,72) \quad (2.53')$$

A assíntota referente ao número de Rayleigh alto desta última equação é:

$$\overline{Nu}_y \cong 0,107 Ra_y^{1/3} \quad (\text{Pr}=0,72 \text{ e } Ra_y > 10^{10}) \quad (2.53'')$$

As Eqs. 2.53 e 2.53'' podem ser reescritas em função do número de Rayleigh relativo ao fluxo de calor,  $Ra_y^*$ , utilizando a substituição  $Ra_y = Ra_y^* / \overline{Nu}_y$ . Por exemplo, utilizando esta transformação na equação anterior, obtém-se:

$$\overline{Nu}_y \cong 0,187 Ra_y^{*1/4} \quad (\text{Pr}=0,72 \text{ e } Ra_y^* > 10^{12}) \quad (2.53''')$$

### 2.3.4 Placas Inclinadas

A Fig. 2.11 mostra as quatro configurações possíveis para placas inclinadas. O ângulo entre o plano e a direção vertical  $\phi$  está restrito à faixa  $-60^\circ < \phi < 60^\circ$ . Nos casos indicados por (a) e (d) – placa aquecida inclinada para cima e placa resfriada inclinada para baixo – o efeito do ângulo  $\phi$  é de aumentar a espessura final da camada limite e dar condições a que o escoamento descole da placa. O efeito oposto está ilustrado nos casos (b) e (c), onde o fluido é pressionado contra a placa até que ele escoar pelo bordo de fuga desta.

O grupo  $g \cos \phi$  (termo de empuxo) é a componente da aceleração da gravidade que está orientada paralelamente à placa. Por esta razão, a taxa de transferência de calor no regime laminar ao longo de uma placa isotérmica é calculada com a expressão:

$$Ra_y = \frac{(g \cos \phi) \beta (T_w - T_\infty) y^3}{\alpha \nu} \quad (2.54)$$

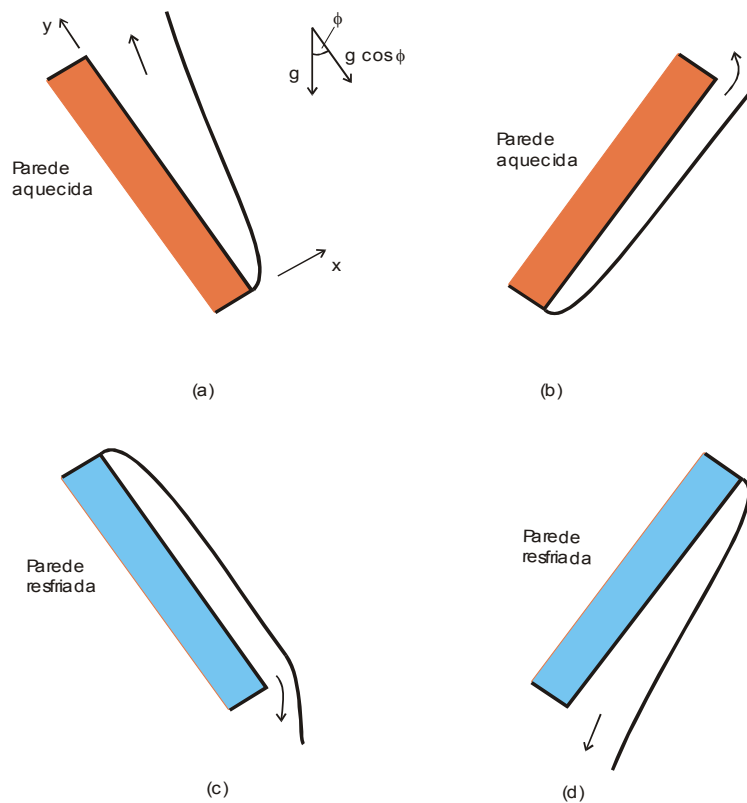


Figura 2.11 Placas inclinadas em relação à direção vertical.

De modo análogo, para um escoamento laminar sobre um plano inclinado que apresenta fluxo de calor uniforme, o número de Nusselt pode ser calculado com as Eqs. 2.50 e 2.52a, mas com  $Ra_y^*$  calculado do seguinte modo:

$$Ra_y^* = \frac{(g \cos \phi) \beta q_w'' y^4}{\alpha \nu k} \quad (2.55)$$



Já os resultados experimentais das medidas de transferência de calor nestas placas e no regime turbulento são melhor correlacionados se utilizarmos  $g$  ao invés de  $g \cos \phi$  no número de Rayleigh. Para placas inclinadas com fluxo de calor uniforme, recomenda-se que o número de Nusselt seja calculado pelas Eqs. 2.51 e 2.52b e com o número de Rayleigh baseado no fluxo de calor definido pela Eq. 2.48.

Vliet mostrou que o ângulo de inclinação  $\phi$  tem um efeito significativo na localização da transição de escoamento laminar para turbulento nos casos (a) e (b) da Fig. 2.11 e quando o fluxo de calor na placa é uniforme. A próxima tabela mostra os números de Rayleigh, baseados no fluxo de calor, que marcam o início e o término da região de transição em experimentos com água ( $Pr \cong 6,5$ ).

$\phi$	$Ra_y^*$
$0^\circ$	$5 \times 10^{12} - 10^{14}$
$30^\circ$	$3 \times 10^{10} - 10^{12}$
$60^\circ$	$6 \times 10^7 - 6 \times 10^9$

Registre-se que a variação entre os números de Rayleigh relativos ao início e ao término da transição é da ordem de  $10^2$ . Esta observação reforça o caráter aproximado das Eqs. 2.50 e 2.51.

Novamente, o número de Rayleigh associado à transição  $Ra_y = g\beta y^3 \Delta T / \alpha \nu$  decresce com o aumento do ângulo  $\phi$ .

$\phi$	$Ra_y$
$0^\circ$	$8,7 \times 10^8$
$20^\circ$	$2,5 \times 10^8$
$30^\circ$	$1,7 \times 10^7$
$60^\circ$	$7,7 \times 10^5$

## Capítulo 3

### Materiais e Métodos

A modelagem adotada para o protótipo é a de construção padrão, de uso consagrado, com materiais disponíveis em qualquer loja de material de construção.

#### 3.1 Descrição do Protótipo

Foi construído um protótipo de (3,00X3,00)m sobre uma fundação direta, formada por corpos de prova de concreto quebrado (cedido pelo laboratório de concreto da UEMA) e argamassa de cimento e areia no traço 1:8, com profundidade de 0,40m e largura de 0,30m, ao longo de toda a fundação, com uma camada de regularização do mesmo material.

A seguir foram levantadas as paredes de alvenaria com pé-direito de 2,80m, erguidas com argamassa de cimento e areia, traço 1:6. Ver planta baixa, figura 3.1. Sobre a janela de 1,20m, foram colocadas duas barras de ferro ¼”, entre duas fiadas de tijolos (como verga). A mesma solução adotou-se para a porta de 70cm.

As paredes foram revestidas com camada de reboco de 2,00cm de espessura, com a mesma argamassa com que foram erguidas, tanto interna como externamente.

No piso foi compactada uma camada de 7 cm de espessura de colchão de areia média, e sobre ela aplicada camada de concreto no traço 1:2,5:3,5 de 4cm de espessura, com acabamento áspero.

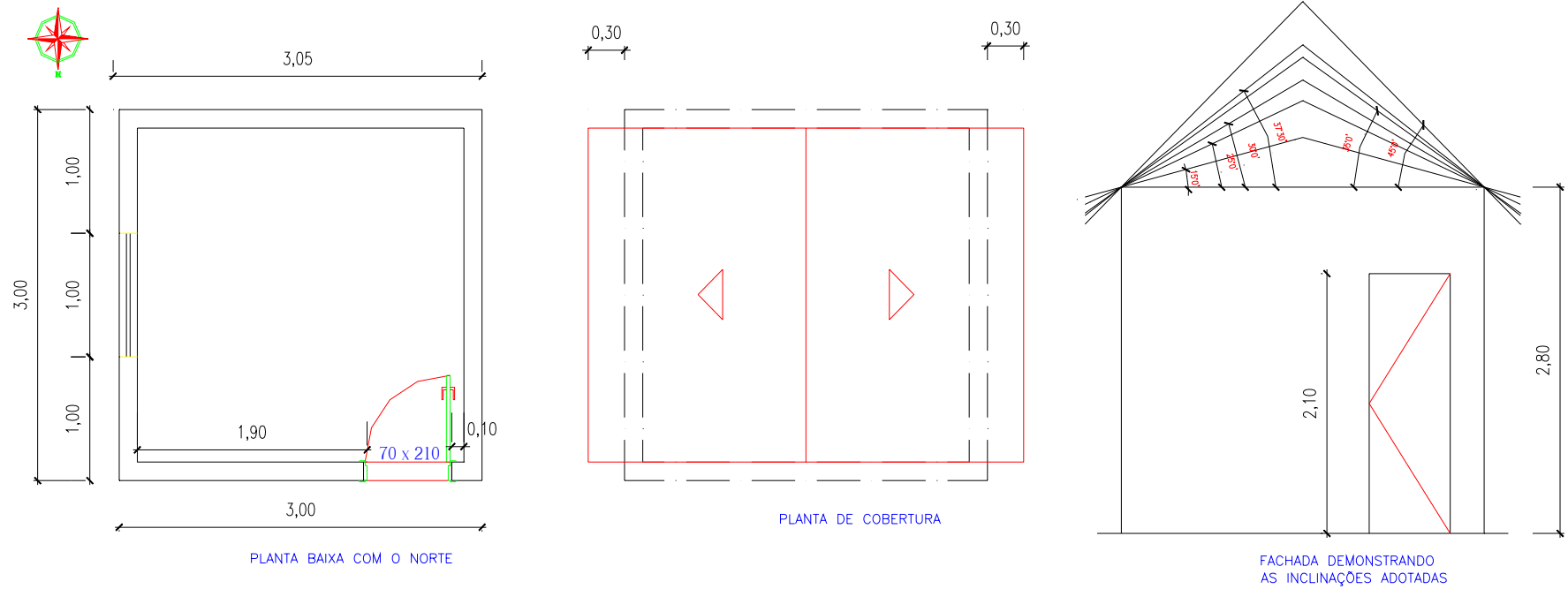


Figura 3.1 Planta baixa com norte, cobertura e fachada do protótipo.

Para cobertura, utilizaram-se telhas de fibrocimento de chapas onduladas, por serem mais leves e bem maiores, trazendo, assim, economia no madeiramento, que ficou reduzido à cumeeira e às terças, sem falar que podem ser usadas com um caimento bem pequeno (mínimo de 12%).

Adotou-se como primeira inclinação, a maior, de 45° ou 100%, com empena de 1,50m de altura para, a partir daí, ir-se quebrando a empena para as seguintes inclinações: 37,5° ou 87,9% com empena de 1,32m; 35° ou 83,9% com empena de 1,26m; 30° ou 57,7% com empena de 0,86m; 25° ou 46,6% com empena de 0,70m; 15° ou 26,8% com empena de 0,40m e 0° ou 0% com empena de 0,0m.(Figuras 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8).



Figura 3.2 Foto do protótipo com telhado na inclinação 45°.



Figura 3.3 Foto do protótipo com telhado na inclinação 37,5°.



Figura 3.4 Foto do protótipo com telhado na inclinação 35°.



Figura 3.5 Foto do protótipo com telhado na inclinação 30°.



Figura 3.6 Foto do protótipo com telhado na inclinação 25°.



Figura 3.7 Foto do protótipo com telhado na inclinação 15°.



Figura 3.8 Foto do protótipo com telhado na inclinação 0°.

### 3.2 Instrumentos de Medida

Os locais de medida das temperaturas no protótipo estão indicados na Figura 3.9. Foram trabalhadas 23 (vinte e três) temperaturas medidas por intermédio de termopares do Tipo K (Cromel(+)/Alumel(-)), os quais foram conectados a 2(dois) seletores de 12(doze) entradas e 4(quatro) saídas, tendo-se lido nestas a temperatura dos 23 pontos analisados com um Termômetro Digital MT-505. Para leitura da temperatura ambiente tanto na sombra como no sol, utilizou-se um termômetro de vidro e mercúrio como substância termométrica (Hg) (Figura 3.10).

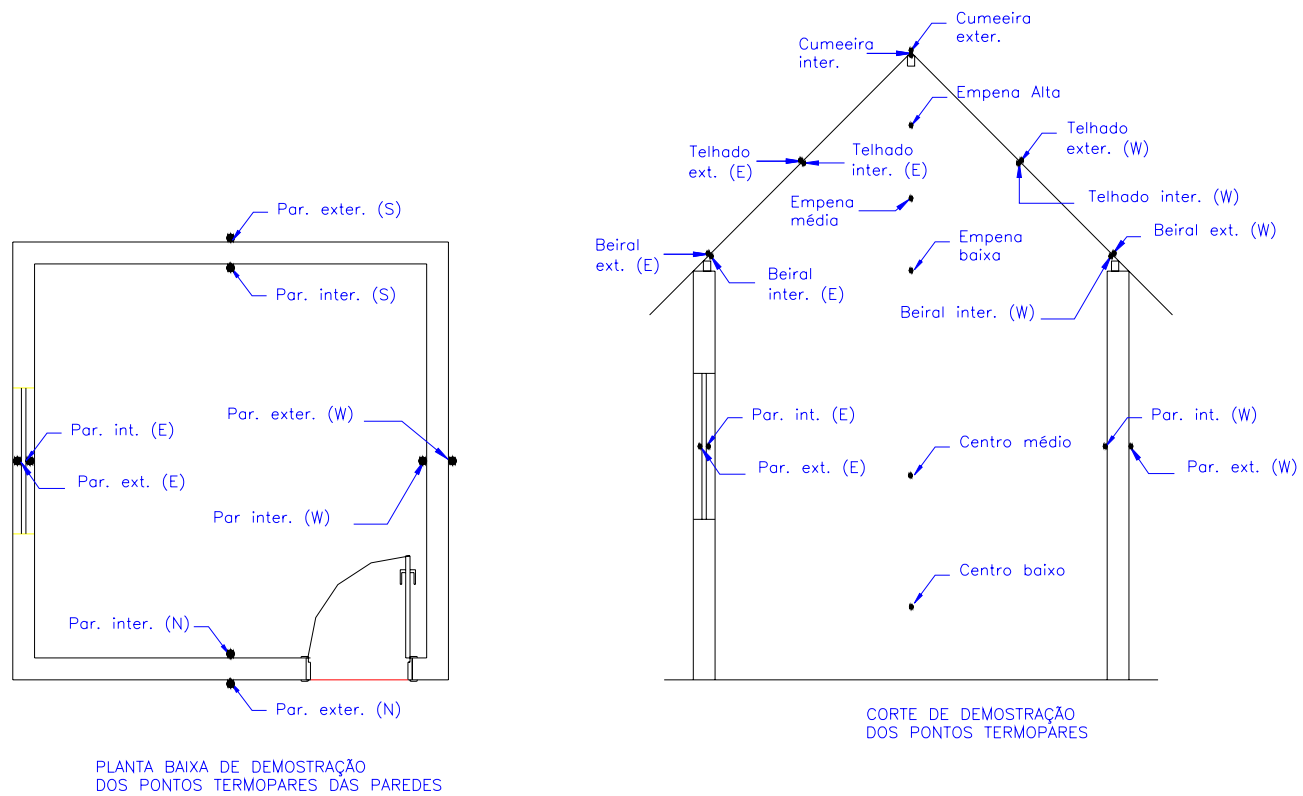


Figura 3.9 Local dos termopares no protótipo.





Figura 3.10 Saída dos termopares, seletores, termômetro digital e termômetro de vidro.

### 3.3 Condições Operacionais

Como se construiu apenas 1(um) protótipo para várias inclinações e, até definir os instrumentos de medida e acertar na verificação das leituras de temperatura do termômetro digital já se estivesse na 2ª quinzena de novembro/2005, e visto que se aproximasse o período das chuvas, que vai de janeiro à junho, em São Luís – Maranhão, realizaram-se leituras diárias e horárias entre as 8h e 18h, 3(três) dias com a casa fechada (porta e janela), e 1(um) dia com a casa aberta para cada inclinação. Sete inclinações foram utilizadas: a de 45°, 37,5°, 35°, 30°, 25°, 15° e 0°, onde foram monitorados vinte e três termopares e também a temperatura ambiente a cada hora com início às 8h e término às 18h.

### 3.4 Metodologia

A fixação dos termopares em seus locais, ao serem analisadas as temperaturas no protótipo (Figura 3.9), deu-se da seguinte forma:

- os termopares externos do telhado (Cum.ex., Telh.ex.(E), Telh.ex.(W), Bei.ex.(E), Bei.ex.(W)) fixaram-se nas telhas utilizando-se o próprio peso delas;
- os termopares internos do telhado (Cum.in., Telh.in.(E), Telh.in.(W), Bei.in.(E), Bei.in.(W)) prenderam-se com Durepox;
- os termopares externos das paredes (Par.(W)ex., Par.(S)ex., Par.(N)ex.) foram fixadas em furos abertos com broca de 1/2", tendo-se o cuidado de vedar os espaços



- livres com massa de modelar, exceto a Parede externa e interna leste (Par.(E)ex., Par.(E)in.), onde fica a janela, em que os termopares foram presos com Durepox;
- os termopares internos das paredes (Par.(W)in., Par.(S)in., Par.(N)in.) fixaram-se com fita gomada e;
  - os termopares do centro da casa (Emp.alta, Emp.méd., Emp.baixa, CentroMédio, CentroBaix.), foram presos com fita gomada, nas alturas estabelecidas, a um barbante, que descia da cumeeira até o chão.

OBS: Em todos os pontos se fixaram no fio; na extremidade de análise da temperatura soldou-se por fusão, o termopar tipo K, que foi inclinado para encostar-se no ponto de análise da temperatura.

OBS: Para leituras horárias, fez-se um furo ao lado da porta de diâmetro 1 ½” e passaram-se os 23 termopares para o lado exterior do protótipo, onde se conectavam aos seletores e ao termômetro digital para leituras das temperaturas (Figura 3.10).

## Capítulo 4

### Resultados e Discussão

Para adotar-se o melhor dos 3(três) dias em que se coletaram dados para cada inclinação com a casa fechada, observou-se o gráfico da temperatura ambiente (Fig. 4.1) no qual as curvas de temperaturas se encontram próximas umas das outras, indicando que os dias das realizações dos ensaios foram semelhantes. Esta observação pode ser complementada pelas figuras 4.2 e 4.3, que mostram, respectivamente, a Radiação Solar e a Velocidade do Vento (Tabela 4.8) em função da hora (Laboratório de Meteorologia/UEMA). Isto feito, é válido deduzir que os dados obtidos nos ensaios, apesar de terem sido trabalhados em dias diferentes, podem ser comparados (Tabela 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7).

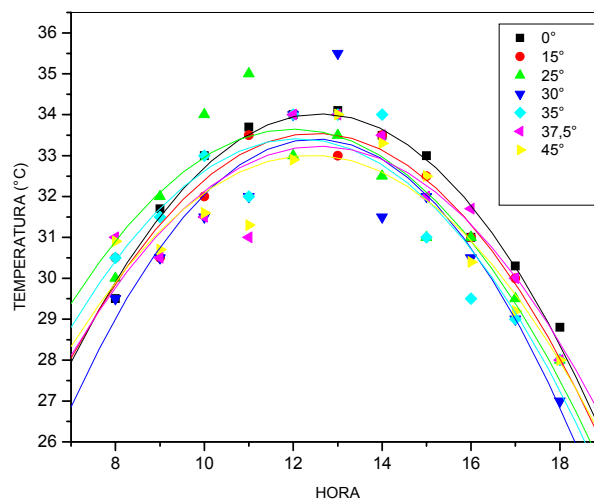


Figura 4.1 Temperatura Ambiente de cada inclinação em função da hora

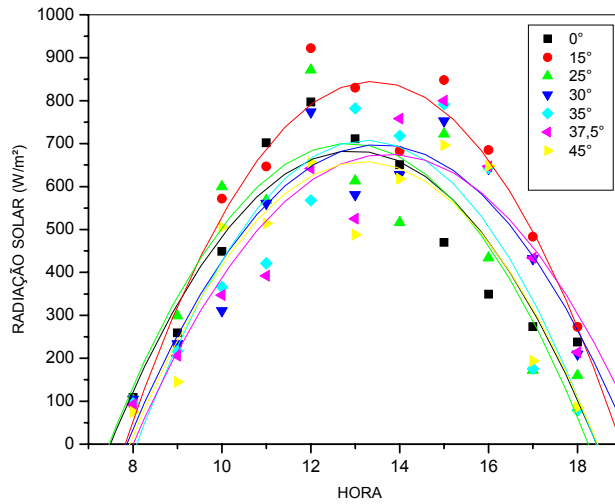


Figura 4.2 Radiação Solar de cada inclinação em função da hora

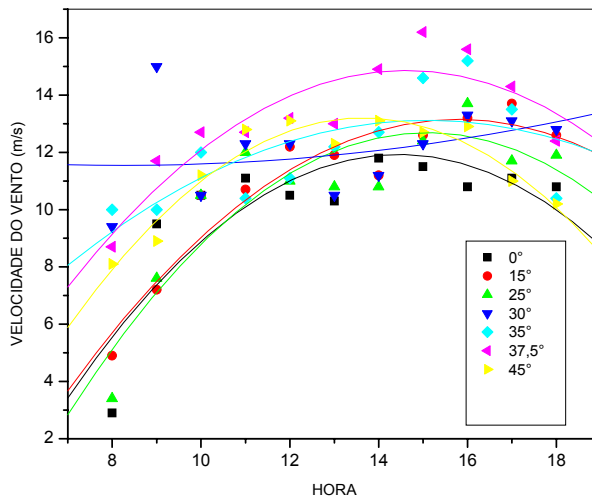


Figura 4.3 Velocidade do Vento de cada inclinação em função da hora

## EMPENA BAIXA

Na figura 4.4 nota-se perfeitamente que, entre as 10h e 16h horas, a influência de cada inclinação sobre esse ponto é mais acentuada; entretanto, observa-se também claramente que, antes das 10h e depois das 16h horas, as curvas das temperaturas aproximam-se de um valor comum, revelando que, no período da noite, a inclinação do telhado já não exerce influência na

temperatura do ponto trabalhado como exerce durante o dia. Observa-se, também, que há uma clara definição de que a temperatura da empena baixa decai com o aumento da inclinação ficando as inclinações de temperaturas mais confortáveis termicamente na ordem: 45°, 37,5°, 35°, 30°, 25°, 15° e 0°.

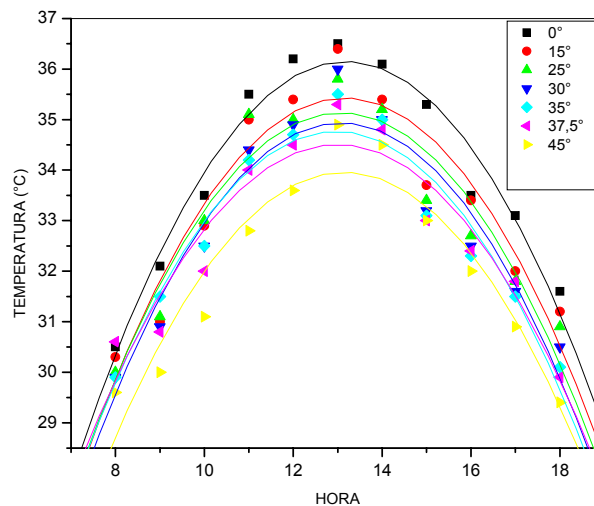


Figura 4.4 Empena Baixa de cada inclinação em função da hora

## CENTRO MÉDIO

Nesse gráfico (Figura 4.5) também se nota a influência maior das inclinações do telhado entre as 10:00 e 16:00 horas e nas horas anteriores às 10h e após as 16h, as curvas das temperaturas tendem a um valor em comum, mostrando que, no período noturno, a inclinação do telhado não influencia na temperatura como no período diurno. Observou-se, também, que a temperatura no Centro Médio fica mais confortável com o aumento da inclinação, estabelecendo para a ordem das inclinações mais confortáveis termicamente: 45°, 37,5°, 35°, 30°, 25°, 15° e 0°, onde todas as curvas das temperaturas se espaçaram uniformes, exceto a de 45°, que demonstrou um espaçamento maior com a sua antecessora de 37,5°, evidenciando uma temperatura bem mais baixa.

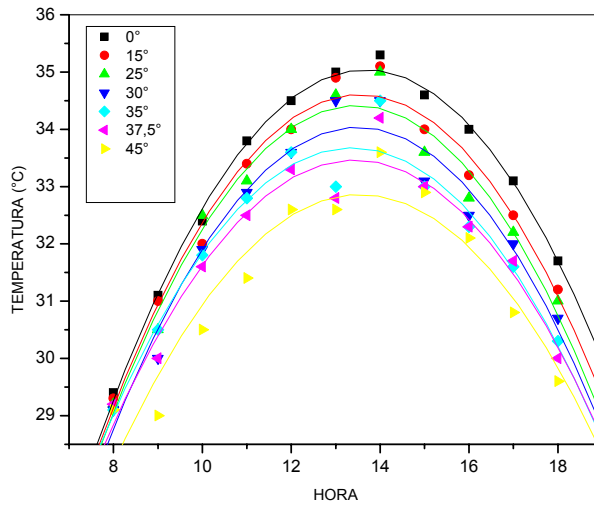


Figura 4.5 Centro Médio de cada inclinação em função da hora

#### CENTRO BAIXO

Para esse gráfico (Figura 4.6), a mesma observação para entre as 10h e 16horas e antes das 10h e após as 16h se confirmou. Outra confirmação foi a ordem das inclinações de temperaturas mais confortáveis, como sendo: 45°, 37,5°, 35°, 30°, 25°, 15° e 0°, onde as curvas se espaçaram aproximadamente uniformes, ficando a de 0° e 45° mais espaçadas das demais, a primeira, pelo fato de a temperatura ser bem maior, e a segunda, por ser bem menor do que as demais.

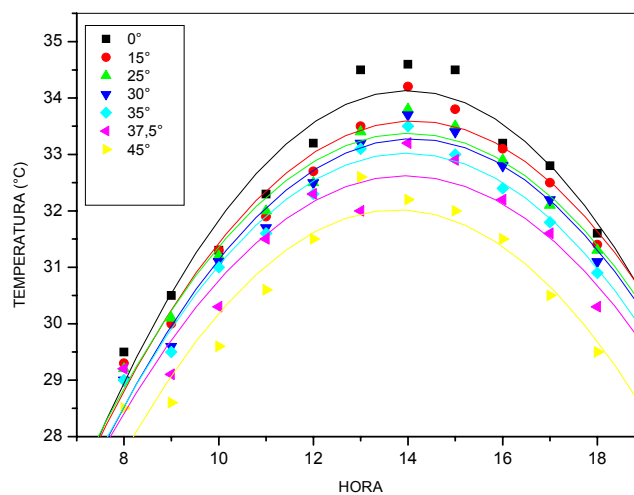


Figura 4.6 Centro Baixo de cada inclinação em função da hora.

## CUMEEIRA EXTERNA

Este gráfico (Figura 4.7) comportou-se parecido com o gráfico da Radiação Solar (Figura 4.2), que mostra temperaturas mais elevadas para a inclinação de 15°.

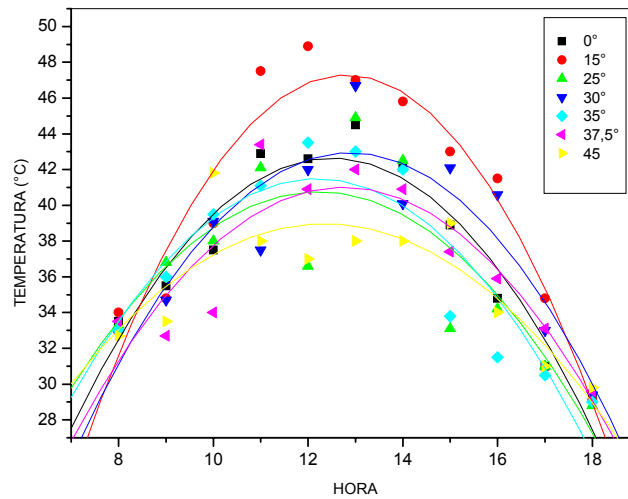


Figura 4.7 Cumeeira Externa de cada inclinação em função da hora

## CUMEEIRA INTERNA

Neste gráfico (Figura 4.8) já se percebe a tendência de as curvas de temperaturas das inclinações 45° e 37,5° serem mais baixas.

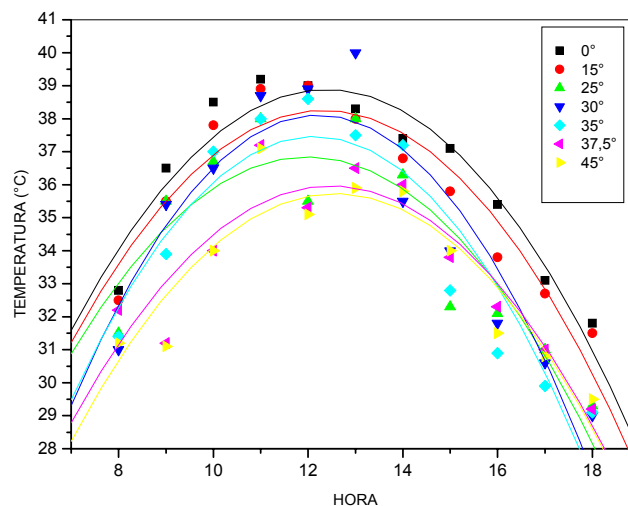


Figura 4.8 Cumeeira Interna de cada inclinação em função da hora.

## EMPENA ALTA

Nota-se neste gráfico (Figura 4.9) que as curvas de temperaturas mais amenas (baixas), começam a entrar numa ordem, mostrando uma variação dessa ordem entre as 12h e 15h, nas curvas de inclinações 30° e 25°.

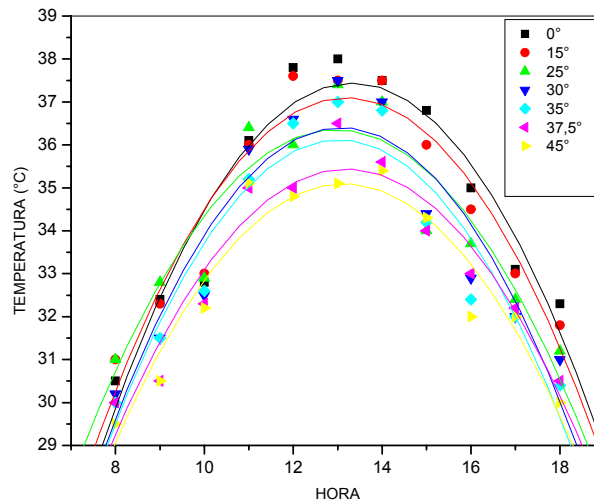


Figura 4.9 Empena Alta de cada inclinação em função da hora

## EMPENA MÉDIA

A Figura 4.10 já segue a tendência de as curvas das inclinações maiores terem temperaturas mais baixas, e as menores, mais elevadas.

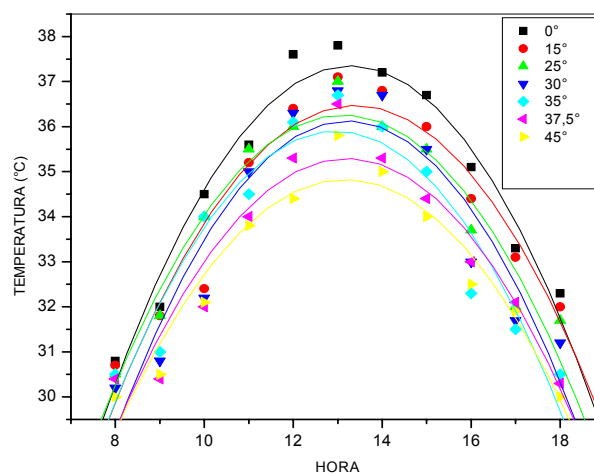


Figura 4.10 Empena Média de cada inclinação em função da hora.

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 24/12/2005

Tabela 4.1 Inclinação: 45°, H<sub>emp</sub>=: 1,50 m, Situação da casa: fechada.

<b>SELETOR 1</b>													
HORA	Cum.In. <b>S11vd</b>	Cum.Ex. <b>S12vd</b>	Emp.Alta <b>S13vd</b>	Emp.Méd. <b>S14vd</b>	Telh.Ex.(E) <b>S11vm</b>	Telh.In.(E) <b>S12vm</b>	Telh.Ex.(W) <b>S13vm</b>	Telh.In.(W) <b>S14vm</b>	Bei.Ex.(E) <b>S11az</b>	Bei.In.(E) <b>S12az</b>	Bei.Ex.(W) <b>S13az</b>	Bei.In.(W) <b>S14az</b>	Obs. Tempo
08:00	31,2	32,7	29,5	30,0	34,0	31,8	31,8	30,5	34,3	32,0	32,0	30,2	nublado
09:00	31,1	33,5	30,5	30,5	35,0	32,8	33,1	32,0	33,4	32,7	32,8	31,1	nublado
10:00	34,0	41,8	32,2	32,1	35,5	34,0	34,9	33,9	34,5	33,5	35,5	32,4	nublado
11:00	37,1	38,0	35,1	33,8	37,2	35,0	35,6	34,6	36,5	35,5	36,1	33,1	nublado
12:00	35,1	37,0	34,8	34,4	36,0	35,0	37,9	35,7	38,1	34,5	38,9	34,3	nublado
13:00	35,9	38,0	35,1	35,8	38,9	36,0	40,0	38,0	38,5	35,7	41,0	36,5	sol/nubl
14:00	35,8	38,0	35,4	35,0	35,0	35,5	39,5	39,0	38,0	35,9	40,5	36,4	sol/nubl
15:00	34,0	39,0	34,3	34,0	33,0	33,5	36,9	36,6	33,5	33,1	38,0	35,0	sol/nubl
16:00	31,5	34,0	32,0	32,5	30,9	32,0	32,5	32,8	31,1	31,3	31,8	32,6	nublado
17:00	30,8	31,0	32,0	31,9	29,8	30,5	31,2	31,6	29,5	30,0	30,4	31,4	nublado
18:00	29,5	29,8	30,0	30,0	28,3	28,8	29,0	29,5	27,5	28,5	28,3	29,5	crepúsc

<b>SELETOR 2</b>													
HORA	Par.(E)in.S <b>S21vd</b>	Par.(W)in. <b>S22vd</b>	Par.(S)in. <b>S23vd</b>	Par.(N)in. <b>S24vd</b>	Par.(E)ex. <b>S21vm</b>	Par.(W)ex. <b>S22vm</b>	Par.(S)ex. <b>S23vm</b>	Par.(N)ex. <b>S24vm</b>	Emp.Baixa <b>S21az</b>	CentroMéd <b>S22az</b>	CentroBaixo <b>S23az</b>	Temp. Amb.	Obs. Tempo
08:00	32,2	28,2	28,4	27,8	32,8	30,2	33,2	30,3	29,6	29,1	28,5	30,9	nublado
09:00	30,3	28,4	29,0	28,5	31,1	30,4	31,5	30,8	30,0	29,0	28,6	30,7	nublado
10:00	31,3	29,0	29,8	29,1	30,8	31,3	32,4	31,5	31,1	30,5	29,6	31,6	nublado
11:00	32,2	30,5	31,0	30,2	33,6	33,5	34,5	32,1	32,8	31,4	30,6	31,3	nublado
12:00	32,4	31,1	31,8	30,7	35,2	34,7	37,4	32,3	33,6	32,6	31,5	32,9	nublado
13:00	32,9	32,0	32,6	31,8	34,8	38,4	39,0	33,0	34,9	32,6	32,6	34,0	sol/nubl
14:00	32,9	33,2	33,5	32,4	37,0	42,0	39,0	33,5	34,5	33,6	32,2	33,3	sol/nubl
15:00	32,2	33,3	33,7	32,7	32,1	37,2	35,5	32,3	33,0	32,9	32,0	32,5	sol/nubl
16:00	31,4	33,3	33,4	32,6	30,2	31,8	31,7	31,1	32,0	32,1	31,5	30,4	nublado
17:00	30,7	32,3	32,2	31,9	29,5	30,3	30,3	29,9	30,9	30,8	30,5	29,2	nublado
18:00	29,7	31,2	31,2	31,1	28,1	28,9	29,2	28,8	29,4	29,6	29,5	28,0	crepúsc



## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 23/11/2005

Tabela 4.2 Inclinação: 37,5°, H<sub>emp</sub>: 1,32 m, Situação da casa: fechada

SELETOR 1													
HORA	Cum.In. S11vd	Cum.Ex. S12vd	Emp.Alta S13vd	Emp.Méd. S14vd	Telh.ex.(E) S11vm	Telh.In.(E) S12vm	Telh.Ex.(W) S13vm	Telh.in.(W) S14vm	Bei.Ex.(E) S11az	Bei.In.(E) S12az	Bei.Ex.(W) S13az	Bei.In.(W) S14az	Obs. Tempo
08:00	32,2	33,5	30,0	30,4	34,8	33,3	33,0	32,0	35,3	33,0	33,6	32,0	sol/nubl
09:00	31,2	32,7	30,5	30,4	33,0	32,0	32,5	32,4	32,7	31,3	33,0	31,2	nublado
10:00	34,0	34,0	32,3	32,0	34,8	34,5	37,2	33,8	35,2	33,5	36,4	33,6	nublado
11:00	37,2	43,4	35,0	34,0	40,3	38,0	42,8	38,3	41,2	37,3	40,8	37,0	nublado
12:00	35,3	40,9	35,0	35,3	38,0	37,2	43,1	37,5	36,0	34,9	43,9	37,0	sol/nubl
13:00	36,5	42,0	36,5	36,5	39,0	37,5	43,8	39,9	41,9	36,0	45,0	38,1	sol
14:00	36,0	40,9	36,6	35,3	37,1	36,2	43,9	40,0	39,9	34,3	44,0	38,2	sol
15:00	33,8	37,4	34,0	34,4	33,0	33,6	42,0	38,3	33,7	32,9	41,5	37,0	sol
16:00	32,3	35,9	33,0	33,0	32,0	32,0	38,9	36,5	31,5	31,3	38,5	34,9	sol
17:00	31,0	33,1	32,2	32,1	30,9	31,2	33,4	31,5	29,7	29,9	33,5	32,9	sol
18:00	29,2	29,6	30,5	30,3	29,0	29,5	29,0	30,0	28,3	28,8	28,5	29,5	crepúsc

SELETOR 2													
HORA	Par.(E)in.S 21vd	Par.(W)in. S22vd	Par.(S)in. S23vd	Par.(N)in. S24vd	Par.(E)ex. S21vm	Par.(W)ex. S22vm	Par.(S)ex. S23vm	Par.(N)ex. S24vm	Emp.baixa S21az	CentroMédio S22az	CentroBaix. S23az	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	32,2	28,8	28,9	28,4	32,9	31,4	33,6	30,8	30,6	29,2	29,2	31,0	sol/nubl
09:00	30,6	29,2	29,2	28,8	31,3	31,4	31,1	30,5	30,8	30,0	29,1	30,5	nublado
10:00	31,8	30,3	30,4	30,0	33,3	32,9	33,5	32,4	32,0	31,6	30,3	31,5	nublado
11:00	34,7	31,9	31,9	31,5	34,6	34,7	35,1	33,9	34,0	32,5	31,5	31,0	nublado
12:00	33,0	32,4	32,2	32,2	33,5	35,1	36,7	33,5	34,5	33,3	32,3	34,0	sol/nubl
13:00	34,2	33,6	33,8	33,4	34,5	39,9	39,8	35,5	35,3	32,8	32,0	34,0	sol
14:00	34,0	34,5	34,7	34,0	34,5	40,3	37,5	34,1	34,8	34,2	33,2	33,5	sol
15:00	32,8	35,0	34,9	34,3	33,6	39,9	37,4	33,3	33,0	33,0	32,9	32,0	sol
16:00	32,3	35,3	34,4	34,0	31,5	38,2	36,5	32,4	32,4	32,3	32,2	31,7	sol
17:00	31,1	34,9	34,0	33,6	30,2	34,8	33,0	31,0	31,8	31,7	31,6	30,0	sol
18:00	29,6	33,8	32,8	32,5	28,5	30,1	29,6	29,5	29,9	30,0	30,3	28,0	crepúsc

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 27/11/2005

Tabela 4.3 Inclinação: 35°, H<sub>emp</sub>=: 1,26 m, Situação da casa: fechada

<b>SELETOR 1</b>													
HORA	Cum.In. <b>S11vd</b>	Cum.Ex. <b>S12vd</b>	Emp.Alta <b>S13vd</b>	Emp.Méd. <b>S14vd</b>	Telh.ex.(E) <b>S11vm</b>	Telh.In.(E) <b>S12vm</b>	Telh.Ex.(W) <b>S13vm</b>	Telh.in.(W) <b>S14vm</b>	Bei.Ex.(E) <b>S11az</b>	Bei.In.(E) <b>S12az</b>	Bei.Ex.(W) <b>S13az</b>	Bei.In.(W) <b>S14az</b>	Obs. Tempo
08:00	31,4	33,0	30,0	30,5	34,9	33,0	33,2	31,5	35,5	31,5	34,2	31,3	sol/nubl
09:00	33,9	36,0	31,5	31,0	36,0	35,5	35,2	33,6	36,5	33,5	34,0	32,7	sol/nubl
10:00	37,0	39,5	32,6	34,0	39,5	38,5	37,5	35,8	40,4	35,5	36,2	34,5	sol/nubl
11:00	38,0	41,1	35,2	34,5	40,0	38,3	38,8	36,3	42,0	36,5	39,0	35,5	sol/nubl
12:00	38,6	43,5	36,5	36,1	40,5	38,5	42,0	38,6	43,0	38,0	39,5	37,3	sol
13:00	37,5	43,0	37,0	36,7	39,5	38,7	41,0	38,7	41,7	36,9	43,0	37,5	sol
14:00	37,2	42,0	36,8	36,0	38,2	37,0	41,2	39,3	41,0	35,2	43,8	38,0	sol
15:00	32,8	33,8	34,2	35,0	33,2	33,0	33,5	34,8	33,3	32,5	33,5	34,5	sol/nubl
16:00	30,9	31,5	32,4	32,3	31,3	31,9	31,9	32,7	31,2	31,0	31,0	32,2	nublado
17:00	29,9	30,5	32,0	31,5	30,1	30,7	29,9	31,0	29,5	29,5	29,9	31,0	nublado
18:00	29,1	29,0	30,4	30,5	28,4	29,4	28,8	30,0	27,9	28,1	28,1	29,7	crepúsc

<b>SELETOR 2</b>													
HORA	Par.(E)in.S <b>S21vd</b>	Par.(W)in. <b>S22vd</b>	Par.(S)in. <b>S23vd</b>	Par.(N)in. <b>S24vd</b>	Par.(E)ex. <b>S21vm</b>	Par.(W)ex. <b>S22vm</b>	Par.(S)ex. <b>S23vm</b>	Par.(N)ex. <b>S24vm</b>	Emp.baixa <b>S21az</b>	CentroMédio <b>S22az</b>	CentroBaix. <b>S23az</b>	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	31,5	28,9	29,0	28,3	31,9	31,2	32,9	31,0	29,9	29,1	29,0	30,5	sol/nubl
09:00	31,6	29,8	30,0	29,5	33,3	32,9	33,2	31,8	31,5	30,5	29,5	31,5	sol/nubl
10:00	34,7	31,5	31,8	30,9	34,5	34,3	34,2	32,9	32,5	31,8	31,0	33,0	sol/nubl
11:00	33,0	31,9	32,1	31,5	33,0	33,8	34,8	32,9	34,2	32,8	31,6	32,0	sol/nubl
12:00	33,9	33,0	33,4	32,7	34,5	35,9	40,0	34,0	34,7	33,6	32,3	34,0	sol
13:00	34,5	33,7	34,0	33,5	34,2	37,6	38,9	33,8	35,5	33,0	33,1	34,0	sol
14:00	34,8	35,2	35,0	34,3	35,5	41,0	39,6	34,7	35,0	34,5	33,5	34,0	sol
15:00	32,4	35,0	34,8	34,3	31,9	34,5	34,0	32,3	33,1	33,0	33,0	31,0	sol/nubl
16:00	31,8	34,2	33,4	33,5	30,0	32,0	31,5	31,3	32,3	32,3	32,4	29,5	nublado
17:00	30,8	33,1	32,5	32,6	29,3	30,5	30,2	30,1	31,5	31,6	31,8	29,0	nublado
18:00	29,5	31,6	31,4	31,5	28,1	29,0	28,8	29,1	30,1	30,3	30,9	28,0	crepúsc

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 04/12/2005

Tabela 4.4 Inclinação: 30°, H<sub>emp</sub>=: 0,86 m, Situação da casa: fechada

<b>SELETOR 1</b>													
HORA	Cum.in. <b>S11vd</b>	Cum.Ex. <b>S12vd</b>	Emp.Alta <b>S13vd</b>	Emp.Méd. <b>S14vd</b>	Telh.ex.(E) <b>S11vm</b>	Telh.In.(E) <b>S12vm</b>	Telh.Ex.(W) <b>S13vm</b>	Telh.in.(W) <b>S14vm</b>	Bei.Ex.(E) <b>S11az</b>	Bei.In.(E) <b>S12az</b>	Bei.Ex.(W) <b>S13az</b>	Bei.In.(W) <b>S14az</b>	Obs. Tempo
08:00	31,0	32,8	30,2	30,2	35,0	32,0	31,4	31,0	35,3	32,1	33,0	30,4	sol/nubl
09:00	35,4	34,7	31,5	30,8	36,6	34,0	35,6	35,0	38,0	34,1	36,3	32,7	sol/nubl
10:00	36,5	39,1	32,5	32,2	41,0	37,0	38,7	38,2	40,1	34,3	40,1	35,4	sol/nubl
11:00	38,7	37,5	35,9	35,0	42,4	38,0	40,2	39,3	38,9	34,9	38,5	36,5	sol/nubl
12:00	38,9	42,0	36,6	36,3	45,8	39,0	45,0	44,0	44,5	36,9	44,5	38,6	sol/nubl
13:00	40,0	46,7	37,5	36,8	46,0	39,5	48,0	45,5	45,4	37,4	46,1	40,0	sol/nubl
14:00	35,5	40,1	37,0	36,7	42,9	37,6	44,1	42,0	39,7	37,4	39,7	37,8	sol/nubl
15:00	34,0	42,1	34,4	35,5	40,0	36,5	43,7	40,4	38,3	35,4	40,1	36,7	sol
16:00	31,8	40,6	32,9	33,0	33,1	33,8	38,4	37,7	32,8	32,5	37,8	34,6	sol
17:00	30,6	33,0	32,0	31,7	31,0	32,2	34,3	33,8	30,5	31,2	33,5	32,7	sol
18:00	29,0	29,4	31,0	31,2	29,0	30,5	29,5	30,2	28,2	28,7	28,3	30,6	crepúsc

<b>SELETOR 2</b>													
HORA	Par.(E)in.S <b>S21vd</b>	Par.(W)in. <b>S22vd</b>	Par.(S)in. <b>S23vd</b>	Par.(N)in. <b>S24vd</b>	Par.(E)ex. <b>S21vm</b>	Par.(W)ex. <b>S22vm</b>	Par.(S)ex. <b>S23vm</b>	Par.(N)ex. <b>S24vm</b>	Emp.baixa <b>S21az</b>	CentroMédio <b>S22az</b>	CentroBaix. <b>S23az</b>	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	32,9	29,0	29,1	28,3	35,0	30,8	34,3	30,8	29,9	29,1	29,0	29,5	sol/nubl
09:00	31,9	29,3	29,5	28,8	32,3	31,5	32,2	31,3	30,9	30,0	29,6	30,5	sol/nubl
10:00	35,3	31,3	31,5	30,5	37,8	34,1	38,2	33,6	32,5	31,9	31,1	31,5	sol/nubl
11:00	35,1	32,0	32,5	31,6	35,2	35,3	37,6	33,0	34,4	32,9	31,7	32,0	sol/nubl
12:00	35,2	33,2	33,9	32,8	36,1	36,9	39,9	35,0	34,9	33,6	32,5	34,0	sol/nubl
13:00	36,0	34,6	35,3	34,2	36,6	39,5	41,3	35,8	36,0	34,5	33,2	35,5	sol/nubl
14:00	34,0	34,7	35,2	34,6	33,5	40,5	38,3	35,0	35,0	34,5	33,7	31,5	sol/nubl
15:00	34,5	36,3	36,0	35,5	32,4	37,1	37,5	33,6	33,2	33,1	33,4	32,0	sol
16:00	32,9	35,8	35,2	34,8	31,8	37,4	36,7	32,5	32,5	32,5	32,8	30,5	sol
17:00	31,3	35,0	34,4	34,0	30,8	33,1	33,2	31,0	31,6	32,0	32,2	29,0	sol
18:00	30,0	33,6	33,1	33,0	28,6	29,9	29,8	29,4	30,5	30,7	31,1	27,0	crepúsc

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 08/12/2005

Tabela 4.5 Inclinação: 25°, H<sub>emp</sub>=: 0,70 m, Situação da casa: fechada

SELETOR 1													
HORA	Cum.In. S11vd	Cum.Ex. S12vd	Emp.Alta S13vd	Emp.Méd. S14vd	Telh.ex.(E) S11vm	Telh.In.(E) S12vm	Telh.Ex.(W) S13vm	Telh.in.(W) S14vm	Bei.Ex.(E) S11az	Bei.In.(E) S12az	Bei.Ex.(W) S13az	Bei.In.(W) S14az	Obs. Tempo
08:00	31,5	33,3	31,0	30,5	33,0	32,6	31,9	31,3	34,9	31,4	34,9	31,3	sol/nubl
09:00	35,5	36,8	32,8	31,8	36,0	35,0	37,9	35,8	39,0	34,5	39,8	35,5	sol/nubl
10:00	36,7	38,0	32,9	34,0	37,4	35,5	38,0	37,5	39,5	36,5	40,0	35,8	sol/nubl
11:00	38,0	42,1	36,4	35,5	43,9	39,5	43,0	41,3	41,4	37,2	43,0	38,0	sol/nubl
12:00	35,5	36,6	36,0	36,0	39,0	37,0	40,0	37,8	38,0	35,0	40,0	38,5	sol/nubl
13:00	38,0	44,9	37,4	37,0	42,0	39,0	45,0	43,4	40,5	36,6	43,5	40,5	sol/nubl
14:00	36,3	42,5	37,0	36,0	38,5	36,4	42,0	41,7	38,9	34,5	43,0	39,5	sol
15:00	32,3	33,1	34,0	35,5	34,0	33,4	33,6	33,6	32,3	33,0	37,0	36,5	nublado
16:00	32,1	34,2	33,7	33,7	32,0	32,5	35,6	35,6	31,8	32,0	33,0	34,1	sol
17:00	31,0	31,0	32,4	32,0	30,0	30,8	31,2	31,7	29,6	29,8	31,1	31,2	sol
18:00	29,3	28,8	31,2	31,7	28,4	29,7	29,0	29,6	28,0	28,5	28,3	29,6	crepúsc

SELETOR 2													
HORA	Par.(E)in.S 21vd	Par.(W)in. S22vd	Par.(S)in. S23vd	Par.(N)in. S24vd	Par.(E)ex. S21vm	Par.(W)ex. S22vm	Par.(S)ex. S23vm	Par.(N)ex. S24vm	Emp.baixa S21az	CentroMédio S22az	CentroBaix. S23az	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	31,7	28,4	28,9	28,5	34,0	30,4	31,3	29,8	30,0	29,2	29,2	30,0	sol/nubl
09:00	34,6	29,5	30,3	29,7	37,5	32,0	33,3	32,5	31,1	30,5	30,1	32,0	sol/nubl
10:00	35,7	31,1	31,8	31,3	38,5	33,9	38,5	33,5	33,0	32,5	31,2	34,0	sol/nubl
11:00	34,8	32,5	33,1	32,7	35,0	35,8	39,9	34,8	35,1	33,1	32,0	35,0	sol/nubl
12:00	34,1	33,4	34,1	33,4	34,5	36,3	39,9	35,3	35,0	34,0	32,5	33,0	sol/nubl
13:00	34,7	34,0	34,6	34,0	35,5	38,9	40,5	34,9	35,8	34,6	33,4	33,5	sol/nubl
14:00	33,7	34,9	34,9	34,5	33,8	39,5	40,5	34,7	35,2	35,0	33,8	32,5	sol
15:00	32,6	34,9	34,6	34,0	31,5	33,5	34,0	32,5	33,4	33,6	33,5	31,0	nublado
16:00	32,4	34,5	34,3	33,7	31,9	35,3	35,4	32,4	32,7	32,8	32,9	31,0	sol
17:00	31,0	33,8	33,2	32,8	30,0	32,7	32,3	31,2	31,8	32,2	32,1	29,5	sol
18:00	29,8	32,7	32,3	31,8	28,9	30,0	29,8	29,6	30,9	31,0	31,3	28,0	crepúsc

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 12/12/2005

Tabela 4.6 Inclinação: 15°, H<sub>emp</sub>=: 0,40 m, Situação da casa: fechada.

<b>SELETOR 1</b>													
HORA	Cum.In. <b>S11vd</b>	Cum.Ex. <b>S12vd</b>	Emp.Alta <b>S13vd</b>	Emp.Méd. <b>S14vd</b>	Telh.ex.(E) <b>S11vm</b>	Telh.In.(E) <b>S12vm</b>	Telh.Ex.(W) <b>S13vm</b>	Telh.in.(W) <b>S14vm</b>	Bei.Ex.(E) <b>S11az</b>	Bei.In.(E) <b>S12az</b>	Bei.Ex.(W) <b>S13az</b>	Bei.In.(W) <b>S14az</b>	Obs. Tempo
08:00	32,5	34,0	31,0	30,7	35,9	33,2	34,3	32,2	35,8	31,5	35,5	31,4	Sol
09:00	35,5	34,8	32,3	31,8	40,9	36,0	36,2	35,3	39,5	34,1	38,9	32,8	Sol
10:00	37,8	39,0	33,0	32,4	43,9	38,0	39,5	38,2	40,5	36,5	39,2	36,0	Sol
11:00	38,9	47,5	36,0	35,2	45,0	39,8	42,9	41,8	42,8	36,8	44,3	38,4	Sol
12:00	39,0	48,9	37,6	36,4	46,0	40,8	45,5	43,9	43,9	37,5	46,0	39,9	Sol
13:00	38,0	47,0	37,5	37,1	45,0	40,1	45,6	44,0	42,9	38,0	47,7	40,7	Sol
14:00	36,8	45,8	37,5	36,8	42,2	37,7	42,7	41,5	40,6	35,3	44,6	39,7	Sol
15:00	35,8	43,0	36,0	36,0	38,7	36,5	40,4	39,0	36,0	34,6	41,0	37,2	Sol
16:00	33,8	41,5	34,5	34,4	33,0	33,3	37,5	36,1	34,6	32,5	38,8	35,5	Sol
17:00	32,7	34,8	33,0	33,1	30,6	32,0	34,1	33,0	30,3	31,2	32,9	33,2	Sol
18:00	31,5	29,1	31,8	32,0	29,3	31,0	29,4	30,3	28,3	29,4	28,8	31,2	crepúsc

<b>SELETOR 2</b>													
HORA	Par.(E)in.S <b>S21vd</b>	Par.(W)in. <b>S22vd</b>	Par.(S)in. <b>S23vd</b>	Par.(N)in. <b>S24vd</b>	Par.(E)ex. <b>S21vm</b>	Par.(W)ex. <b>S22vm</b>	Par.(S)ex. <b>S23vm</b>	Par.(N)ex. <b>S24vm</b>	Emp.baixa <b>S21az</b>	CentroMédio <b>S22az</b>	CentroBaix. <b>S23az</b>	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	34,2	28,3	28,7	28,2	33,5	30,5	33,5	30,0	30,3	29,3	29,3	30,5	Sol
09:00	33,9	28,6	29,4	28,5	35,6	30,8	35,9	30,5	31,0	31,0	30,0	30,5	Sol
10:00	34,6	30,1	31,2	30,4	37,0	32,1	36,8	31,9	32,9	32,0	31,3	32,0	Sol
11:00	34,5	31,5	32,7	31,9	35,0	34,8	39,9	33,9	35,0	33,4	31,9	33,5	Sol
12:00	34,4	32,3	33,6	32,7	35,3	34,8	40,8	34,5	35,4	34,0	32,7	34,0	Sol
13:00	34,8	33,9	35,0	34,0	35,8	39,8	43,4	35,0	36,4	34,9	33,5	33,0	Sol
14:00	34,1	34,6	35,3	34,4	33,4	39,0	41,0	34,2	35,4	35,1	34,2	33,5	Sol
15:00	34,0	35,7	35,5	34,7	33,5	41,0	41,0	33,9	33,7	34,0	33,8	32,5	Sol
16:00	31,9	35,3	35,0	34,1	31,3	39,0	38,2	32,4	33,4	33,2	33,1	31,0	Sol
17:00	31,5	35,4	34,5	33,6	30,5	35,0	35,3	31,3	32,0	32,5	32,5	30,0	Sol
18:00	30,2	34,7	33,2	32,6	28,8	30,4	30,7	29,8	31,2	31,2	31,4	28,0	crepúsc

## Dados coletados em (°C) obtidos com o uso de termopares dia 17/12/2005

Tabela 4.7 Inclinação: 0°, H<sub>emp</sub>=: 0,00 m, Situação da casa: fechada

<b>SELETOR 1</b>													
HORA	Cum.In. <b>S11vd</b>	Cum.Ex. <b>S12vd</b>	Emp.Alta <b>S13vd</b>	EmpMéd. <b>S14vd</b>	Telh.Ex.(E) <b>S11vm</b>	Telh.In.(E) <b>S12vm</b>	Telh.Ex.(W) <b>S13vm</b>	Telh.In.(W) <b>S14vm</b>	Bei.Ex.(E) <b>S11az</b>	Bei.In.(E) <b>S12az</b>	Bei.Ex.(W) <b>S13az</b>	Bei.In.(W) <b>S14az</b>	Obs. Tempo
08:00	32,8	33,5	30,5	30,8	34,2	32,4	34,5	32,5	34,0	31,6	33,9	31,0	sol/nubl
09:00	36,5	35,5	32,4	32,0	38,0	36,1	37,8	36,3	38,8	34,5	37,0	34,0	sol/nubl
10:00	38,5	37,5	32,8	34,5	39,5	36,5	41,8	39,7	40,0	35,4	39,8	34,8	sol/nubl
11:00	39,2	42,9	36,1	35,6	42,3	40,0	45,7	43,5	41,7	36,1	41,7	36,8	sol/nubl
12:00	39,0	42,6	37,8	37,6	38,3	38,0	42,3	41,4	42,3	36,1	44,9	38,0	sol/nubl
13:00	38,3	44,5	38,0	37,8	44,2	40,3	48,2	43,2	45,5	40,2	46,9	40,0	sol/nubl
14:00	37,4	42,1	37,5	37,2	37,5	38,0	38,0	37,1	36,1	34,2	42,5	38,0	nublado
15:00	37,1	38,9	36,8	36,7	36,2	36,7	39,1	36,9	37,5	35,5	39,0	37,9	sol/nubo
16:00	35,4	34,8	35,0	35,1	32,9	33,5	33,3	33,0	32,9	32,2	32,0	32,8	nublado
17:00	33,1	31,0	33,1	33,3	31,1	31,7	32,0	33,6	30,8	30,6	30,9	32,0	nublado
18:00	31,8	29,3	32,3	32,3	28,8	30,5	29,3	30,1	28,4	29,3	28,6	30,9	crepúsc

<b>SELETOR 2</b>													
HORA	Par.(E)in.S <b>S21vd</b>	Par.(W)in. <b>S22vd</b>	Par.(S)in. <b>S23vd</b>	Par.(N)in. <b>S24vd</b>	Par.(E)ex. <b>S21vm</b>	Par.(W)ex. <b>S22vm</b>	Par.(S)ex. <b>S23vm</b>	Par.(N)ex. <b>S24vm</b>	Emp.baixa <b>S21az</b>	CentroMédio <b>S22az</b>	CentroBaix. <b>S23az</b>	Temp. Ambiente	Obs. Tempo
08:00	32,0	28,1	28,5	28,0	32,3	30,3	31,3	29,8	30,5	29,4	29,5	29,5	sol/nubl
09:00	35,1	29,6	30,0	29,3	38,0	33,4	36,9	32,6	32,1	31,1	30,5	31,7	sol/nubl
10:00	33,3	30,7	31,3	30,4	34,6	33,8	34,5	32,3	33,5	32,4	31,3	33,0	sol/nubl
11:00	34,7	31,6	32,3	31,1	36,1	35,9	39,8	34,1	35,5	33,8	32,3	33,7	sol/nubl
12:00	35,4	33,0	33,8	32,6	37,4	36,8	41,5	35,2	36,2	34,5	33,2	34,0	sol/nubl
13:00	34,5	33,5	34,0	33,2	34,3	36,2	37,7	33,8	36,5	35,0	34,5	34,1	sol/nubl
14:00	34,5	35,2	35,3	34,5	33,6	34,6	36,2	34,1	36,1	35,3	34,6	33,5	nublado
15:00	33,0	33,7	34,0	33,4	33,1	34,5	36,3	33,1	35,3	34,6	34,5	33,0	sol/nubo
16:00	32,2	33,9	34,0	33,6	31,4	32,2	32,8	31,7	33,5	34,0	33,2	31,0	nublado
17:00	30,6	32,8	32,9	32,7	30,2	31,4	31,6	31,0	33,1	33,1	32,8	30,3	nublado
18:00	30,5	33,5	33,2	32,3	28,6	30,1	30,3	29,8	31,6	31,7	31,6	28,8	crepúsc

## Dados meteorológicos coletados pelo Laboratório de Meteorologia/UEMA

Coordenadas geográficas da PCD (placa de coleta de dados):

Latitude: 2°35'(S);

Longitude: 44°12'(W);

Altitude: 62,0m

Tabela 4.8 Velocidade do vento e radiação solar horária

<b>VELOCIDADE VENTO (m/s)</b>	<b>INCL. TELH.: 45° DIA: 24/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 37,5° DIA: 23/11/05</b>	<b>INCL. TELH.: 35° DIA: 27/11/05</b>	<b>INCL. TELH.: 30° DIA: 04/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 25° DIA: 08/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 15° DIA: 12/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 0° DIA: 17/12/05</b>
8:00	8,1	8,7	10	9,4	3,4	4,9	2,9
9:00	8,9	11,7	10	15	7,6	7,2	9,5
10:00	11,2	12,7	12	10,5	10,5	10,5	10,5
11:00	12,8	12,7	10,4	12,3	12	10,7	11,1
12:00	13,1	13,2	11,1	12,3	11	12,2	10,5
13:00	12,3	13	12,2	10,5	10,8	11,9	10,3
14:00	13,1	14,9	12,7	11,2	10,8	11,2	11,8
15:00	12,7	16,2	14,6	12,3	12,4	12,6	11,5
16:00	12,9	15,6	15,2	13,3	13,7	13,2	10,8
17:00	11	14,3	13,5	13,1	11,7	13,7	11,1
18:00	10,2	12,4	10,4	12,8	11,9	12,6	10,8

<b>RADIAÇÃO SOLAR (W/m²)</b>	<b>INCL. TELH.: 45° DIA: 24/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 37,5° DIA: 23/11/05</b>	<b>INCL. TELH.: 35° DIA: 27/11/05</b>	<b>INCL. TELH.: 30° DIA: 04/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 25° DIA: 08/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 15° DIA: 12/12/05</b>	<b>INCL. TELH.: 0° DIA: 17/12/05</b>
8:00	75	93	95	105	102	92	109
9:00	145	206	217	234	299	232	259
10:00	505	347	366	311	600	572	449
11:00	514	392	421	561	568	647	702
12:00	656	642	568	774	871	922	797
13:00	488	525	782	581	613	830	711
14:00	618	758	718	628	516	683	651
15:00	696	800	791	753	722	848	470
16:00	648	647	643	642	434	685	349
17:00	194	434	176	432	172	483	274
18:00	86	214	79	210	160	273	238

## **Capítulo 5**

### **Conclusão e Sugestões para próximos trabalhos**

Com base nos resultados, apresentados neste trabalho através de gráficos e tabelas obtidos nos ensaios realizados, chegou-se às seguintes conclusões e sugestões.

#### **5.1 Conclusões**

- Quanto maior a inclinação do telhado trabalhado, menor a temperatura interna do ambiente.
- A maior influência das inclinações do telhado na climatização do ambiente ocorre no período das 10h às 16h.
- A influência das inclinações do telhado sobre a climatização do ambiente diminui no período da noite.

#### **5.2 Sugestões para próximos trabalhos**

- Trabalhar o número de protótipos igual ao número de inclinações do telhado que se desejar analisar num único dia para não ocorrer variação meteorológica.
- Analisar a influência da variação da geometria do telhado em protótipos com laje.
- Analisar a influência da condutibilidade térmica do ar nos materiais de construção civil, de acordo com a climatologia regional.



## Referências Bibliográficas

Bejan, A. *Transferência de calor*. São Paulo: Edgard Blucher, 1996, 540p.

Borges, A. C. *Prática das pequenas construções*. São Paulo: Edgard Blucher, 1972, 297p.

Cofaigh, E. °, Olley J. A., Lewis, J. O., *The climatic dwelling*. London: James & James, 1998, 161p.

Frota, A. B., Schiffer, S. R. *Manual de conforto térmico*. São Paulo: Nobel, 1987, 228p.

Incropera, F. P., Dewitt, D. P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998, 460p.

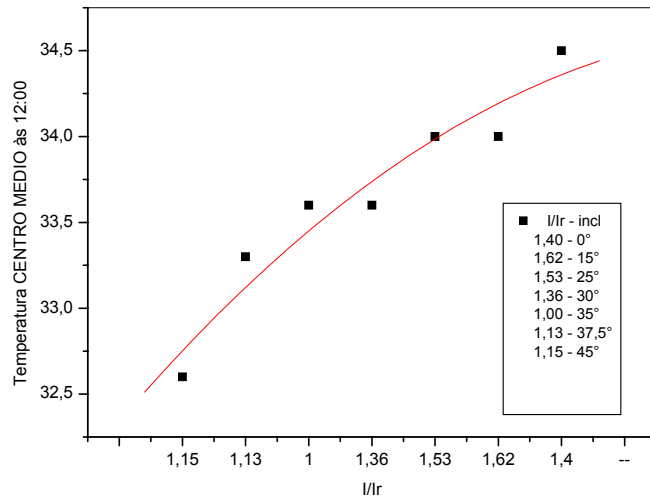
Ismail, K. A. R. *Técnicas experimentais em fenômenos de transferência*. Campinas, SP: do autor, 2000, 488p.

Ismail, K. A. R. *Técnicas de medidas e instrumentação*. Campinas, SP: do autor, 2000, Cap. 4, Medidas de temperatura e fluxo de calor, pp. 222 – 299.

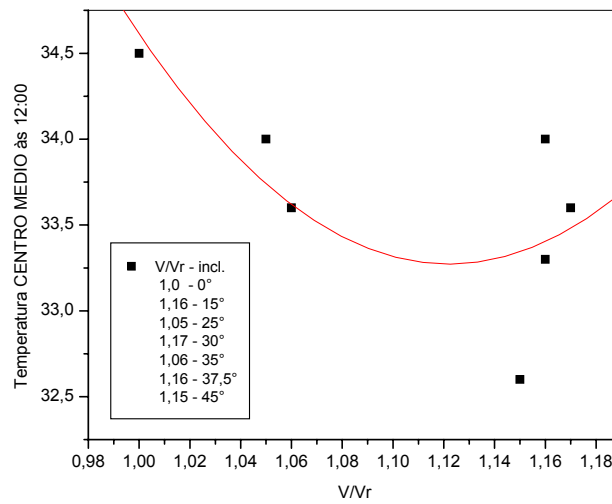
Proarq. *Arquitetura pesquisa & projeto*. Rio de Janeiro: FAU UFRJ, 1998, 225P.

Stoecker, W. F., Jones, J. W. *Refrigeração e ar condicionado*. São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1985, 481p.

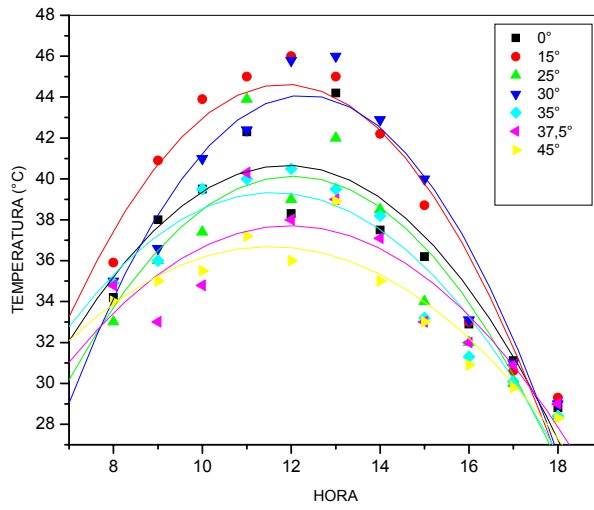
## **ANEXOS**



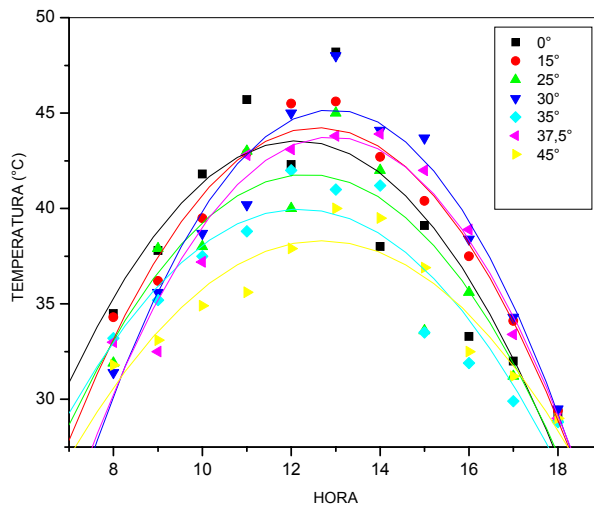
Centro Médio às 12h de cada inclinação em função da Radiação Solar pela Radiação Solar de Referência ( $I_r = 568 \text{ W/m}^2$ )



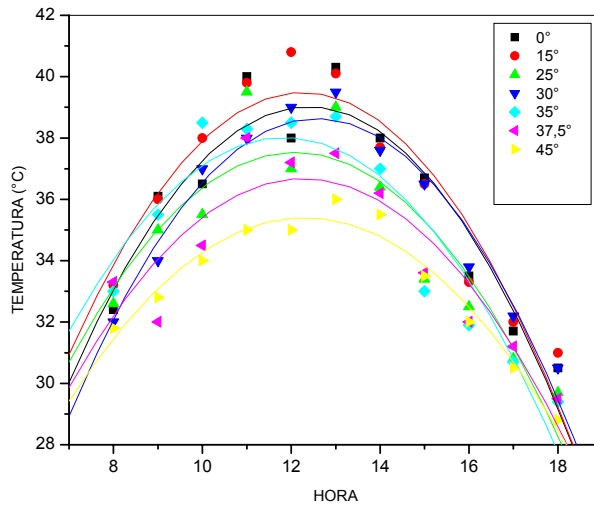
Centro Médio às 12h de cada inclinação em função da Velocidade do Vento pela Velocidade do Vento de Referência ( $V_r = 10,5 \text{ m/s}$ )



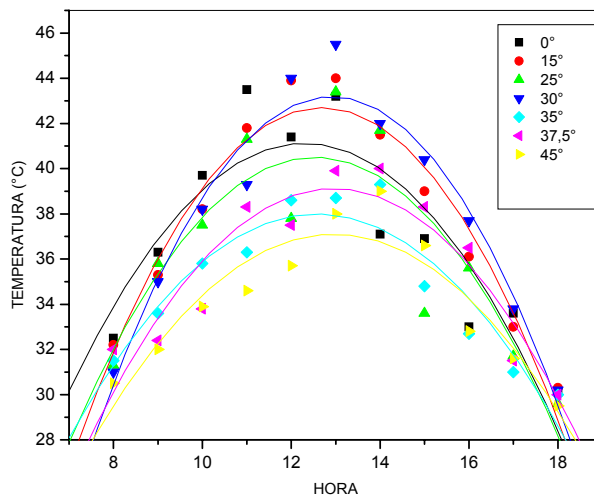
A.I Telhado Externo (E) de cada inclinação em função da hora



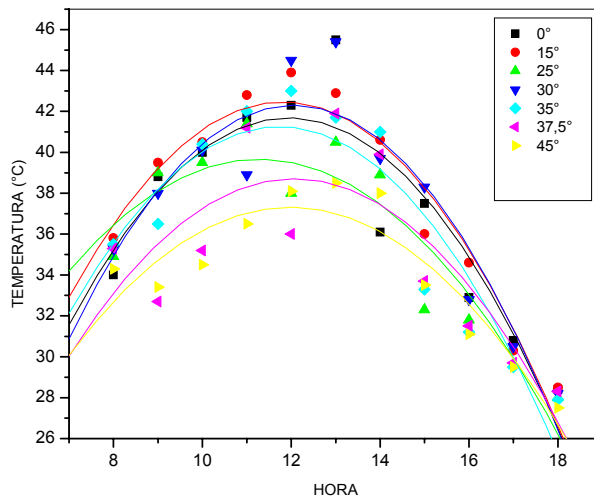
A.II Telhado Externo (W) de cada inclinação em função da hora



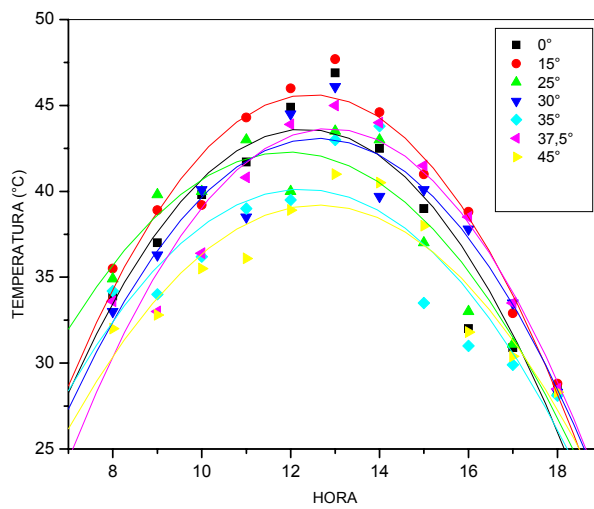
A.III Telhado Interno (E) de cada inclinação em função da hora



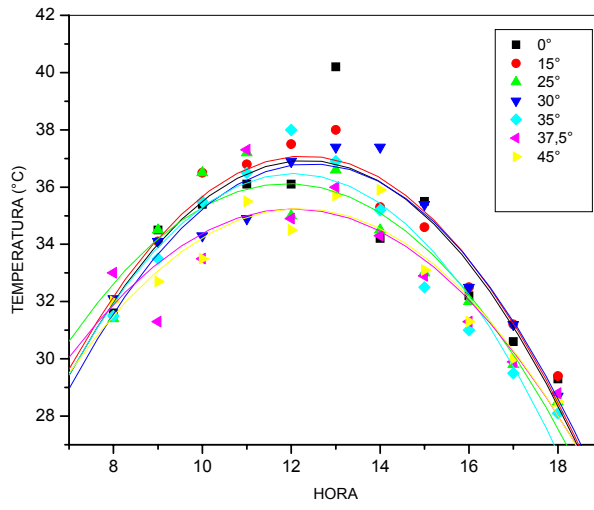
A.IV Telhado Interno (W) de cada inclinação em função da hora



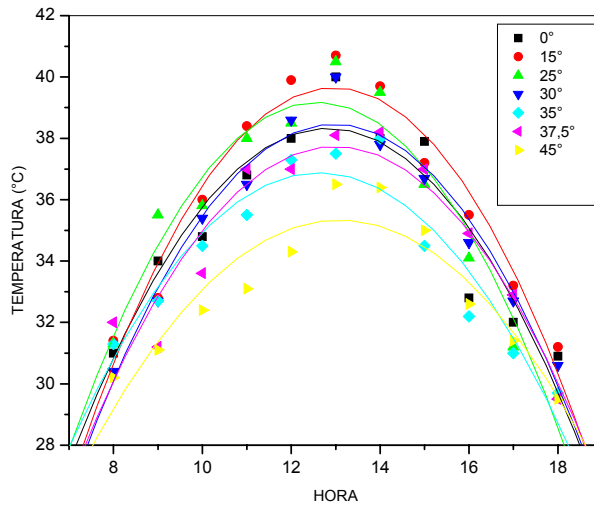
A.V Beiral Externo (E) de cada inclinação em função da hora



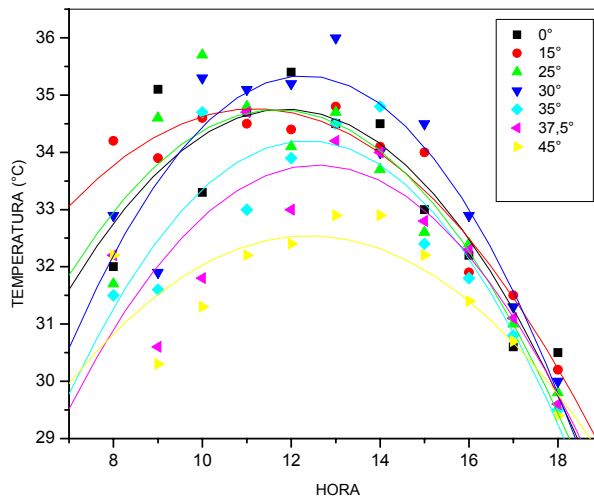
A.VI Beiral Externo (W) de cada inclinação em função da hora



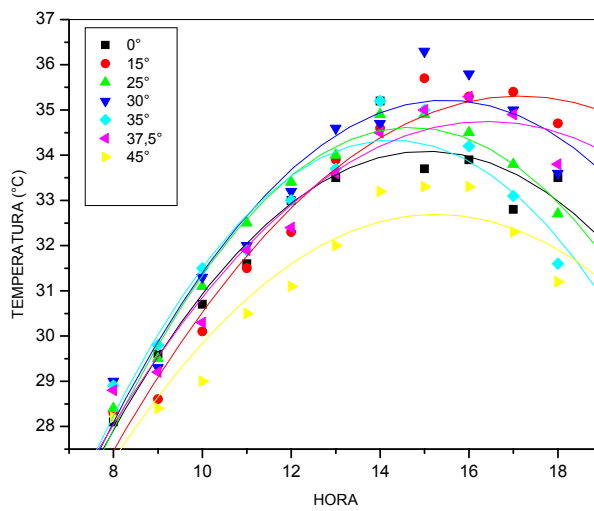
A.VII Beiral Interno (E) de cada inclinação em função da hora



A.VIII Beiral Interno (W) de cada inclinação em função da hora

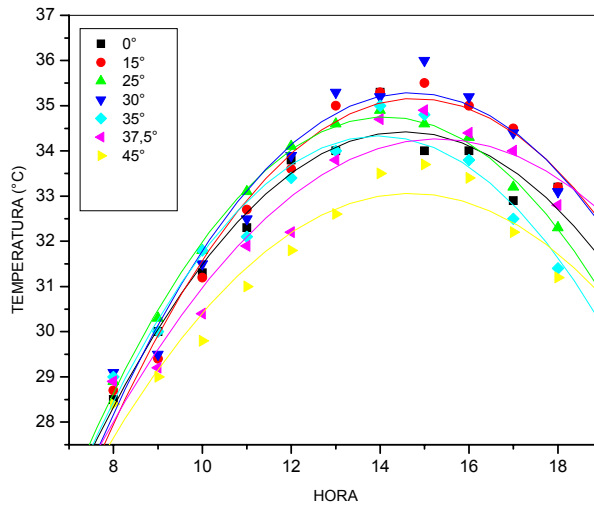


A.IX Parede Interna (E) de cada inclinação em função da hora

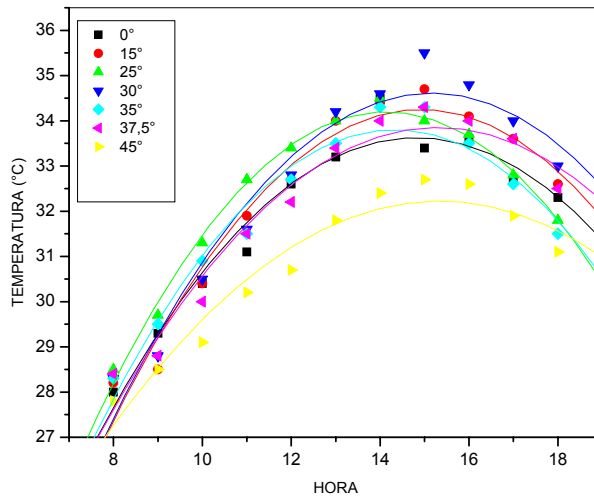


A.X Parede Interna (W) de cada inclinação em função da hora

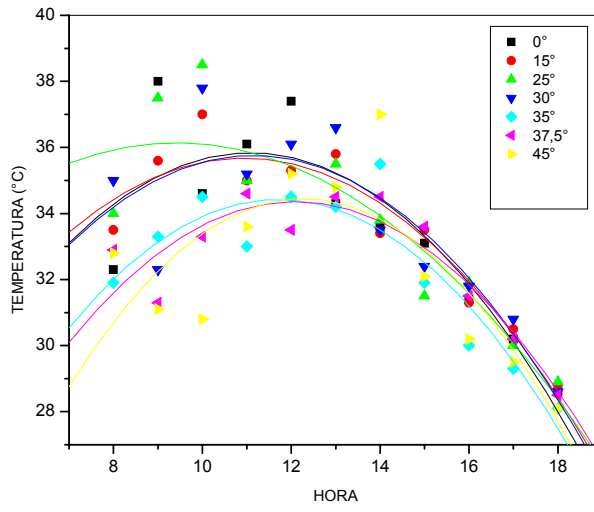




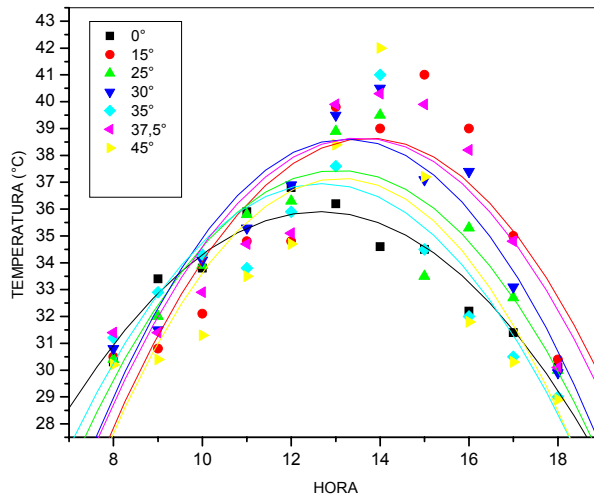
A.XI Parede Interna (S) de cada inclinação em função da hora



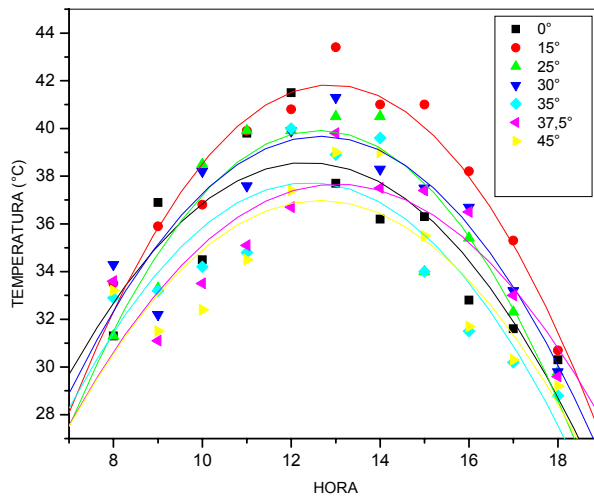
A.XII Parede Interna (N) de cada inclinação em função da hora



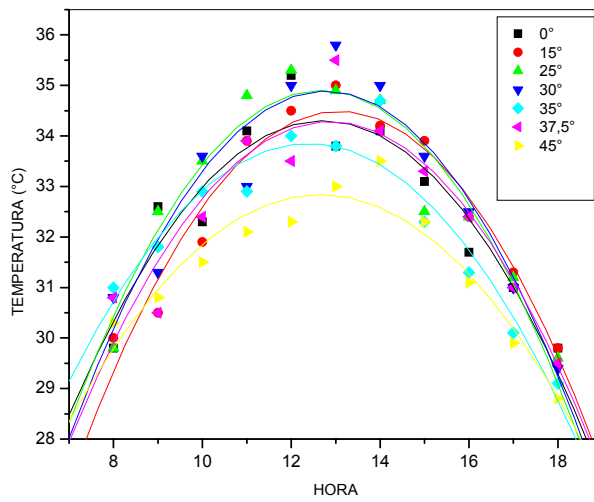
A.XIII Parede Externa (E) de cada inclinação em função da hora



A.XIV Parede Externa (W) de cada inclinação em função da hora



A.XV Parede Externa (S) de cada inclinação em função da hora



A.XVI Parede Externa (N) de cada inclinação em função da hora