



Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Transferência de Calor e Umidade em Telhas :  
Simulação e Análise Experimental

Professor André Duarte Bueno



Prof. André Duarte Bueno - Dr – LENE/CCT/UENF

### Resumo Lattes

- Possui graduação em **Engenharia Civil pela UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina (1990), **Mestrado em Engenharia Civil pela UFSC** (1994) e **Doutorado em Engenharia Mecânica pela UFSC** (2001).

- Atualmente é **Professor Associado da Universidade Estadual do Norte Fluminense - Darcy Ribeiro (2003)**, Chefe do Setor de Modelagem Matemática e Computacional (2004) e Coordenador do PRH25-ANP - Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional de Petróleo Gás Natural e Bio-Combustíveis.

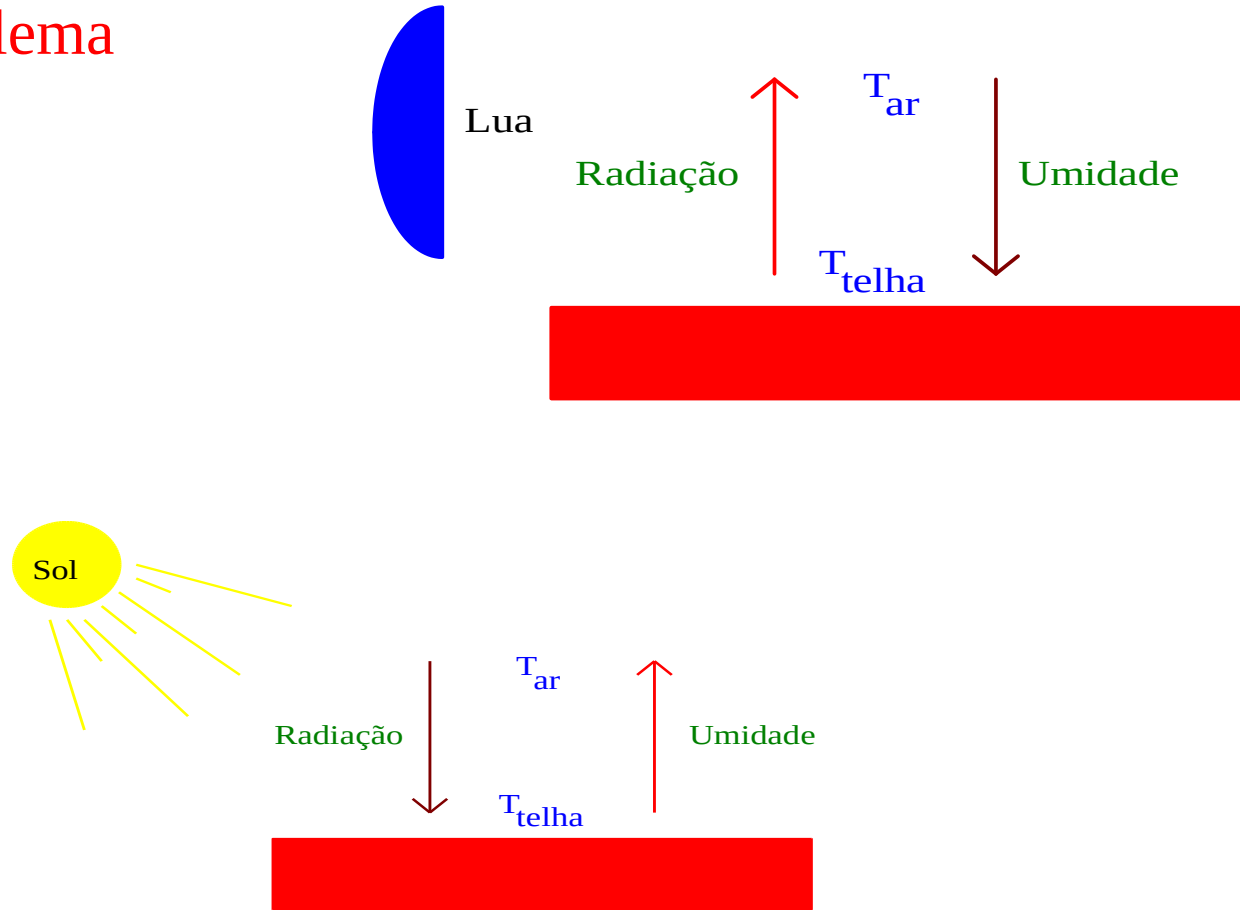
- Tem experiência na **área de Ciência da Computação Aplicada a Engenharia Mecânica e Engenharia de Petróleo**, com ênfase em Engenharia de Software, atuando principalmente nos seguintes temas: algoritmos computacionais aplicados a área de E&P, micro-modelagem de rochas reservatório com uso de técnicas de análise de imagens, programação orientada a objeto com C++ e software livre.

### Linhas de Pesquisa

- **Caracterização, Modelagem e Simulação Micro-Estrutural de Rochas Reservatório de Petróleo com Análise de Imagem**

- Desenvolvimento de Softwares Científicos para Área de Engenharia de Petróleo, Elevação e Escoamento, Simulação de Reservatório

# Escopo do Problema



## Resultados

**Densidade = 1 880 +/- 80 [kg/m<sup>3</sup>];**

**w<sub>sat</sub> = 0.17647 +/- 0.00003 [kg/kg];**

**porosidade = 0.331 +/- 0.014 [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>].**

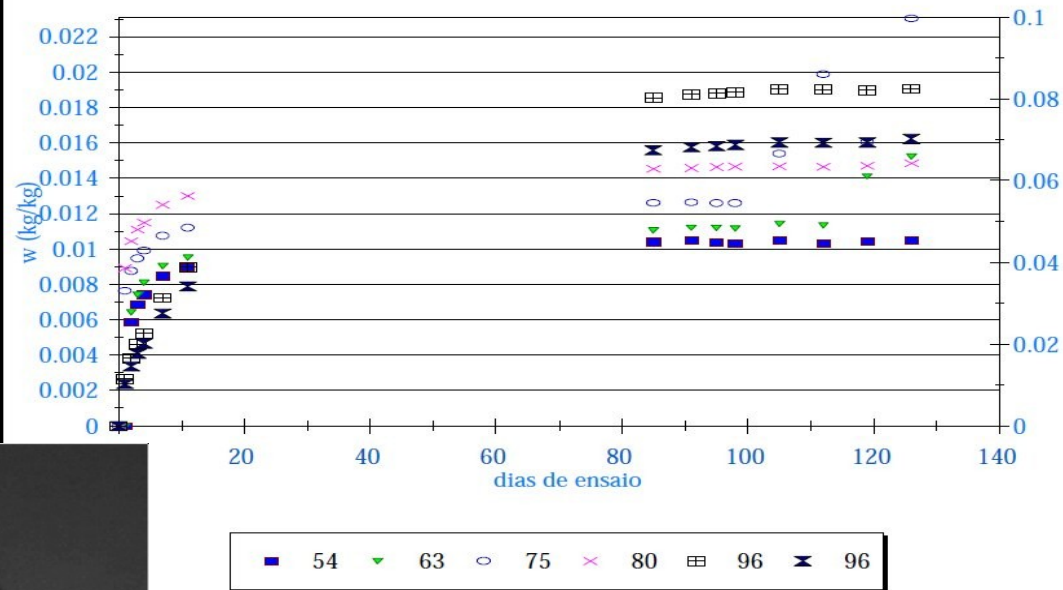
$$\rho = \frac{m_{\text{seca}}}{V_{\text{total}}}$$

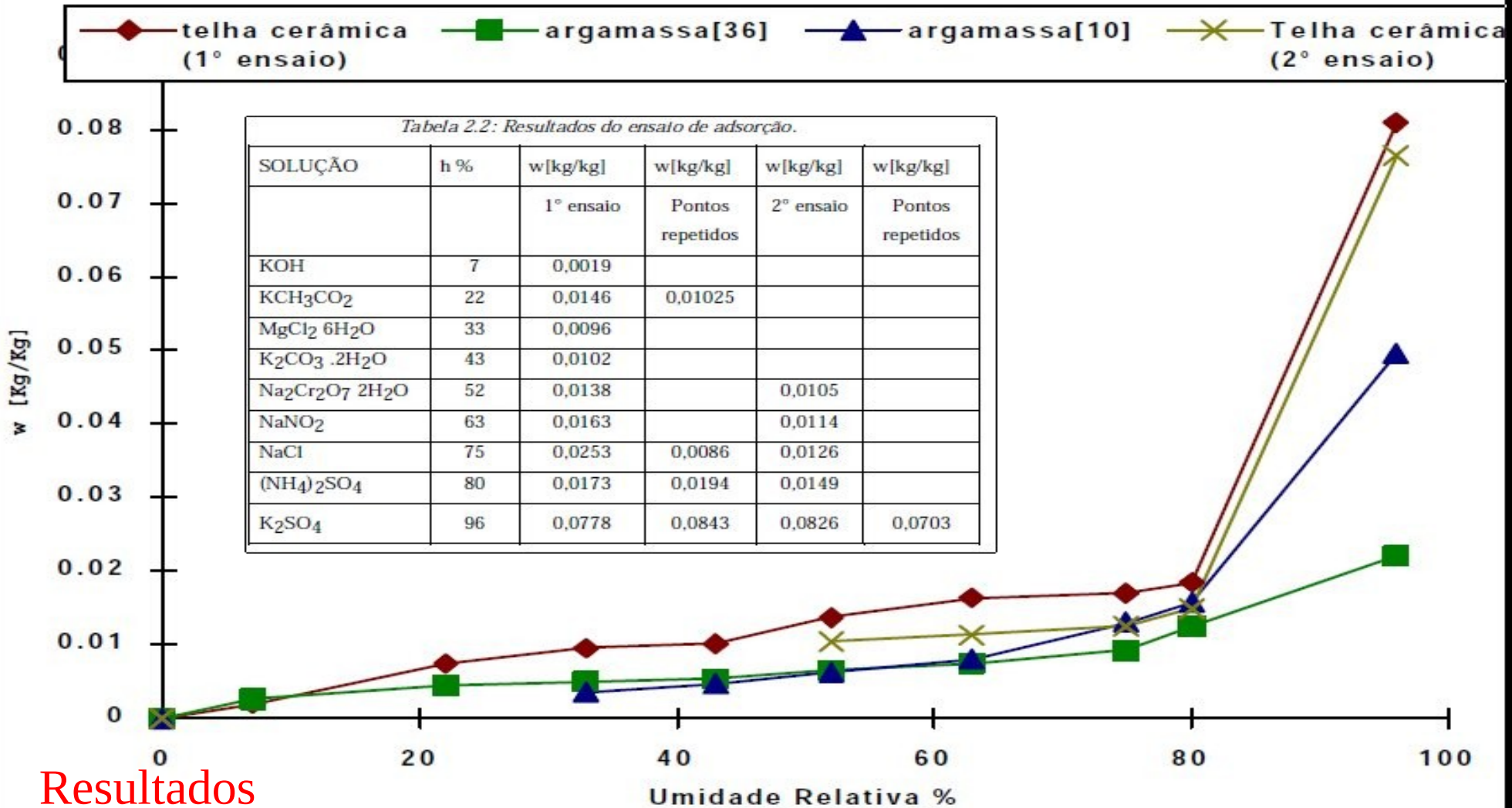
$$w = \frac{m_{\text{úmida}} - m_{\text{seca}}}{m_{\text{seca}}}$$

$$\eta = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{total}}} = w_{\text{sat}} \cdot \frac{\rho_t}{\rho_l}$$

Material	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Porosidade [m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]
Telha de cerâmica	1 880 +/- 80	0.331 +/- 0.014
Argamassa de cal e cimento [10].	1 730 +/- 50	0.31 +/- 0.03

# Resultados

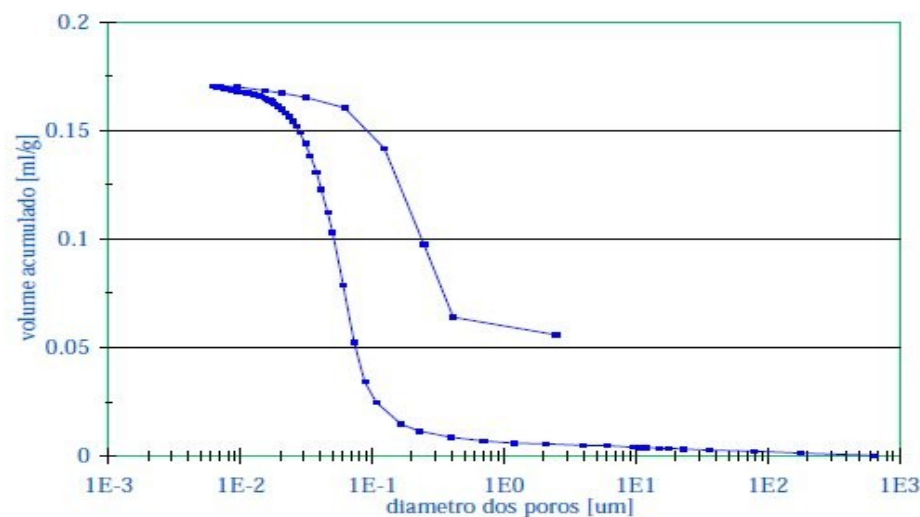
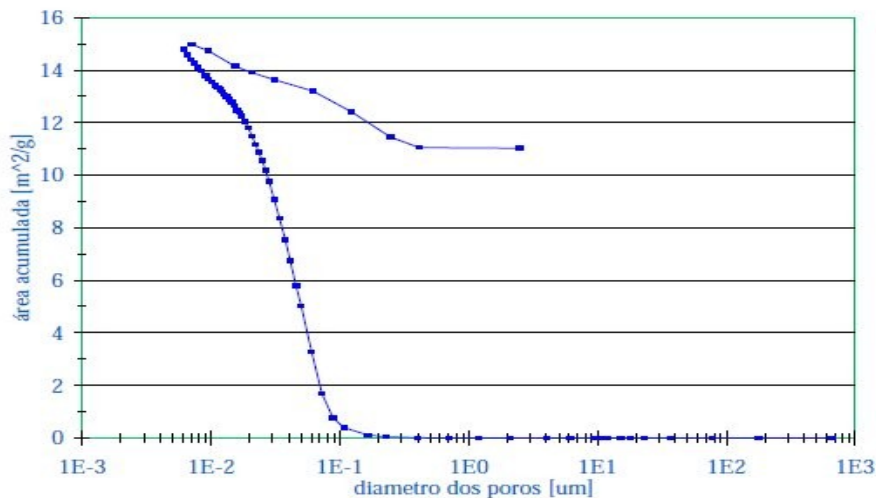




# Resultados

*Tabela 2.3: Principais resultados do ensaio de porosimetria a mercúrio*

Volume máximo de mercúrio retido pela amostra na intrusão	0.1702 ml/g.
Área total dos poros	14.791 m <sup>2</sup> /g.
Diâmetro médio do poro (volume)	0.0579 μm
Diâmetro médio do poro (área)	0.0385 μm
Densidade	1.8298 g/ml
Densidade aparente	2.6573 g/ml
Porosidade	31.14 %





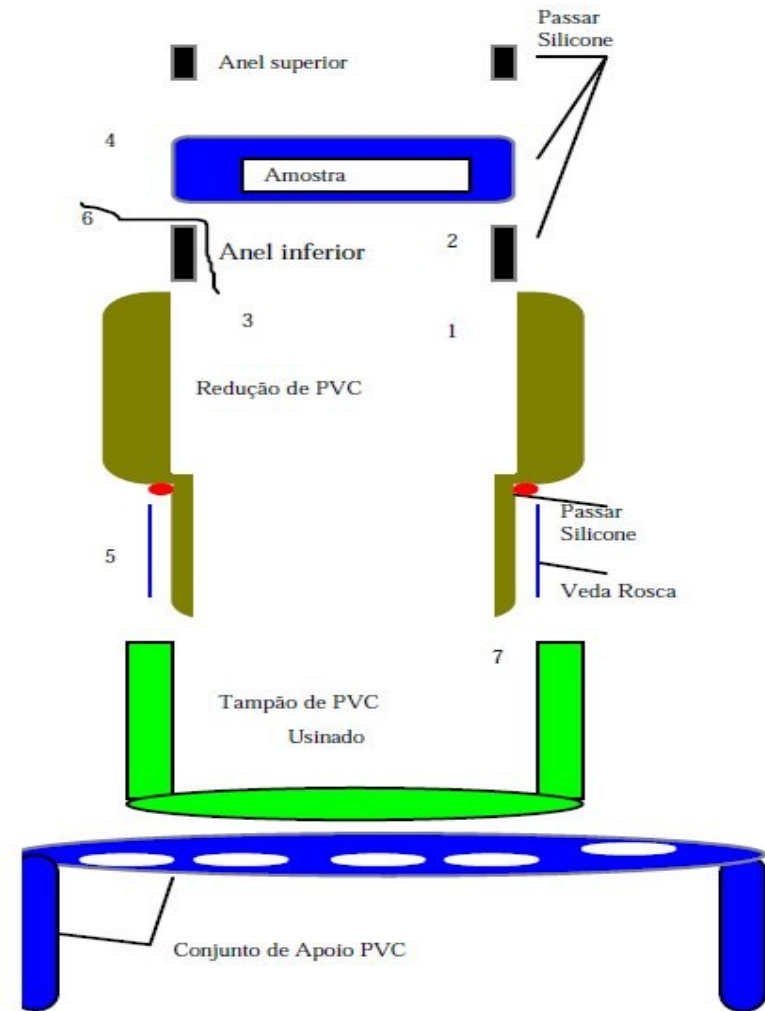
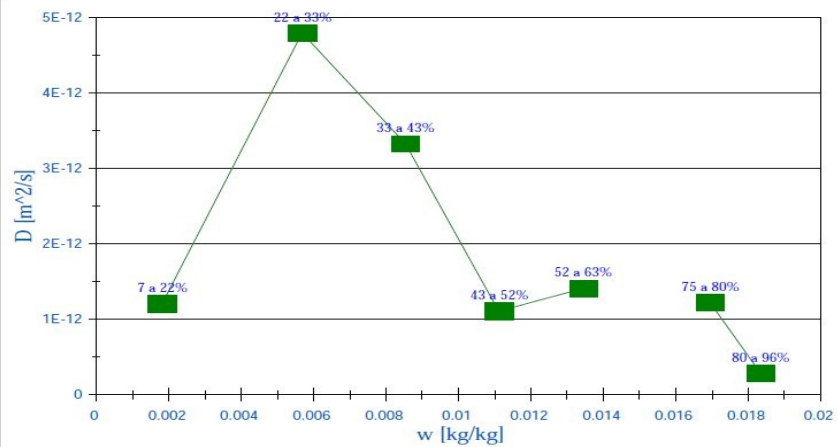
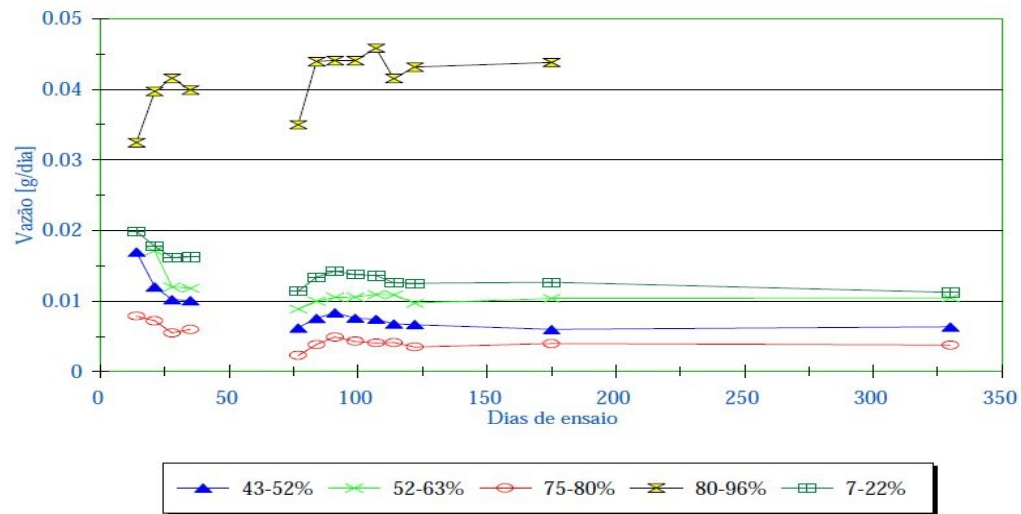
# Resultados

Não toque:  
Ensaio de Difusividade.

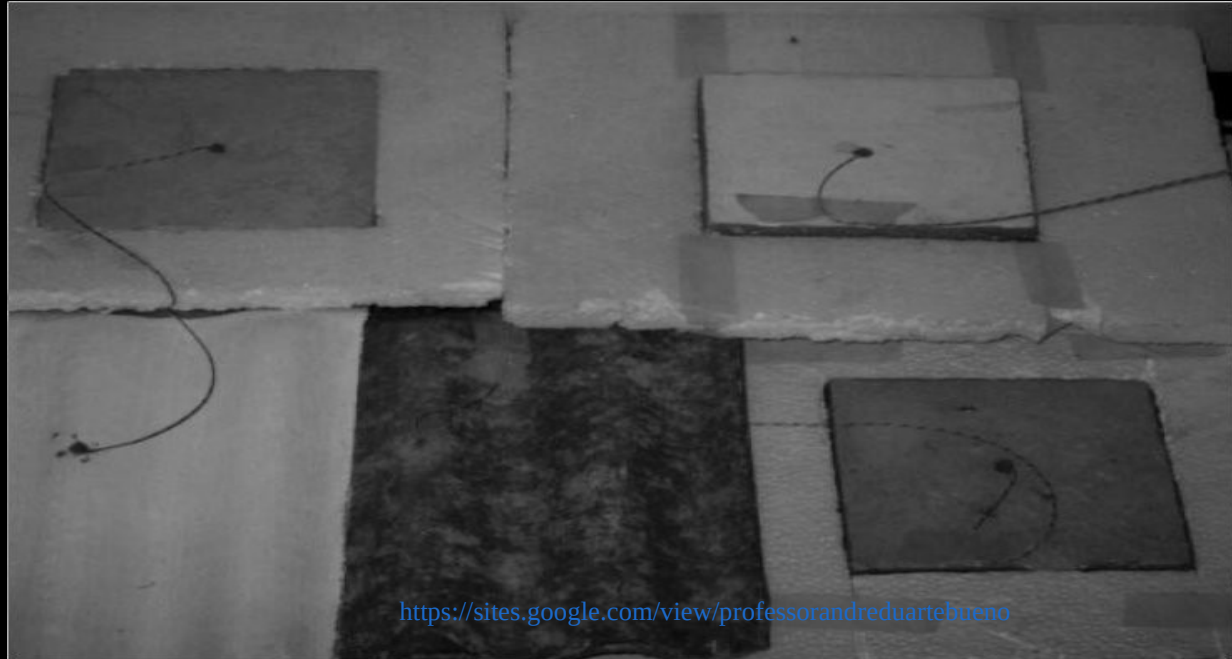
(um pequeno movimento pode contaminar as amostras)



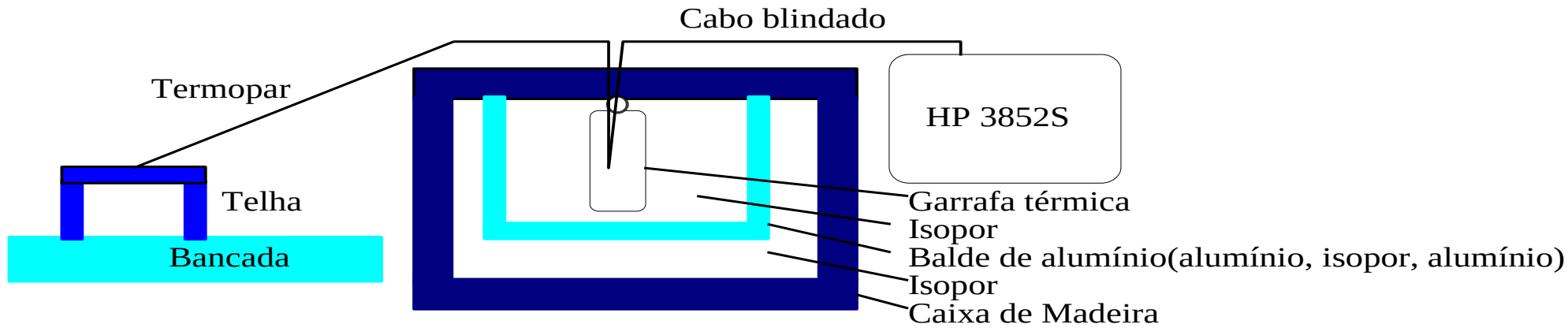




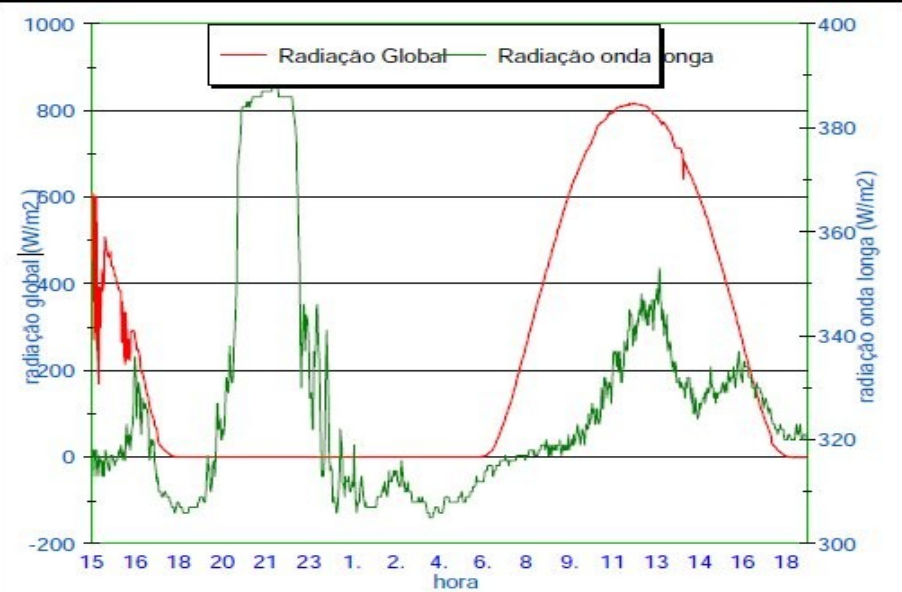
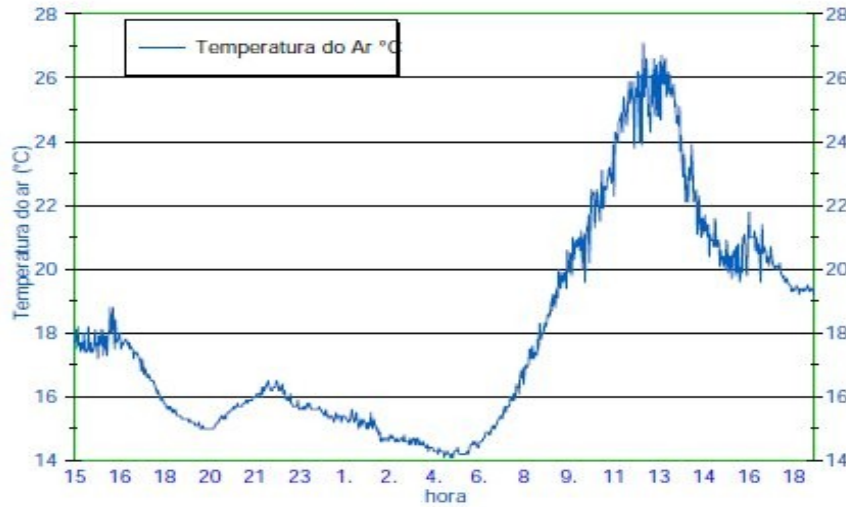
# Resultados



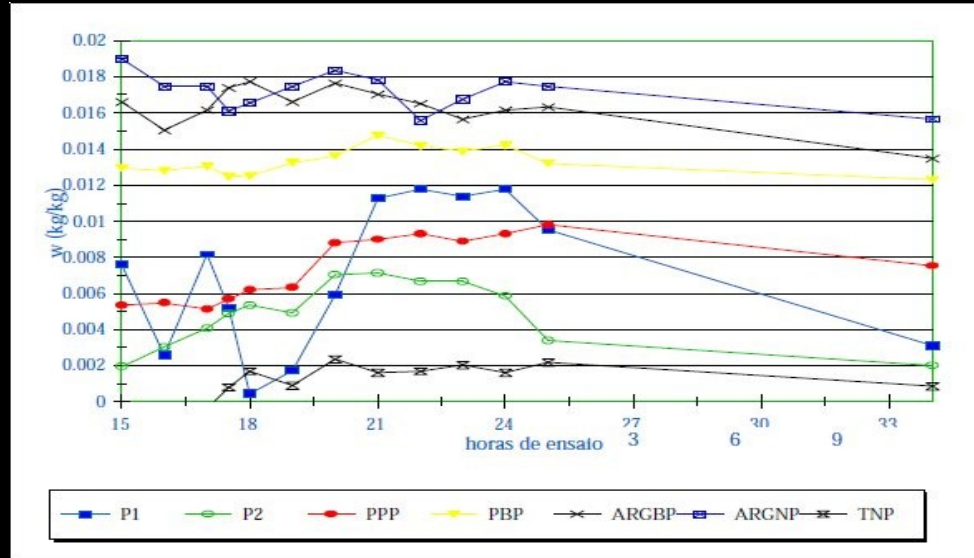
# Resultados



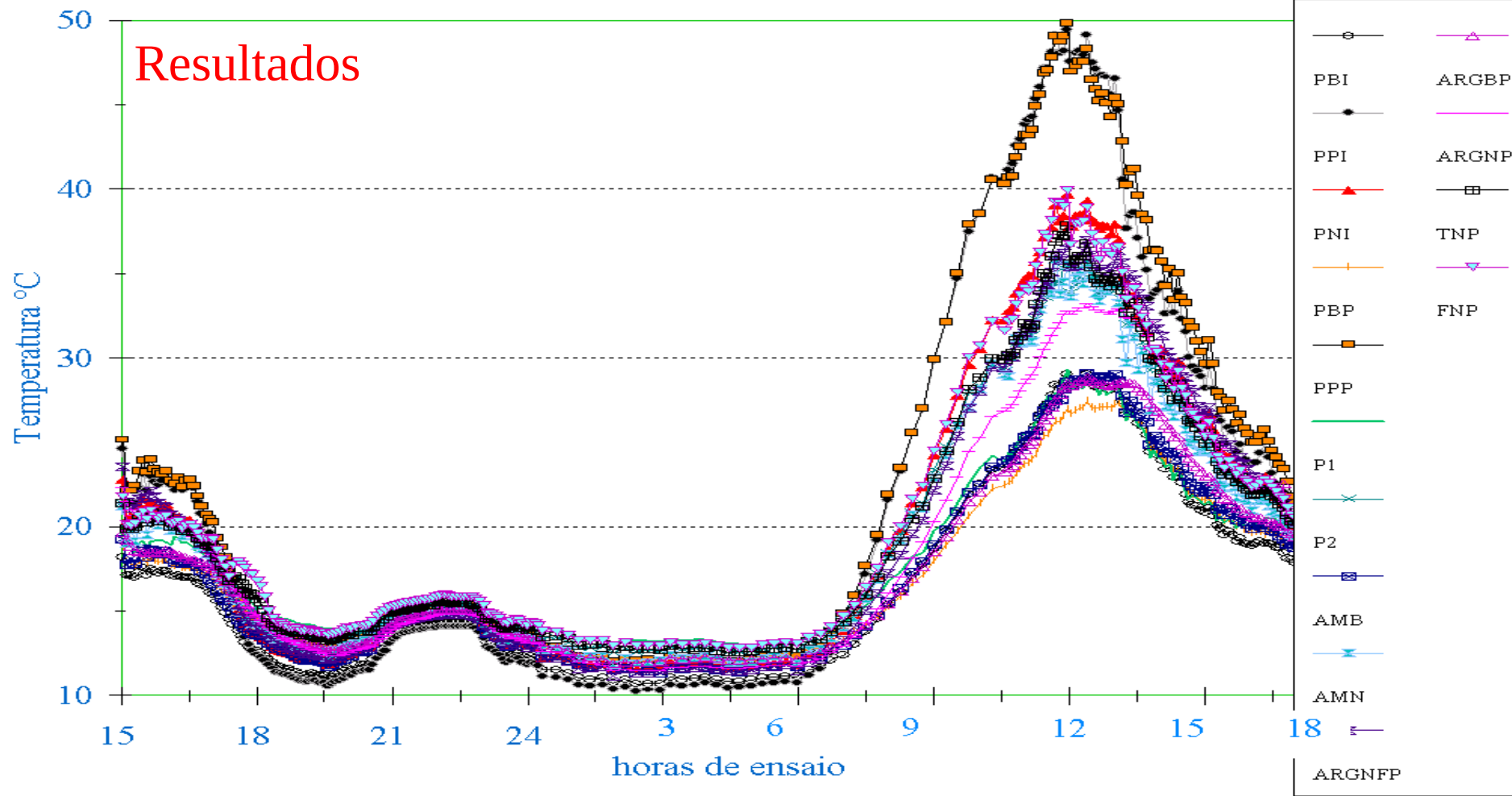
# Resultados



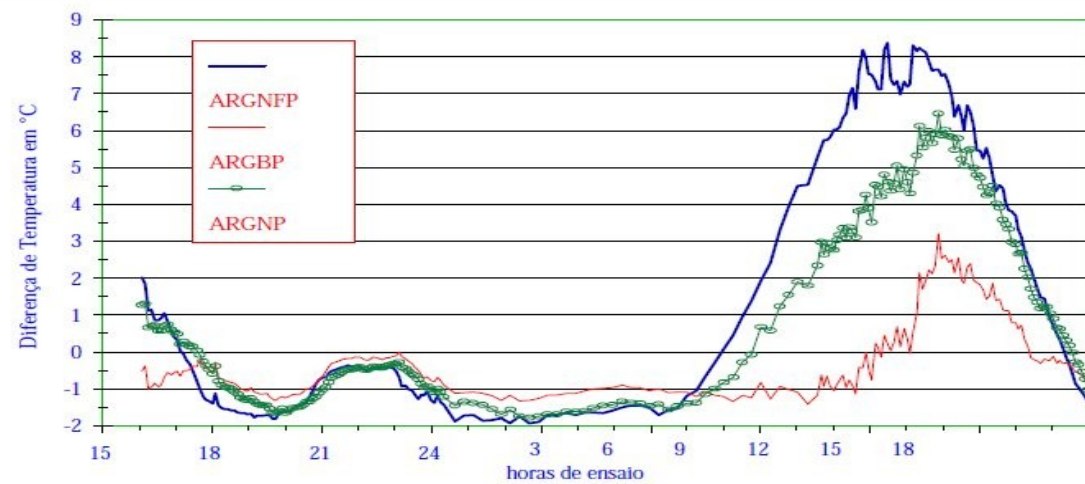
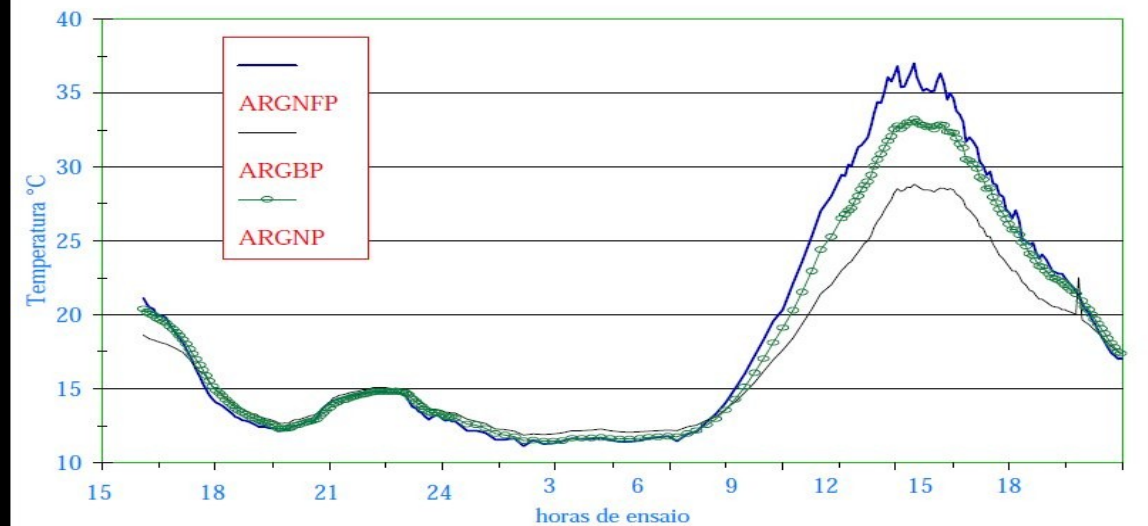
# Resultados



# Resultados

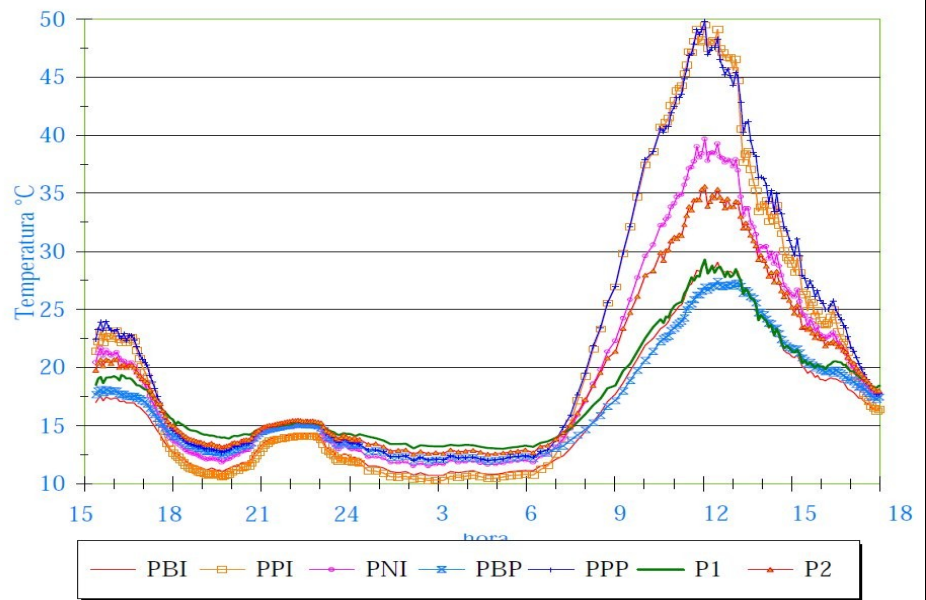
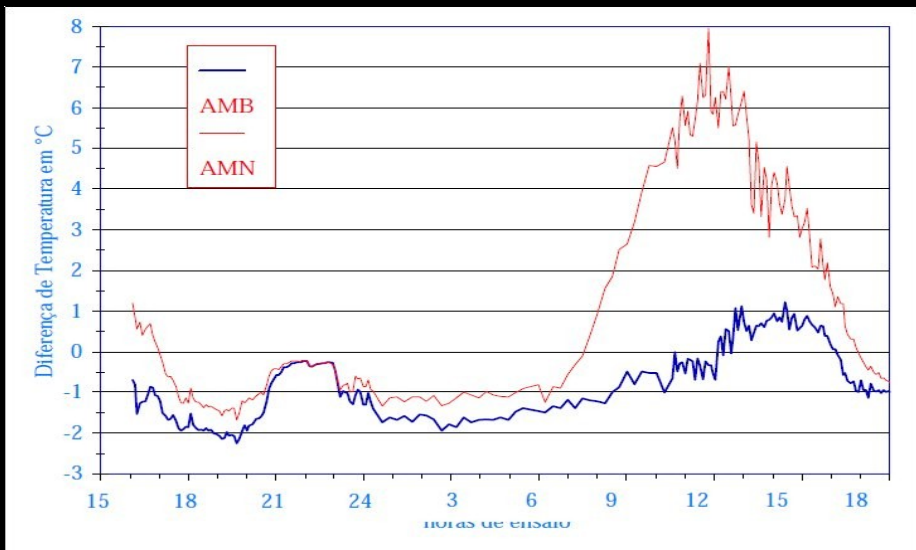
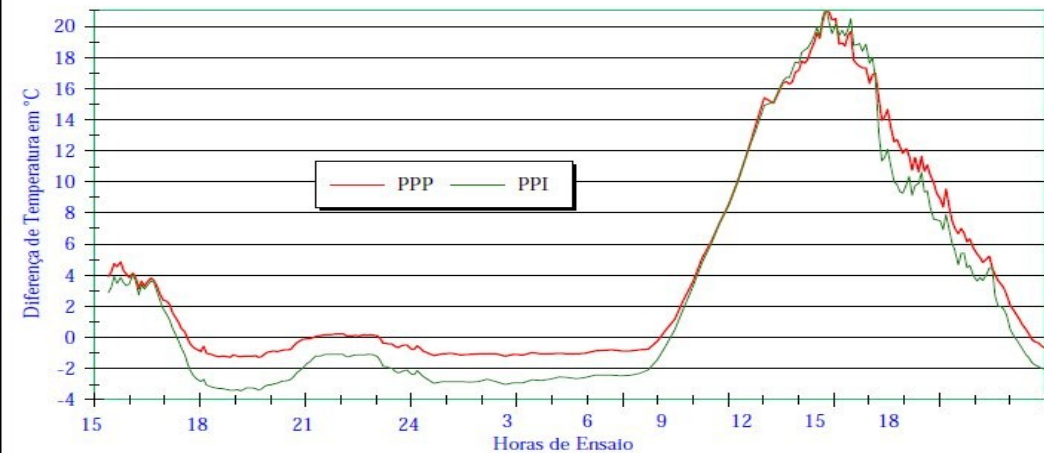


# Resultados

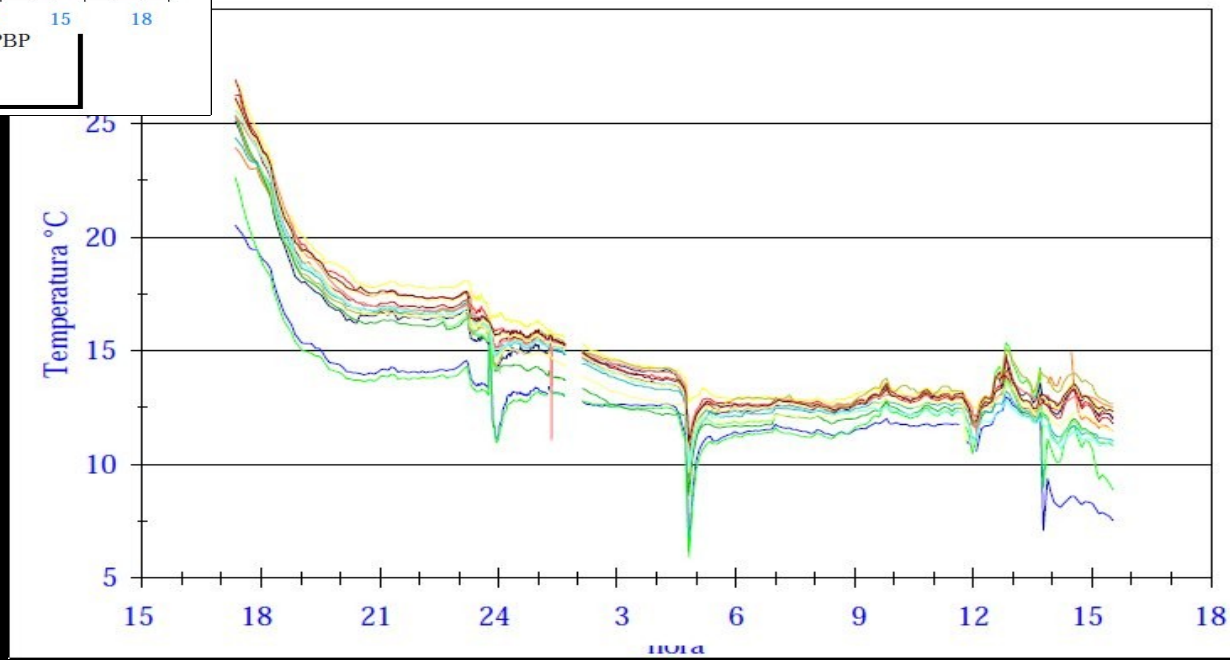
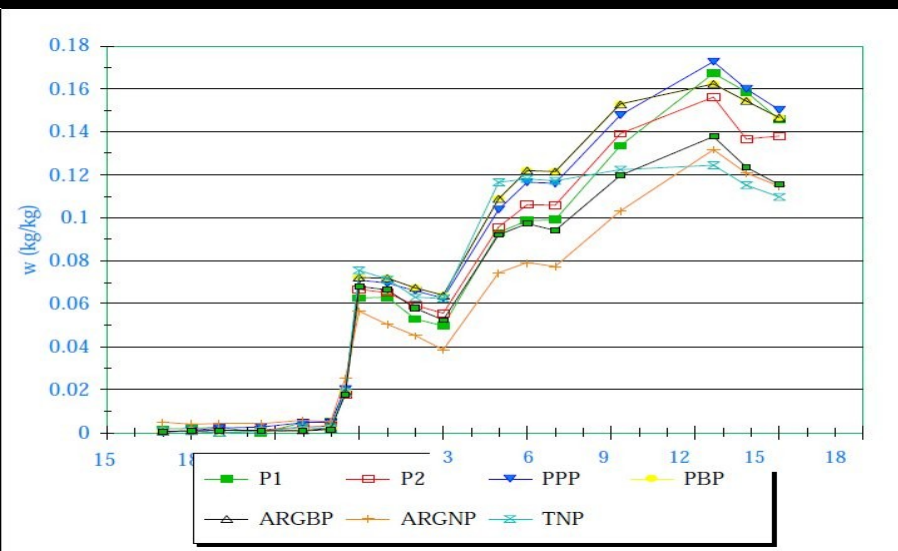




# Resultados



# Resultados



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla(D_{\theta} \cdot \nabla \theta) + \nabla(D_T \cdot \nabla T)$$

## Resultados

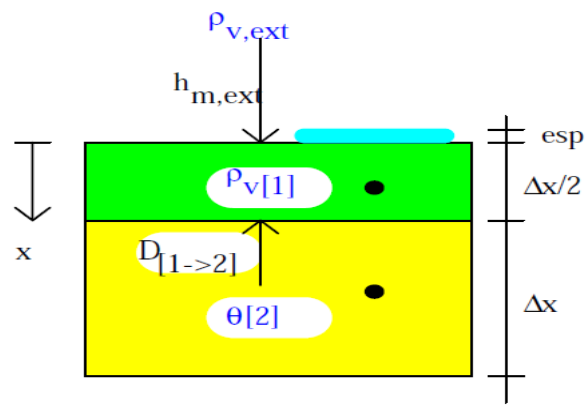
$$\rho_{t,sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w) \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) - l_v \cdot \nabla(D_{\theta,v} \nabla \theta)$$

$\lambda$	Condutividade térmica aparente do material	[W/m.°C ]
$\rho_{t,sec}$	Densidade volumétrica do material seco	[kg/m³]
$c_t$	Calor específico do material	[J/kg.°C ]
$c_l$	Calor específico da água	[J/kg.°C ]
$t$	Tempo	[s]
$T$	Temperatura do material	[°C ].
$\theta$	Conteúdo volumétrico de umidade	[m³/m³]
$w$	Conteúdo mássico de umidade	[kg/kg]
$D_{\theta}$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade	[m²/s]
$D_T$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de temperatura	[m²/s]
$D_{\theta,v}$	Coeficiente de transporte de massa associado a um gradiente de conteúdo de umidade na fase vapor	[m²/s]
$l_v$	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]

$$a_t \cdot X_t = b_t \cdot X_{t+1} + c_t \cdot X_{t-1} + d$$

$$P_t = \frac{b_t}{a_t - c_t \cdot P_{t-1}}$$

$$Q_t = \frac{c_t \cdot Q_{t-1} + d_t}{a_t - c_t \cdot P_{t-1}}$$



$$P_v \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$$h = \frac{P_v}{P_{v,sat}}$$

$$\rho_{v,ext} = \frac{h_{ext} \cdot P_{v,sat} \cdot M}{R \cdot T_{ext}}$$

$$\frac{dp_{v,sat}}{dT} = \frac{H_v - H_l}{T(V_v - V_l)}$$

Eq. de Clapeyron-Clausius

$$h_{m,ext} \cdot (\rho_{v,ext} - \rho_{v,1}^0) + \frac{\rho_l \cdot D_{1 \rightarrow 2}^0 \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{\Delta x} = \rho_l \cdot \frac{\Delta x}{2} \cdot \frac{(\theta_1 - \theta_1^0)}{\Delta t} \quad \text{para } \theta_1 < \theta_{sat}$$

$$h_{m,ext} \cdot (\rho_{v,ext} - \rho_{v,sat}^0) + \frac{\rho_l \cdot D_{1 \rightarrow 2}^0 \cdot (\theta_2 - \theta_{sat})}{\Delta x} = (esp - esp^0) \cdot \frac{\rho_l}{\Delta t} \quad \text{para } \theta_1 \geq \theta_{sat}$$

$$\text{Eq. Auxiliar:} \quad esp - esp^0 = (\theta_1 - \theta_{sat}) \cdot \frac{\Delta x}{2} \quad (4.10)$$

## Resultados

Para  $\theta_1 < \theta_{\text{sat}}$ .

$$a_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} + \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t}$$

$$b_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x}$$

$$c_1 = 0$$

$$d_1 = \frac{h_{m,\text{ext}} \cdot (\rho_{v,\text{ext}} - \rho_{v,1}^0)}{\rho_l} + \theta_1^0 \cdot \frac{\Delta x}{2 \cdot \Delta t}$$

Para  $\theta_1 \geq \theta_{\text{sat}}$

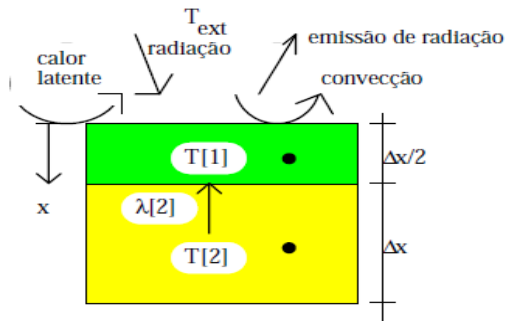
$$a_1 = \frac{1}{\Delta t} \quad (4.17)$$

$$b_1 = \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} \quad (4.18)$$

$$c_1 = 0 \quad (4.19)$$

$$d_1 = \frac{h_{m,\text{ext}} \cdot (\rho_{v,\text{ext}} - \rho_{v,1}^0)}{\rho_l} + \frac{\text{esp}^0}{\Delta t} - \theta_{\text{sat}} \frac{D_{1 \rightarrow 2}^0}{\Delta x} \quad (4.20)$$

# Resultados



O CIBSE [38] apresenta valores simplificados para o coeficiente de convecção externa e interna para em edificações.

$$h_{c, ext} = 16.7 \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad \text{para convecção externa.}$$

$$h_{c, int} = 9.1 \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad \text{para convecção interna.}$$

$$h_{c, ext} \cdot (T_{ext} - T_1) + \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + \lambda_{1 \rightarrow 2}^{*0} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} + l_v \cdot h_{m, ext} \cdot (\rho_{v, ext} - \rho_{v, 1}) = \left[ \rho_{t, sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} \right] \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$$

para  $\theta_l < \theta_{sat}$

$$h_{c, ext} \cdot (T_{ext} - T_1) + \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + \lambda_{1 \rightarrow 2}^{*0} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} + l_v \cdot \frac{\rho_l}{\Delta t} (esp - esp^0) = \left[ \rho_{t, sec} \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \rho_l \right] \frac{T_1 - T_1^0}{\Delta t}$$

para  $\theta_l > \theta_{sat}$

(4.21)



## Resultados

$$T_1 \cdot \left[ h_{c,ext} + \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \frac{[\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}]}{\Delta t} \right] =$$

$$T_2 \cdot \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + I_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\rho_{v,ext} - \rho_{v,1}^0) \quad \text{para } \theta_1 < \theta_{sat}$$

$$T_1 \cdot \left[ h_{c,ext} + \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \frac{[\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + (esp^0) \cdot c_l \cdot \rho_l]}{\Delta t} \right] =$$

$$T_2 \cdot \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \rho_l}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + I_v (esp - esp^0) \cdot \frac{\rho_l}{\Delta t}$$

$$\text{para } \theta_1 \geq \theta_{sat} \quad (4.22)$$

Para  $\theta_l < \theta_{sat}$

$$a_1 = h_{c,ext} + \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \frac{[\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}]}{\Delta t}$$

$$b_1 = \frac{\lambda_2^0}{\Delta x}$$

$$c_1 = 0$$

$$d_1 = \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2}}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + I_v \cdot h_{m,ext} \cdot (\rho_{v,ext} - \rho_{v,int}^0)$$

$$d_1 = \alpha \cdot R_{oc} + \varepsilon \cdot R_{ol} + h_{c,ext} \cdot T_{ext} + \left[ \frac{\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + esp^0 \cdot c_l \cdot \rho_l}{\Delta t} \right] \cdot T_1^0 + I_v (esp - esp^0) \frac{\rho_l}{\Delta t}$$

( 4.26 )

Para  $\theta_l \geq \theta_{sat}$

$$a_1 = h_{c,ext} + \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} + \frac{[\rho_t \cdot (c_t + c_l \cdot w_1^0) \frac{\Delta x}{2} + (esp^0) \cdot c_l \cdot \rho_l]}{\Delta t} \quad (4.23)$$

$$b_1 = \frac{\lambda_2^0}{\Delta x} \quad (4.24)$$

$$c_1 = 0 \quad (4.25)$$

## Resultados:

### Software SIMULAT

### Características:

- C++
- Interface texto e gráfica

Site: <https://github.com/ldsc/simulat>

```
Z:\home1\bueno\SIMUL~35\SIMUL~I$.EXE

Programa Elaborado por Andre Duarte Bueno

Mestrado Engenharia Civil

LABORATORIO LMPT

SIMULACAO DA TRANSFERENCIA DE CALOR E UMIDADE
EM TELHAS
Mestrado Engenharia Civil - NCC - LMPT - SITERPA

Para maiores informacoes leia os arquivos
explica.doc.....como rodar programa
balanco.doc.....explica o fenomeno fisico
variavel.doc.....variaveis usadas programa
readme.exe.....apresenta os documentos acima

Pressione uma tecla para continuar
```

```
Z:\home1\bueno\SIMUL~35\SIMUL~I$.EXE

Simulacao Transferencia Calor e Umidade em Telhas Cerâmicas
Valores definidos pelo usuario

rot=1730    rot=1000    ct=1000    cl=4187
hce=16.7    hci=9.1    hme=0.01386    hmi=0.0076
lv=2.257e+06    alfa=0.63    emis=1    larg=0.03
esp=0    ak=13.49    bk=0.743    porosidade=0.31
tp[1]=24.27    ti[1]=22.04    retardo=0    amortecimento=1
respempinterna=c    resphext=c    resphint=c    recorrencia=2
tint=25    hext=0.95    hint=0.75    wli=0.0134
Incio Sim=0.01667    Fim Sim=72    dtmax=60    dtmin=1

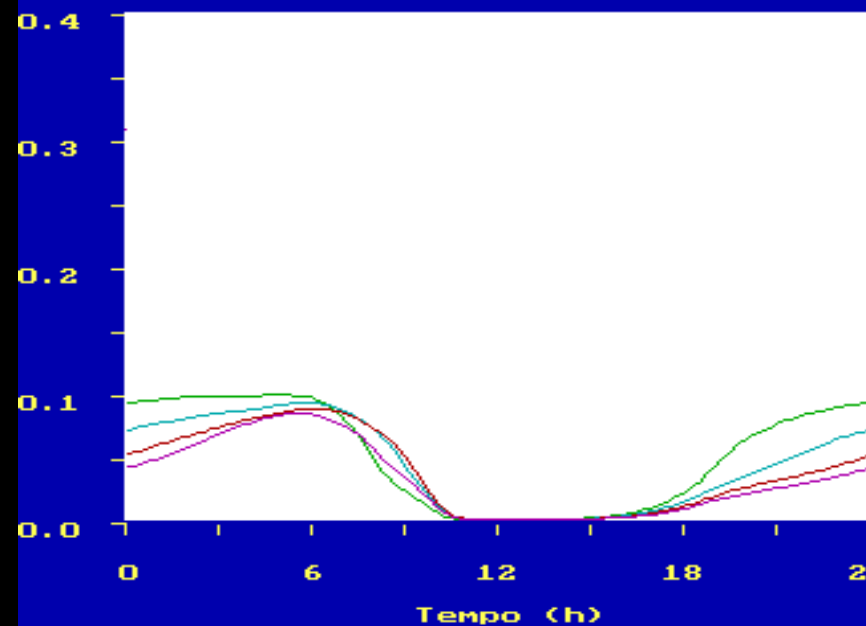
tiniciosaida=0    =    passosaida=600    =

OL[1]=0.31    OL[2]=0.31    OL[3]=0.31    OL[4]=0.31    OL[5]=0.31
OL[6]=0.31    OL[7]=0.31    OL[8]=0.31    OL[9]=0.31    OL[10]=0.31
tp[1]=24.27    tp[2]=24.27    tp[3]=24.27    tp[4]=24.27    tp[5]=24.27
tp[6]=24.27    tp[7]=24.27    tp[8]=24.27    tp[9]=24.27    tp[10]=24.27
ti[1]=22.04    ti[2]=22.04    ti[3]=22.04    ti[4]=22.04    ti[5]=22.04
ti[6]=22.04    ti[7]=22.04    ti[8]=22.04    ti[9]=22.04    ti[10]=22.04

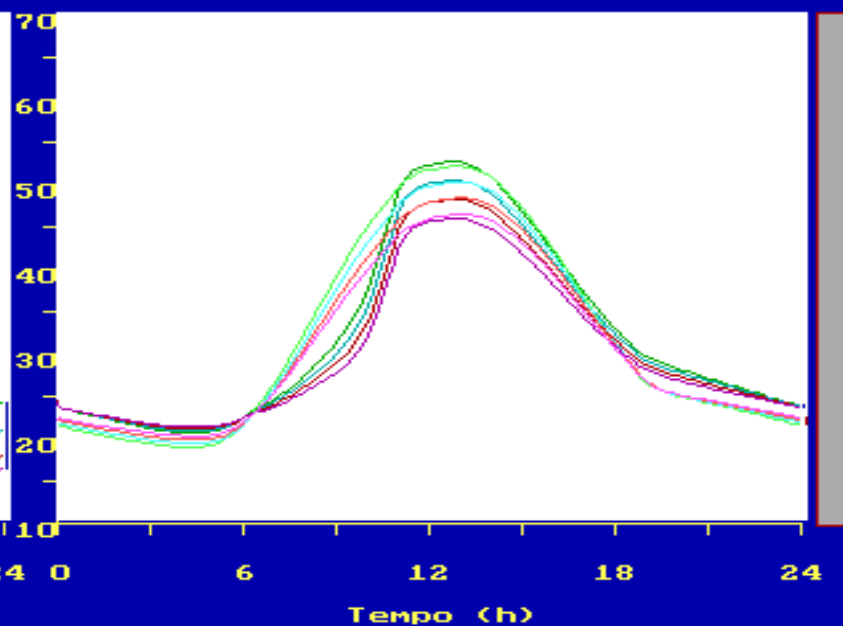
Deseja fazer alguma alteracao (s) caso contrario (n):
```

Simulacao Transferência de Calor e Umidade em Telhas Cerâmicas

Evolucao Conteudo Massa Volumetrico



Evolucao Temperaturas

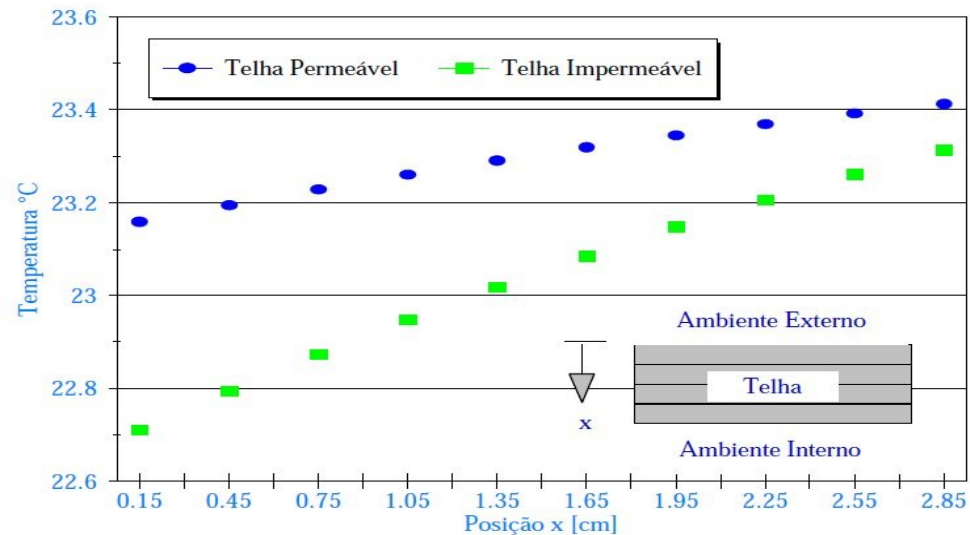


olm medio	tempo

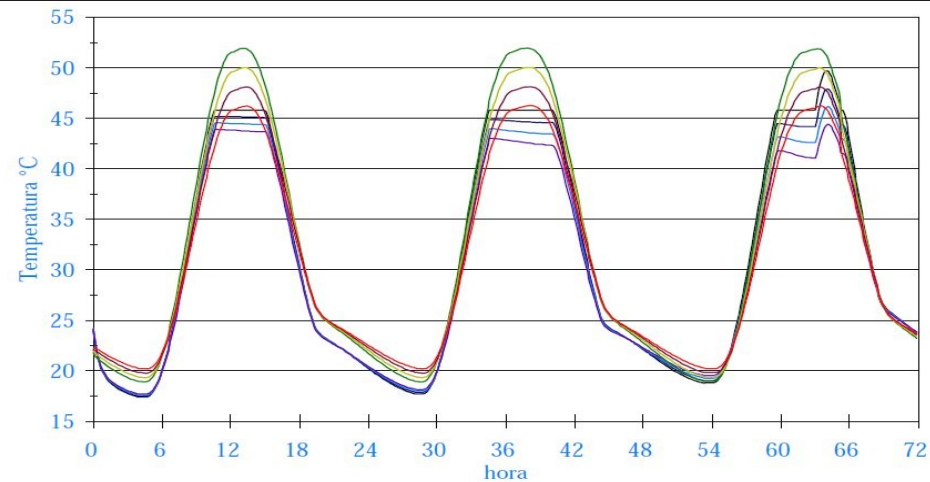
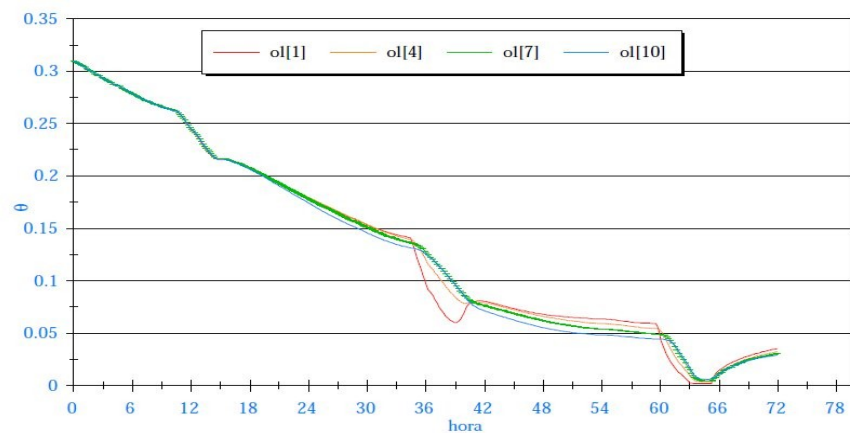
tpm media	tim media



acabou a simulacao- pressione uma tecla para continuar

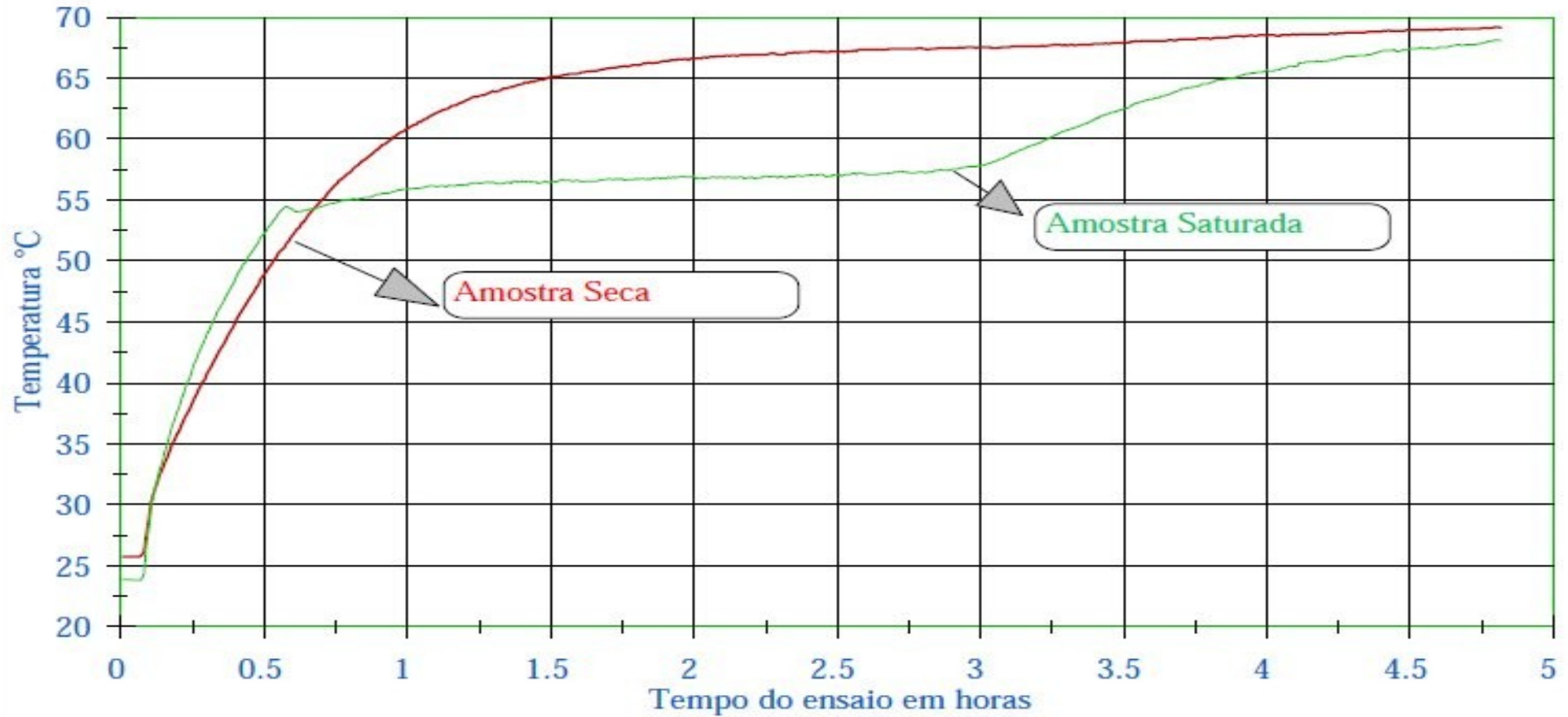


## Resultados: Simulações

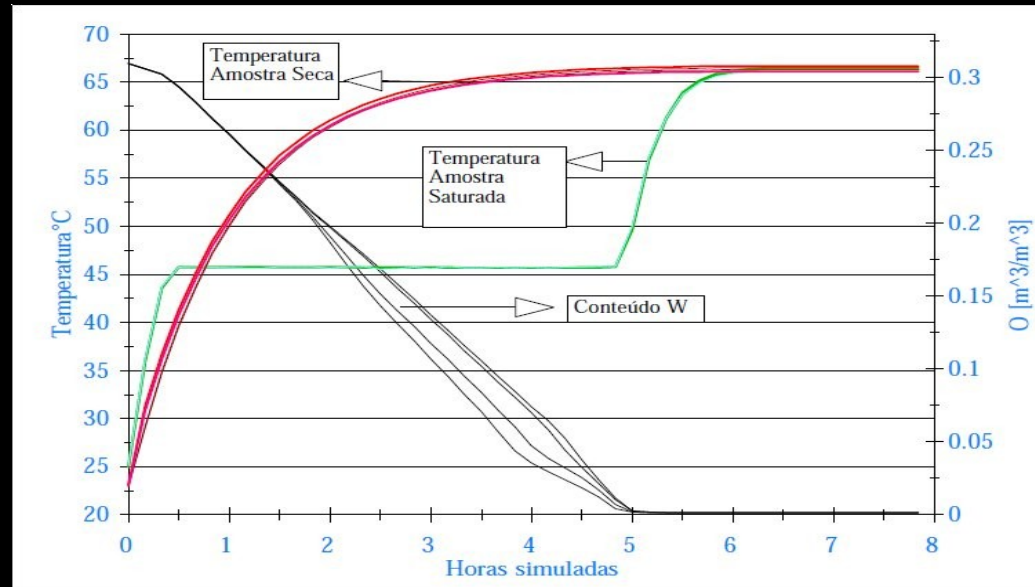
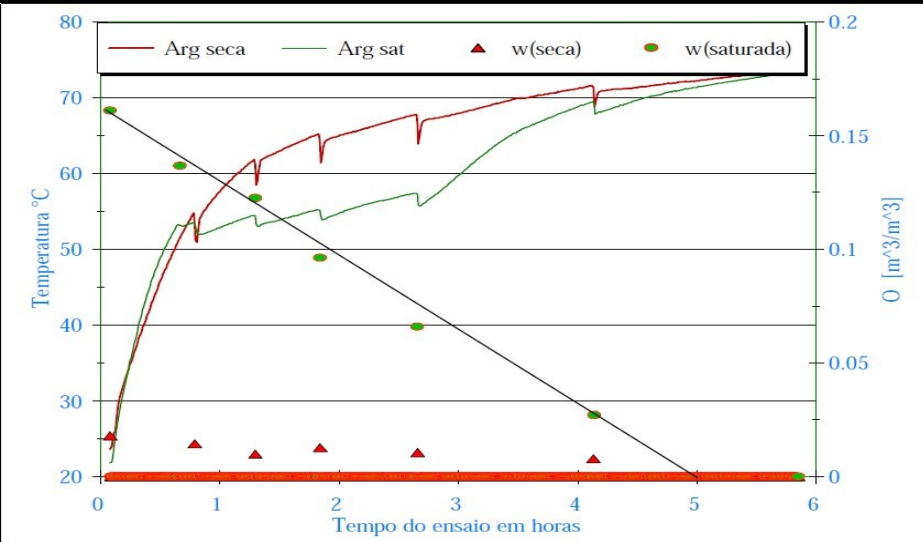


— tp[1] — tp[4] — tp[7] — tp[10] — ti[1] — ti[4] — ti[7] — ti[10]

## Resultados: Ensaios x Software - SIMULAT



## Resultados: Ensaios x Software - SIMULAT







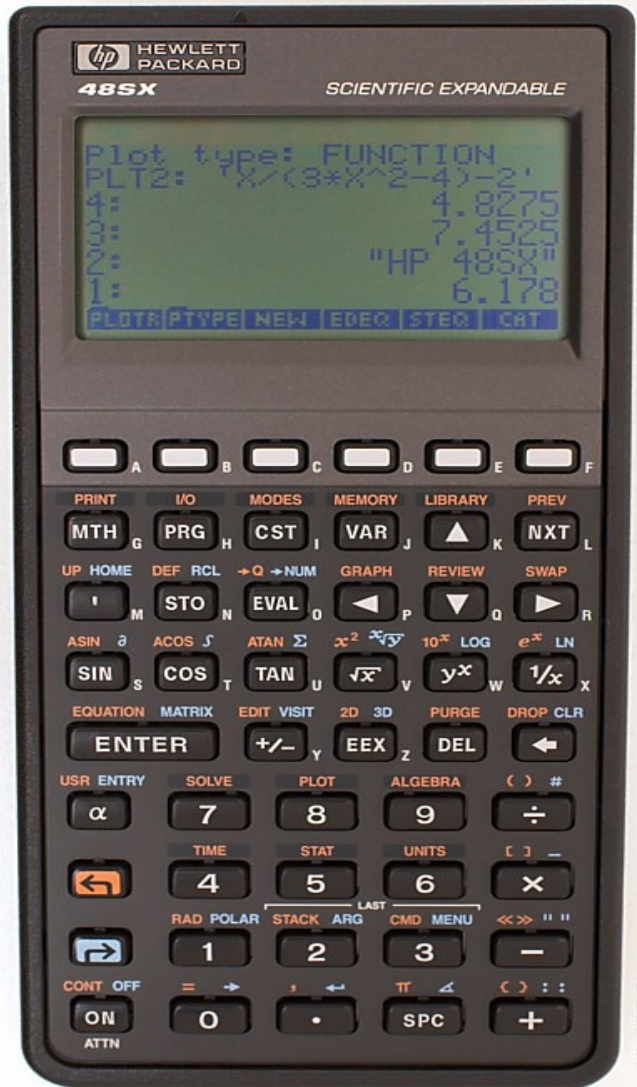


PROPOSTA DE ZONA DE CONFORTO NA CARTA PSICOMÉTRICA

André Duarte Bueno, Roberto Lamberts.  
Grupo de Análise Térmica de Edificações  
Núcleo de Pesquisa em Construção Civil  
Universidade Federal de Santa Catarina



Artigo





## CONTATO

Professor André Duarte Bueno  
andreduartebruno@gmail.com

<https://sites.google.com/view/professorandreduartebruno>