

Ventilação

nome: Walter Affonso Junior.

n.º USP: 7151162

Disciplina PMC 500 —

Trabalho de Formatura

Prof. Orientador: José Maria Jabardo

EPUSP dez/81

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600007059

2206405

TF-81
AP 28V

I - Introdução

Este trabalho tem por objetivo estudar a ventilação através do forro (ático) de uma construção qualquer e sua influência na temperatura interna do ambiente fechado localizado abaixo do forro.

Estudamos também em que medida a velocidade e direção do vento afetam aquela temperatura.

II - O modelo

Adotamos para a análise uma "casa" representada por um paralelepípedo cujas paredes são de tijolos e o piso, laje e cobertura são de concreto. Não há janelas ou qualquer abertura exceto a do forro. (fig. 1)

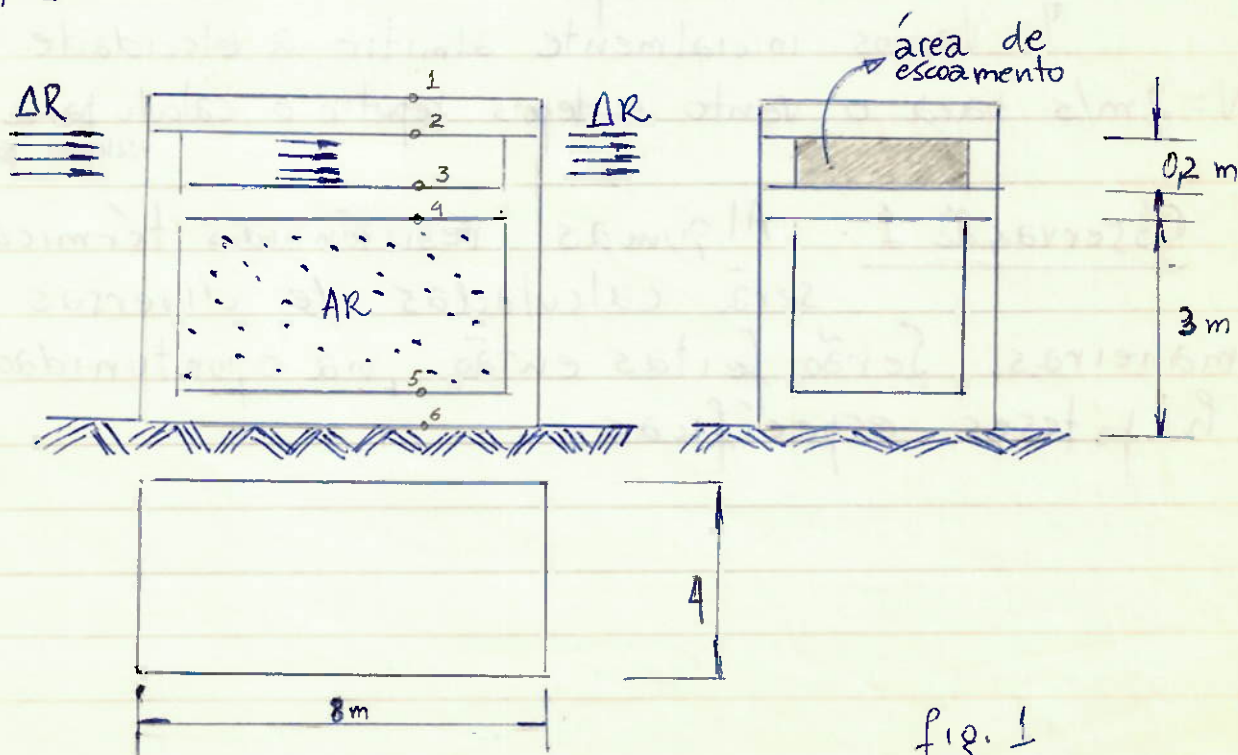


fig. 1

As espessuras são todas 0,1 m

III - Hipóteses

- 1- Regime permanente
- 2- A única fonte de calor é a radiação solar admitida constante e igual a 900 W/m^2 (valor médio entre 11 e 14 horas)
- 3- Desprezamos a radiação solar nas paredes laterais (incidência só sobre o teto)
- 4- Vamos admitir ar (externo) e solo a temperatura de 25°C
- 5- Neste modelo simplificado supomos que não há troca por convecção entre as superfícies 2 e 3 (fig.1). O ar que entre elas escoa rouba-lhes (ou cede-lhes) calor independentemente, não havendo troca líquida de 2 para 3. Assume-se então que a única troca entre 2 e 3 seja por radiação.
6. Nas trocas por radiação (2-3 e 4-5) admitimos o ar transparente
7. Vamos inicialmente admitir a velocidade $V=2 \text{ m/s}$ para o vento e depois repetir o cálculo para outros valores. ~~para outros~~

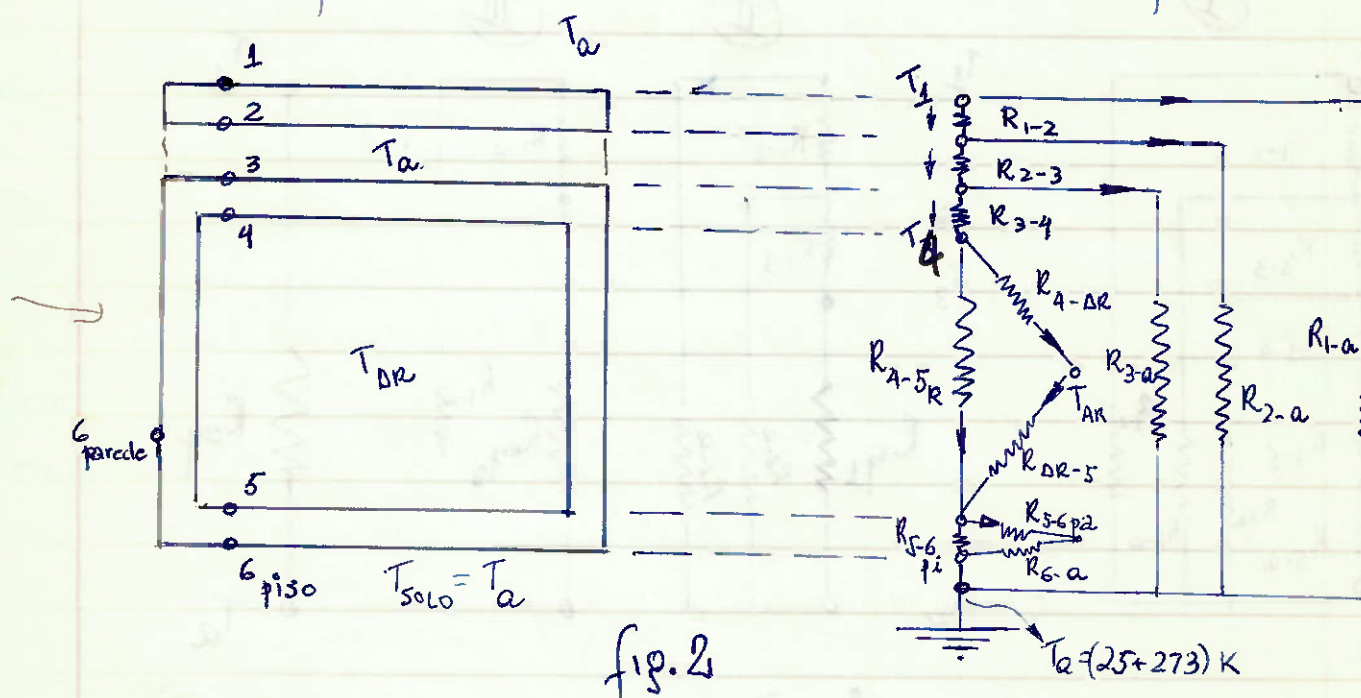
Observação 1: Algumas resistências térmicas serão calculadas de diversas maneiras. Serão feitas então, na oportunidade, hipóteses específicas.

IV - Desenvolvimento

Para equacionarmos o problema e termos todos os fluxos de calor e o perfil de temperaturas vamos construir o circuito elétrico equivalente.

a-) Pré-cálculo

Nesta primeira fase vamos admitir que o ar não se aquece ao escoar entre as superfícies 2 e 3. Isto simplifica bastante os cálculos pois, pensando na analogia elétrica, todas as trocas com o ar se ~~dão~~ darão com o potencial 25°C (terra). Veja fig. 2:



onde

$R_{1-2}, R_{2-3}, R_{3-4}$ --- resistências à condução (concreto)
 R_{2-3}, R_{4-5R} --- resistências à radiação
 $R_{1-a}, R_{2-a}, R_{3-a}, R_{6-a}$ --- resistências de convecção (forçada, troca com o vento)
 R_{4-AR}, R_{DR-5} --- convecção natural com o ar "fe-

chado", entre 4,5. Neste 1º modelo trataremos as trocas com o ar "fechado" como convecção natural. Posteriormente será calculada esta resistência como "condução pura" (estratificação do ar)

R_{5-6pa} ----- condução nas paredes (tijolo)

R_{5-6pi} ----- condução pelo piso (concreto)

1. Resistência Equivalente

Vamos reduzir o circuito a uma única resistência equivalente R_{eq} (fig. 3)

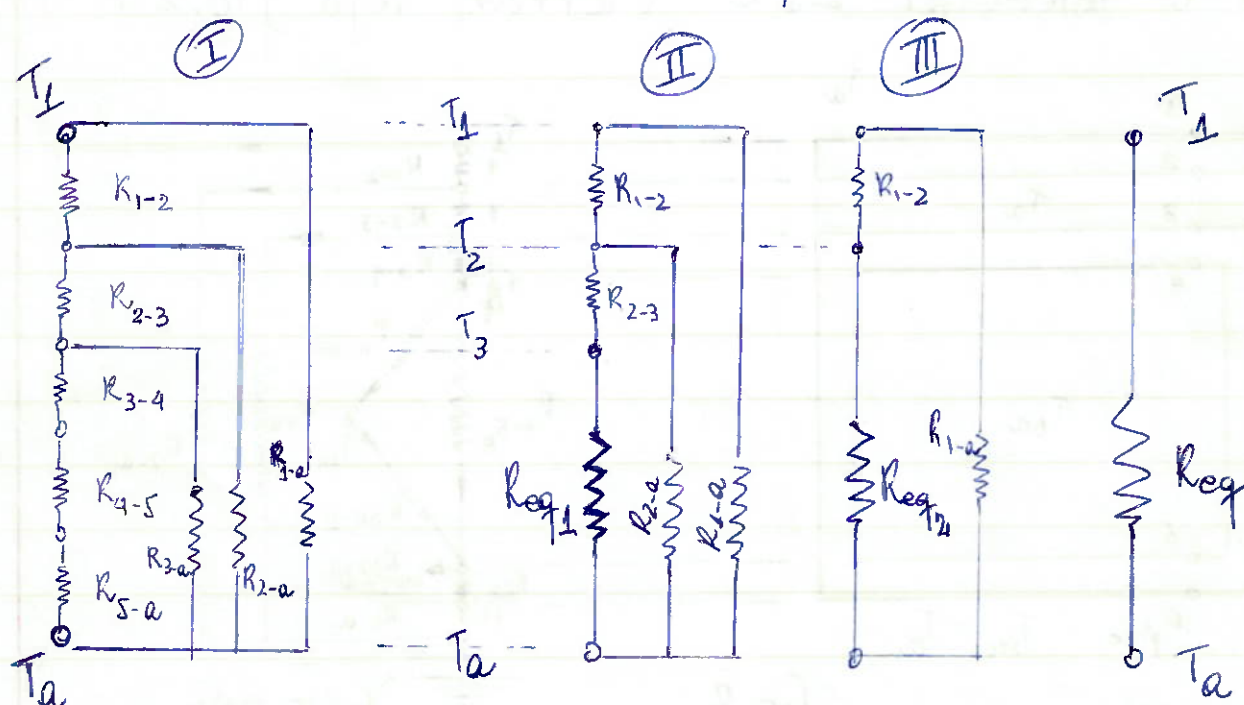


fig. 3

Associando as diversas resistências em série e em paralelo temos as relações:

Para o circuito ① :

$$R_{4-5} = \frac{1}{\frac{1}{R_{4-5R}} + \frac{1}{R_{4-OR} + R_{AR-5}}} \quad (1)$$

$$R_{5-a} = \frac{1}{\frac{1}{R_{5-6pi}} + \frac{1}{R_{5-6pa} + R_{6-a}}} \quad (2)$$

Circuito (II) :

$$R_{eq1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{3-a}} + \frac{1}{R_{3-4} + R_{4-5} + R_{5-a}}} \quad (3)$$

Subst. (1) e (2) na (3)

$$R_{eq1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{3-a}} + \frac{1}{R_{3-4} + \frac{1}{\frac{1}{R_{4-5R}} + \frac{1}{R_{4-OR} + R_{AR-5}}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{5-6pi}} + \frac{1}{R_{5-6pa} + R_{6-a}}}}} \quad (4)$$

$$R_{eq2} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq1} + R_{2-3}} + \frac{1}{R_{2-a}}} \quad (7)$$

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq2} + R_{1-2}} + \frac{1}{R_{1-a}}} \quad (8)$$

Substituindo o valor de R_{eq2} da (7) na (8) :

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{eq1} + R_{2-3}} + \frac{1}{R_{2-a}} + \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{1-a}}} \quad (9)$$

Substituindo o valor de R_{eq} de (4) na (9) chegamos à resistência equivalente:

$$R_{eq} = \frac{1}{\frac{1}{R_{3-a}} + \frac{1}{R_{3-4}} + \frac{1}{\frac{1}{R_{4-5R}} + \frac{1}{R_{4-OR} + R_{OR-5}} + \frac{1}{R_{5-6} + R_{5-6} + R_{5-a}}} + \frac{1}{R_{2-3}} + \frac{1}{R_{2-a}} + \frac{1}{R_{1-2}} + \frac{1}{R_{1-a}}} \quad (10)$$

2- O circuito elétrico global

Além da ~~res~~ resistência equivalente, que representa a "casa", temos o calor perdido para o céu (representado por meio da resistência R_c), a radiação solar incidente (Q_{sol}) e o calor perdido para o meio (Q_a). Representamos estas trocas através do circuito global (fig. 4)

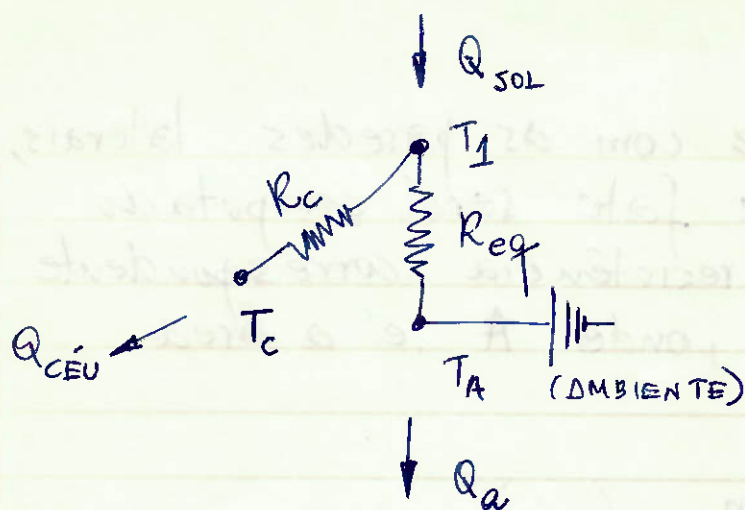


fig. 4

onde

- Q_{SOL} ----- radiação solar = 900 W/m^2
- Q_{CEU} ----- troca de calor com o céu (radiação)
- Q_a ----- calor cedido ao meio
- T_c ----- temperatura do céu
- T_a ----- temperatura ambiente = $25 + 273 \text{ K}$
- R_{eq} ----- resistência equivalente (vide fig. 3)
- T_1 ----- temperatura da superfície 1 (fig. 2)
- R_c ----- resistência à radiação para troca com o céu

Da fig. 4 podemos escrever

$$Q_{SOL} = Q_{CEU} + Q_a \quad (11)$$

$$T_1 - T_a = R_{eq} Q_a \quad (12)$$

$$T_1 - T_c = R_c Q_{CEU} \quad (13)$$

3. Cálculo das Resistências

Observação 2: Calcularemos os fluxos de calor por unidade de área.

Tomaremos por base a área A_1 , da superfície 1, igual a 32 m^2 (8×4). Quando o fluxo de calor se der por uma área diferente

de A_1 (o que ocorre com as paredes laterais, por exemplo), este fato será computado multiplicando-se a resistência correspondente pelo fator A/A_1 , onde A é a área em questão.

3.1. Cálculo de R_c (céu)

$$Q'' = \frac{Q}{A_1} = \bar{F}_{1-2} \sigma (T_1^4 - T_c^4) \quad (14) \quad (\text{bibliog. 1})$$

Considerando o céu como corpo negro e considerando $\bar{F}_{1-2} = 1$, pois trata-se de um pequeno corpo plano ^{horizontal} envolvido por uma semi-esfera, temos:

$$A_1 \bar{F}_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) + \frac{1}{A_1 \bar{F}_{1-2}}} \quad (\text{bibliog. 1})$$

multipl. por A_1 :

$$\bar{F}_{1-2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) + \frac{1}{\bar{F}_{1-2}}} \quad (15)$$

Como $\epsilon_2 = 1$ (corpo negro) e $\bar{F}_{1-2} = 1$

resulta $\bar{F}_{1-2} = \epsilon_1 =$ emissividade da superfície A_1

Uma expressão para temperatura de céu é

$$T_{\text{CEU}} = 0,0552 T_{\text{ar}}^{1,5} \text{ (}^{\circ}\text{K)} \quad (16)$$

Os valores numéricos são

$$\begin{array}{ll} \sigma & 5,67 \times 10^{-8} \text{ kcal/h m}^2 \text{ K}^4 \text{ (Stefan-Boltzmann)} \\ \epsilon_1 & 0,9 \text{ (concreto)} \\ T_{\text{ar}} = T_a & (25 + 273) \text{ K} \end{array}$$

Substituindo esses valores nas expressões (14) e (16) resulta

$$\begin{aligned} T_c &= 273 + 10,96 \text{ K} \\ \frac{Q_{\text{CEU}}}{A_1} &= 0,9 \times 5,67 \times 10^{-8} \left\{ T_1^4 - \left[0,0552 (273 + 25)^{1,5} \right]^4 \right\} \end{aligned}$$

$$\frac{Q_{\text{CEU}}}{A_1} = 5,103 \times 10^{-8} T_1^4 - 285 \quad (17)$$

3.2. Calor proveniente do sol

Admitimos o valor médio (vide III - hipóteses)

$$Q_{\text{sol}} = 900 \text{ W/m}^2 = 773,82 \text{ kcal/h m}^2 \quad (18)$$

3.3. Cálculo de R_{1-a} , R_{2-a} , R_{3-a} , R_{6-a} , R_{4-AR} e R_{AR-5}

As expressões para o cálculo dos coeficientes de película foram retiradas da bibliop. 2.:

$$h_f = 0,664 V^{0,8} L^{-0,2} \quad (19)$$

~~ou~~

$$h_c = h_f + \frac{46,512 - V^2}{46,512} h_n \quad (20) \quad V \leq 6,82 \text{ mph} \\ (3,048 \text{ m/s})$$

onde

h_f ----- coeficiente de película para convecção forçada

h_n ----- idem convecção natural

h_c ----- coeficiente total de convecção

V ----- velocidade do ar, mph (milhas/hora)

L ----- comprimento da superfície, ft

O valor de h_n é dado por (bibliog. 2) :

$$h_n = 0,22 (\Delta T)^{1/3} \text{ ----- para materiais com a superfície voltada para cima quando aquecidos e para baixo quando resfriados (21)}$$

$$h_n = 0,19 (\Delta T)^{1/3} \text{ ----- para materiais com superfícies verticais (22)}$$

$$h_n = 0,11 (\Delta T)^{1/3} \text{ ----- para materiais com a superfície voltada para cima quando resfriados e para baixo quando aquecidos (23)}$$

ΔT ----- diferença de temperatura entre superfície e ar (°F)

Como vemos na expressão (20), no cálculo do coeficiente de película é computada uma pequena parcela referente à convecção natural, que passa a ter maior peso

conforme diminui a velocidade do vento.

Para o cálculo do valor de h_n será necessário que se estime ~~(h_n)~~ o valor das diferenças de temperatura ΔT . Esses valores ^{de h_n} serão recalculados quando obtivermos o perfil de temperaturas. Adiantamos, no entanto, que a adoção dos valores reais de ΔT altera muito pouco o valor de h_c previamente calculado.

3.3.1. R_{1-a}

Comprimentos: L_1 (comprimento) = 8m
 L_2 (largura) = 4m

Vamos adotar $L = \sqrt{8 \times 4} = 5,66 \text{ m} = 18,86 \text{ ft}$
 $V = 2 \text{ m/s} = 4,475 \text{ m.p.h.}$

Subst. na (19) resulta $h_f = 1,224 \text{ Btu/h}^\circ\text{F ft}^2$

Supomos $\Delta T = 20^\circ\text{C} = 36^\circ\text{F}$

Subst. na (23) $h_n = 0,363$

Subst. h_f , h_n ~~e~~ e V na (20) dá:

$$h_c = 1,43 \text{ Btu/h}^\circ\text{F ft}^2 = 6,98 \text{ Kcal/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$R_{1-a} = \frac{1}{h_{1-a}} = \frac{1}{6,98} = 0,14 \frac{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}{\text{Kcal}}$$

$$R_{1-a} = 0,14 \frac{\text{m}^2\text{ }^\circ\text{C}}{\text{Kcal}} \quad (24)$$

3.3.2 R_{2-a}

Supomos $\Delta T = 15^\circ\text{C} = 27^\circ\text{F}$

Da (21), com $\Delta T = 27$ resulta $h_n = 0,66$

O valor de h_f é o mesmo. Subst. na (20) e transformando as unidades

$$h_c = 7,81 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2\text{C}}$$

$$\text{portanto } R_{2-a} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{C h}}{\text{kcal}} \quad (25)$$

3.3.3. R_{3-a}

$$R_{3-a} = R_{1-a} = 0,14 \frac{\text{m}^2\text{C h}}{\text{kcal}} \quad (26)$$

3.3.4. R_{6-a}

Vamos supor $\Delta T = 5^\circ\text{C} = 9^\circ\text{F}$

Subst. na (22) resulta $h_n = 0,4$

Subst. na (20) e lembrando que h_f permanece inalterado, segue analogamente que

$$R_{6-a} = 0,13 \frac{\text{m}^2\text{C h}}{\text{kcal}} \quad (27)$$

3.3.5 R_{4-ar} (Convecção Natural)

Analogamente, estimando $\Delta T = 3,6^\circ\text{F}$ (2°C)

$$\text{da eq. (21)} \quad h_n = 0,34 \text{ Btu} / \text{h}^\circ\text{F ft}^2$$

$$R_{4-AR} = \frac{1}{h_{4-AR}} = 0,61 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Kcal} \quad (28)$$

3.3.6 R_{5-AR} (convecção natural)

Analogamente, para o mesmo $\Delta T = 3,6^\circ F$
da (22): $h_n = 0,29 \text{ Btu}/h^\circ F ft^2$

$$R_{AR-5} = \frac{1}{h_n} = 0,70 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Kcal} \quad (29)$$

3.4. Condução

3.4.1. Para o concreto

condutividade $K = 0,89 \frac{Kcal}{h m^\circ C}$. Sendo a espessura

igual a 0,1 m, resulta a condutância

$$C = \frac{0,89}{0,1} = 8,9 \quad \text{e a resistência}$$

$$R_{5-6_{pi}} = \frac{1}{C} = 0,11 \frac{Kcal \cdot h m^2 \cdot ^\circ C}{Kcal}$$

$$R_{1-2} = R_{3-4} = R_{5-6_{pi}} = 0,11 \frac{h m^2 \cdot ^\circ C}{Kcal} \quad (30)$$

3.4.2. Para o tijolo

condutividade $K = 0,7 \text{ Kcal}/h m^\circ C$

Analogamente resulta

$$R_{5-6_{pa}} = 0,14 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{Kcal} \quad (31)$$

3.5. Radiação (R_{2-3} e R_{4-5})

3.5.1. R_{2-3}

Segundo Kreith (bibliog. 1) pág. 200 o fator de forma para retângulos 2:1 paralelos com paredes verticais condutoras é:

$$F_{1-2} = 0,9 \quad , \text{ com } \frac{\text{lado menor}}{\text{distância entre planos}} = \frac{4}{0,2} = 20$$

e da (15) com $\epsilon_2 = \epsilon_3 = 0,94$ (100°F)

$$F_{1-2} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,94} - 1\right) + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{0,94} - 1\right) + \frac{1}{0,9}} = 0,807 \quad (32)$$

($A_1 = A_2$)

$$\frac{Q}{A} = F_{1-2} \cdot \sigma (T_2^4 - T_3^4)$$

Substit. vem:

$$\frac{Q}{A} = \underbrace{0,807 \times 4,88 \times 10^{-8}}_C (T_2 + T_3)(T_2^2 + T_3^2)(T_2 - T_3)$$

Vamos estimar T_2 e T_3 como 308 e 316 K (para o cálculo de C)

$$\frac{Q}{A} = C (T_2 - T_3)$$

resulta então $C = 4,79 \frac{\text{Kcal}}{\text{h m}^2\text{K}}$

ou $R_{2-3} = 0,21 \frac{\text{hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Kcal}} \quad (33)$

3.5.2. R_{4-5} neste pré-cálculo
Desprezamos a radiação do teto para paredes laterais.
Analogamente ao item anterior,
admitindo $\left\{ \begin{array}{l} T_4 = 29 + 273 \text{ K} \\ T_5 = 27 + 273 \text{ K} \end{array} \right.$ resulta

$$C = 0,807 \times 9,88 \times 10^{-8} (T_4 + T_5) (T_4^2 + T_5^2) = 4,21$$

ou $R_{4-5} = 0,24 \frac{\text{hm}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{\text{Kcal}} \quad (34)$

Observação 3: A influência dos valores escolhidos para as temperaturas absolutas no valor final das resistências (radiação) é mínima, dada a natureza das expressões. Mesmo assim, os valores corretos dessas temperaturas serão introduzidos no cálculo definitivo.

3.6. De acordo com a observação 2 do item 3 deveremos calcular o fator A/A_1 para as resistências R_{AR-5} , $R_{5-6 \text{ pa}}$ e R_{6-a} , pois são as únicas que não se referem à área A_1 .

para R_{AR-5} : $\frac{A_{\text{lat}} + A_{\text{piso}}}{A_1} = 3,25 \quad (35)$

para $R_{5-6 \text{ pa}}$ e R_{6-a} : $\frac{A_{\text{lat}}}{A_1} = 2,25 \quad (36)$

4. Cálculo do valor de R_{eq}

Substituindo os valores das resistências calculadas e as correções dadas pelas expressões (35) e (36) na equação (10) resulta

$$R_{eq} = 0,083 \frac{m^2 \text{ } ^\circ K}{Kcal} \quad (37)$$

5. Perfil de temperaturas (pré-cálculo)

As equações (11) (12) e (13) com os valores de Q_{SOL} , T_{CEU} , R_{eq} e R_c ficam

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{CEU} = 4,39 \times 10^{-8} T_1^4 - 285 \end{array} \right. \quad (38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 773,8 = Q_{CEU} + Q_A \end{array} \right. \quad (39)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (T_1 - 298) = 0,083 Q_A \end{array} \right. \quad (40)$$

O Sistema resolvido resulta na equação

$$4,39 \times 10^{-8} T_1^4 + \frac{1}{0,083} T_1 - 4649,16 = 0 \quad (41)$$

que se resolve para $T_1 = 338,21 \text{ K}$ ou
 $t_1 = 65,21 \text{ } ^\circ C$

Da (38) $Q_{CEU} = 285,1 \text{ Kcal/hm}^2$

Da (39) $Q_A = 488,67 \text{ Kcal/hm}^2$

Das definições de resistência bem como do balanço térmico dos fluxos de calor nos nós (fig. 2.) resultam as demais temperaturas T_2 , T_3 , T_4 e T_5 :

$$Q_{1-a} = (T_1 - T_a) / R_{1-a} = \frac{65,21 - 25}{0,14} = 287,21 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$T_1 - T_2 = R_{1-2} Q_{1-2}$$

$$Q_{1-2} = Q_A - Q_{1-a} = 488,67 - 287,21 = 201,46 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$\text{Portanto } T_2 = T_1 - R_{1-2} Q_{1-2} = 65,21 - 0,11 \times 201,46$$

$$T_2 = 43,05^\circ \text{C}$$

$$Q_{2-a} = \frac{T_2 - T_a}{R_{2-a}} = \frac{43,05 - 25}{0,13} = 138,84 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$T_2 - T_3 = R_{2-3} Q_{2-3}$$

$$Q_{2-3} = Q_A - Q_{1-a} - Q_{2-a} = 488,67 - 287,21 - 138,84$$

$$Q_{2-3} = 62,62 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$\text{Substituindo } Q_{2-3} \text{ vem } T_3 = T_2 - R_{2-3} Q_{2-3}$$

$$T_3 = 43,05 - 0,21 \times 62,62 = 29,9^\circ \text{C}$$

$$Q_{3-a} = \frac{T_3 - T_a}{R_{3-a}} = \frac{29,9 - 25}{0,14} = 35,0 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$Q_{3-4} = Q_{2-3} - Q_{3-a} = 62,62 - 35 = 27,62 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

$$T_3 - T_4 = R_{3-4} Q_{3-4} \text{ portanto } T_4 = 29,9 - 0,11 \times 8,1$$

$$T_4 = 29,01^\circ\text{C}$$

$$T_4 - T_5 = R_{4-5} Q_{4-5}$$

$$(29,01 - T_5) = 0,19 \times 8,1 \text{ Portanto } T_5 = 27,47^\circ\text{C}$$

Assim, como $T_4 = 29,01^\circ\text{C}$ e $T_5 = 27,47^\circ\text{C}$ concluímos que o ar ambiente no interior da "casa" ficará a uma temperatura média de $28,2^\circ\text{C}$

$$T_{\text{Ar}} = 28,2^\circ\text{C}$$

Se tentarmos agora fechar o balanço térmico, verificaremos que este não se verifica exatamente. Assim, para o fluxo total através das paredes de $8,1 \text{ Kcal/hm}^2$ a temperatura interna das paredes (T_5) deveria ser ~~a~~ aproximadamente $25,6^\circ\text{C}$ para que se verificasse a relação

$$(T_5 - T_a) = R_{5-a} Q \text{ com } R_{5-a} = 0,07$$

$$Q = 8,1$$

Obtivemos $T_5 = 27,5$. Acreditamos que o erro se deva a:

- trata-se da 1ª reiteração (pré-cálculo)
- imprecisão nos cálculos (2 casas decimais, principalmente para as resistências)
- a própria natureza do problema em si, pois apenas 1% da carga térmica recebida passa pela laje ao ar fechado. Assim, as imprecisões cometidas no

cálculo das cargas térmicas referentes às superfícies 1 e 2 (da ordem de $200 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$)

Influenciam grandemente a precisão dos valores obtidos para as temperaturas das superfícies 4, 5 e 6, pelas quais flui a carga de $8 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$

O perfil provisório de temperaturas está indicado na fig. 5 ($^{\circ}\text{C}$)

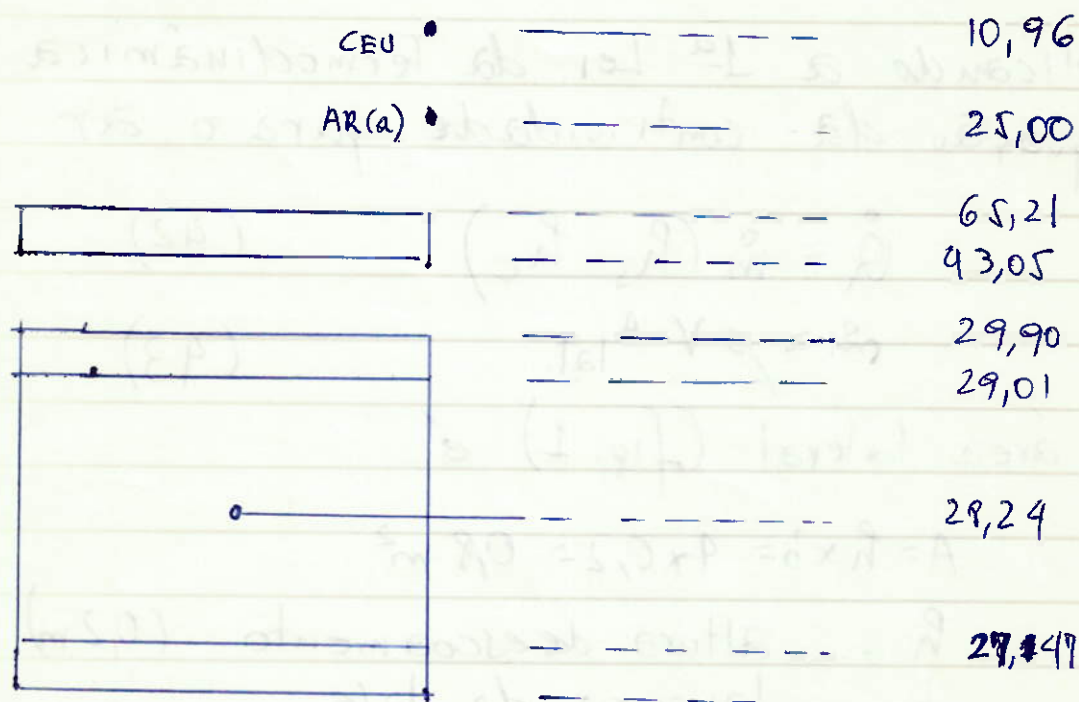


fig. 5

b- Cálculo Definitivo

1- Com os valores obtidos para as temperaturas, vamos recalcular as resistências que delas dependem objetivando, além de refinar os cálculos, maior precisão no fechamento do balanço térmico. Vamos também melhorar um pouco

nosso modelo, utilizando para o ar que flui pelo "forro" a temperatura média

$$T_M = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (\text{onde } T_e \text{ e } T_s$$

são as temperaturas de entrada e saída do ar, respectivamente) que agora pode ser estimada, pois conhecemos as cargas térmicas cedidas ao ar (Q_{2-a} e Q_{3-a})

Aplicando a 1ª Lei da Termodinâmica e a equação da continuidade para o ar temos:

$$\dot{Q} = \dot{m} (h_s - h_e) \quad (42)$$

$$\dot{m} = \rho V A_{lat} \quad (43)$$

A área lateral (fig. 1) é

$$A = h \times b = 4 \times 0,2 = 0,8 \text{ m}^2$$

onde h ... altura de escoamento (0,2m)
 b ... largura da laje

Para a obtenção da densidade ρ do ar das tabelas (bibliog. 3) vamos estimar $T_M = 30^\circ\text{C}$. Daí $\rho = 1,129 \text{ kg/m}^3$

Assim $\dot{m} = \rho V A = 1,129 \times 2 \times 0,8 = 1,806 \text{ kg/s}$

A entalpia de entrada (bibliog. 3) a 25°C é $h_e (25^\circ\text{C}, 1 \text{ atm}) = 1,26 \text{ Kcal/kg}$

$$\dot{Q}'' = Q_{2-a} + Q_{3-a} = 138,84 + 35 = 173,84 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2}$$

onde $\dot{Q}''$ é o calor recebido pelo ar por unidade de tempo e por unidade de área.

$$\dot{Q} = \dot{Q}'' \times A_1 = 173,84 \times 32 = 5563 \text{ kcal/h}$$

Substituindo esses valores na (42):

$$\frac{5563}{60} = 1,806 (h_s - 71,26)$$

portanto $h_s = 72,12 \text{ kcal/kg}$ e

das tabelas (bibliog. 3) $t_s = 35,4^\circ\text{C}$ (44)

Como o valor de p foi tirado para 30°C que é aproximadamente a média entre $35,4$ e 25°C não será necessária reiteração.

Portanto

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} = \frac{35 + 35,4}{2} = 30,2^\circ\text{C}$$

2- Resistências

Com as temperaturas indicadas na fig. 5 e as equações estabelecidas no item "a" nº 3, recalculamos as resistências que dependem da temperatura.

Os novos valores diferem muito pouco dos anteriormente obtidos: $\left(\frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 ^\circ\text{C}} \right)$

R_{1-a}	0,138
R_{2-a}	0,129
R_{3-a}	0,157
R_{6-a}	0,151
R_{2-3}	0,214
R_{4-5_R}	0,203 *

* Observação 4

Cálculo da resistência R_{4-5_R}

Modificamos o cálculo anteriormente descrito (3.5.2) considerando agora a radiação não só para o piso mas do teto para o piso e paredes laterais. Admitimos piso e ~~as~~ paredes laterais à mesma temperatura ($t_5 = 27,47^\circ\text{C}$). O teto está a $t_4 = 29,01^\circ\text{C}$.

Como toda radiação do teto se dirige para as paredes ou piso e estes encontram-se por hipótese à mesma temperatura, o fator de forma entre teto e demais superfícies é $F_{4-5} = 1$

Assim, a equação (15) admitindo, para simplificar uma emissividade média entre tijolo e concreto de 0,92 ($= \frac{0,9 + 0,94}{2}$) fica:

$$F_{4-5} = \frac{1}{\left(\frac{1}{0,94} - 1\right) + \frac{32}{104} \left(\frac{1}{0,92} - 1\right) + 1}$$

$$F_{4-5} = 0,92$$

Analogamente ao item 3.5.1 a condutância $C = \frac{1}{R}$ e'

$$C = F \cdot \sigma (T_4 + T_5)(T_4^2 + T_5^2) \\ = 0,92 \cdot 4,88 \times 10^{-8} (29,01 + 273 + 27,47 + 273) \times \\ \times [(29,01 + 273)^2 + (27,47 + 273)^2] = 4,909$$

Portanto $R_{4-5_R} = 0,203 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$

Observação 5

Tratamento da troca ~~de~~ através do ar fechado como condução.

Como não há qualquer infiltração, é razoável que haja uma estratificação do ar entre as superfícies 4 e 5. Assim, paralelamente à radiação haveria uma condução 4-5 através do ar.

No entanto, dado o baixo valor da condutividade térmica do ar

$(0,02275 \frac{\text{kcal}}{\text{m h } ^\circ\text{C}} \text{ a } 30^\circ\text{C})$ chegamos a

um valor aproximado de uma eventual resistência à condução de $60 \frac{\text{kcal}}{\text{h m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}}$, que

se torna desprezível quando em paralelo à resistência R_{4-5_R} (radiação)

A mesma observação vale para

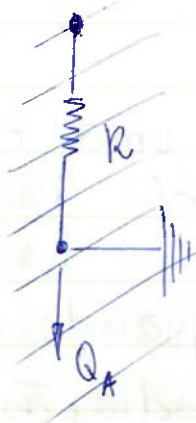
o modelo anterior (itens 3.3.6 e 3.3.5)
onde as resistências R_{A-AR} e R_{AR-5}

associadas em série e representando
convecção natural podem ser consideradas
desprezíveis quando ~~associadas~~ em paralelo
à radiação.

Assim, para os cálculos subsequentes,
~~com~~ assumiremos que a única troca
entre 4 (teto) e 5 (paredes + piso) é
por radiação.

3. Resistência equivalente e circuito elétrico global

O circuito elétrico global é análogo
ao do pré-cálculo (fig. 4). No entanto
deve-se notar o acréscimo do novo
potencial T_M , ao qual se referem os
fluxos 2-a e 3-a agora também
chamados de 2-M e 3-M, a letra M
designando tratar-se da temperatura
média do ar ($30,2^\circ\text{C}$). - fig. 6



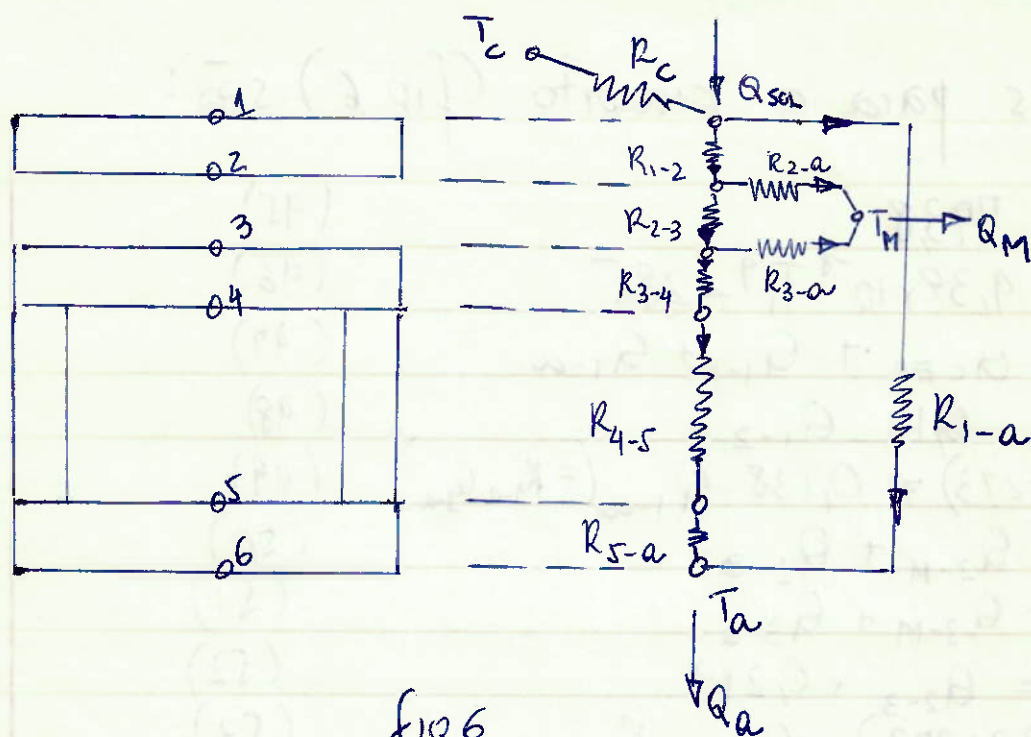
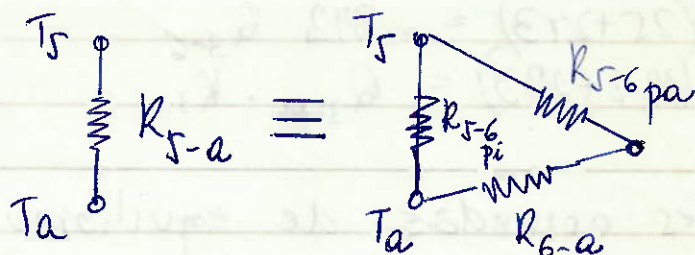


fig. 6



Nesta parte "b" não faremos como anteriormente (parte "a"), quando calculamos a resistência equivalente. A inclusão de T_m torna difícil a abordagem daquele tipo. Vamos escrever as equações para todas as resistências e o equilíbrio dos nós.

Antes porém, vamos calcular a resistência R_{5-a} : (fig. 6):

$$R_{5-a} = \frac{1}{\frac{1}{R_{5-6_{pi}}} + \frac{1}{R_{5-6_{pa}} + R_{6-a}}} = \frac{1}{\frac{1}{0,11} + \frac{1}{\frac{0,14}{2,25} + \frac{0,151}{2,25}}} = 0,059$$

onde 2,25 representa a relação A/A_1
(ver observação 2, item 3)

As equações para o circuito (fig. 6) são:

$$\begin{aligned}
 & Q_{sol} = 773,8 \quad (45) \\
 & Q_{CEU} = 4,39 \times 10^{-8} T_1^4 - 285 \quad (46) \\
 & * \quad Q_{sol} = Q_{CEU} + Q_{1-2} + Q_{1-a} \quad (47) \\
 & T_1 - T_2 = 0,11 \quad Q_{1-2} \quad (48) \\
 & T_1 - (25 + 273) = 0,138 \quad Q_{1-a} (= R_{1-a} Q_{1-a}) \quad (49) \\
 & * \quad Q_{1-2} = Q_{2-M} + Q_{2-3} \quad (50) \\
 & + \quad Q_{2-3} = Q_{3-M} + Q_{3-6} \quad (51) \\
 & T_2 - T_3 = Q_{2-3} \times 0,214 \quad (52) \\
 & T_2 - (30,2 + 273) = Q_{2-M} \cdot R_{2-M} \quad (53) \\
 & T_3 - (25 + 273) = 0,372 \quad Q_{3-6} \quad (55) \\
 & T_3 - (30,2 + 273) = Q_{3-M} \cdot R_{3-M} \quad (54)
 \end{aligned}$$

* equações oriundas de equilíbrio dos nós

R_{2-M} e R_{3-M} são as resistências R_{2-e} e R_{3-a} já calculadas. Assim temos 11 equações e 11 incógnitas

Substituindo

(45), (46), (48), (49) na (47)

(48), (52), (53) na (50)

(55), (52), (54) na (51)

resultam as equações (56), (57) e (58) nas incógnitas T_1 , T_2 e T_3

$$\begin{aligned}
 & 773,8 = 4,39 \times 10^{-8} T_1^4 - 285 + \frac{T_1 - T_2}{0,11} + \frac{T_1 - 298}{0,138} \quad (56) \\
 & \frac{T_1 - T_2}{0,11} = \frac{T_2 - 303,2}{0,129} + \frac{T_2 - T_3}{0,214} \quad (57) \\
 & \frac{T_2 - T_3}{0,214} = \frac{T_3 - 303,2}{0,157} + \frac{T_3 - 298}{0,372} \quad (58)
 \end{aligned}$$

onde foram feitos

na eq. 49: $R_{1-a} = 0,138 \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}{\text{kcal}}$

na eq. 53: $R_{2-u} = R_{2-a} = 0,129 //$

na eq. 54: $R_{3-u} = R_{3-a} = 0,157 //$

na eq. 55: $R_{3-6} = R_{3-4} + R_{4-5} + R_{5-6} = 0,11 + 0,203 + 0,059 = 0,372 \frac{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C h}}{\text{kcal}}$

Resolvendo o sistema de equações (56)(57)(58) obtemos

$$T_1 = 71,785 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 60,857 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 39,615$$

Da (54)

$$(T_3 - 298) = 0,372 \cdot Q_{3-6}$$

$$Q_{3-6} = 39,29 \text{ kcal/hm}^2$$

Da definição de R_{3-4} : $T_3 - T_4 = R_{3-4} \cdot Q_{3-4}$

mas

$$Q_{3-4} = Q_{3-6}$$

portanto $t_4 = t_3 - R_{3-4} \cdot Q_{3-6} = 39,615 - 0,11 \times 39,29$

$$t_4 = 39,615 - 0,11 \times 39,29 = 35,29 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_5 = t_4 - R_{4-5} \cdot Q_{4-5} = 35,29 - 0,203 \times 39,29$$

$$t_5 = 27,31$$

Assim, o ar deverá estar a uma temperatura média

$$t_{ar} = \frac{T_4 + T_5}{2} = \frac{35,29 + 27,31}{2} = 31,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4. Temperatura do ar "fechado" para outras velocidades do vento

Para se ter uma idéia da influência da velocidade do vento na temperatura interna (t_{ar}), repetimos os cálculos a partir do item b-2, para as velocidades de 1 e 3 m/s. Aplicando as relações anteriormente estabelecidas chegamos a

$v = 1 \text{ m/s}$	$v = 3 \text{ m/s}$
$R_{5-a} = \frac{1}{\frac{1}{0,11} + \frac{1}{\frac{0,14}{2,25} + \frac{0,225}{2,25}}} =$	$R_{5-a} = \frac{1}{\frac{1}{0,11} + \frac{1}{\frac{0,14}{2,25} + \frac{0,12}{2,25}}} =$
$R_{5-a} = 0,066$	$R_{5-a} = 0,056$
$R_{3-6} = 0,379$	$R_{3-6} = 0,369$
$R_{1-a} = 0,185$	$R_{1-a} = 0,120$
$R_{2-m} = R_{2-a} = 0,162$	$R_{2-m} = R_{2-a} = 0,120$
$R_{3-m} = R_{3-a} = 0,243$	$R_{3-m} = R_{3-a} = 0,121$

Aplicando esses valores no sistema de equações (56), (57) e (58) (veja a relação das resistências logo após o sistema de equações) obtemos os valores para T_1 , T_2 e T_3 , tabelados abaixo.

	$V = 1 \text{ m/s}$	$V = 2 \text{ m/s}$	$V = 3 \text{ m/s}$
$t_1 (^\circ\text{C})$	78,016	71,78	68,72
$t_2 (^\circ\text{C})$	66,39	60,86	58,16
$t_3 (^\circ\text{C})$	43,8	39,62	37,65

Analogamente ao procedimento feito para $V = 2 \text{ m/s}$, segue que

	$V = 1 \text{ m/s}$	$V = 2 \text{ m/s}$	$V = 3 \text{ m/s}$
$t_4 (^\circ\text{C})$	39,48	35,29	33,33
$t_5 (^\circ\text{C})$	31,50	27,31	25,35
$\rightarrow t_{ar} (^\circ\text{C})$	35,49	31,30	29,34

I - Comentários

Apesar de termos feito o cálculo para apenas três valores de " V ", acreditamos serem eles suficientes para que se tenha uma boa estimativa da influência da velocidade do vento na temperatura do ~~do~~ meio interno.

Constatamos também que a modelagem das trocas térmicas que ocorrem entre as superfícies 2 e 3 (fig. 1 e 2) e o ar influi consideravelmente no resultado final. Quando admitimos que a temperatura do ar que escoava entre 2 e 3 era constante ($T_e = T_s = T_a = 25^\circ\text{C}$) a temperatura interna do recinto resultava em torno de 28°C . Por outro lado, modelando o problema com

a temperatura média $T_M = (T_e + T_s)/2$ obtivemos temperaturas internas mais altas (31°C).

Decorre do exposto acima, a importância do tipo de abertura (área transversal e forma) pela qual o vento penetra no forro, pois esta determina a razão de ar (expressão (43)) que por sua vez determina a temperatura média do ar (T_M). Salientamos também que, dependendo do tipo de abertura, a perda de carga pode ser relevante.

Para a obtenção de novos pontos $T_{AR} = f(V)$ basta repetir o procedimento indicado para outras velocidades do vento, para o que recomendamos a confecção de um programa de computador a partir das relações estabelecidas.

A computação da influencia da direção do vento é simples, bastando para tanto tomar a componente alinhada ao eixo da abertura e levantar a curva a partir das expressões deduzidas.

Bibliografia

1. Princípios da Transmissão de Calor
Frank Kreith
2. Summer Attic and Whole-House
Ventilation
NBS Special Publication (U.S. Department
of Commerce) 548
3. Fundamentos da Termodinâmica
Clássica
Van Wyleu - Sonntag
4. Manual de Termodinâmica e
Transmissão de Calor
Remi Benedito da Silva



