

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Secagem Convectiva de Sólidos em Secador Tipo Túnel: Modelagem e Simulação**

**Autor: Francisca Valdeiza de Souza Tavares  
Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Campina Grande, Agosto de 2013  
PB–Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

# **Secagem Convectiva de Sólidos em Secador Tipo Túnel: Modelagem e Simulação**

**Autor: Francisca Valdeiza de Souza Tavares  
Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Curso: Engenharia Mecânica  
Área de Concentração: Fenômenos de Transporte e Energia

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campina Grande, Agosto de 2013  
PB – Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

T231s      Tavares, Francisca Valdeiza de Souza.  
              Secagem convectiva de sólidos em secador tipo túnel: modelagem e  
              simulação / Francisca Valdeiza de Souza. – 2013.  
              119 f. : il. Color.

              Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade  
              Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

              "Orientação: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima".  
              Referências.

              1. Secagem. 2. Fluxos Cruzados. 3. Volumes Finitos. 4. Tijolos  
              Vazados. I. Lima, Antonio Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 66.047(043)

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

---

**“SECAGEM CONVECTIVA DE SÓLIDOS EM SECADOR TIPO TÚNEL:  
MODELAGEM E SIMULAÇÃO”.**

**FRANCISCA VALDEIZA DE SOUZA TAVARES**

Dissertação Aprovada em 29/08/2013 pela banca examinadora constituída dos  
seguintes membros:



---

**Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima**

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Celso Rosendo Bezerra Filho**

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



---

**Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira**

Examinador Externo

CCTS/UEPB

---

Campina Grande, Agosto de 2013.  
PB, Brasil

## **DEDICATÓRIA**

Primeiro e especialmente a minha querida e amada mãe, Maria Alaide Tavares de Oliveira que sempre me deu apoio e amor incondicional, e nunca mediu esforços para que eu chegasse até aqui. Ao meu pai, que tanto amo, Vicente de Sousa Oliveira Sobrinho, que até em situações adversas sempre acreditou em mim. Aos meus irmãos, José Valterdan de Souza Oliveira e José Valdiram de Souza Oliveira pelo incentivo, amizade e tudo que me fizeram ser ao longo da vida. Vocês são minha base.

Ao meu namorado e companheiro nesta caminhada, Wesder Carlos Fernandes que desde o início me apoiou e nunca mediu esforços ao longo da realização deste. E que apesar da distância sempre se fez compreensivo e presente.

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS, por me dar forças e fortalecer a minha fé em todos os momentos, especialmente naqueles mais turbulentos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de estudo, visando com isso melhorar o nível tecnológico do grupo de engenheiros que estão ao nível de graduação.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela orientação, dedicação e ensinamentos dirigidos a este mestrado, o que me motivou e serviu de exemplo para a realização deste.

Ao colega Prof. Dr. Enivaldo Barbosa pela sua valiosa contribuição para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica desta instituição (UFCG), especialmente ao Prof. Dr. Celso Rosendo por todos os ensinamentos e paciência comigo durante a realização deste.

Aos meus colegas de mestrado pela orientação imediata durante o desenvolvimento deste trabalho e pelos momentos de descontração. Em especial ao pessoal do LCTF e ao amigo Samuell Holanda.

Aos meus pais (Vicente e Alaide), irmãos (Valterdan e Valdiram) e toda a minha família, pelo apoio, confiança, incentivo e por todo amor dirigido a mim.

Ao meu amado Wesder, pela confiança, apoio e incentivo em todos os momentos desta caminhada.

*“(...) devotamento, tolerância, espírito de equipe, senso da cooperação contribuem de modo singular para seu sucesso.”*

*Albert Einstein*

## SUMÁRIO

1 Introdução .....	1
2 Revisão da Literatura .....	4
2.1 Cerâmica .....	4
2.1.1 Histórico .....	4
2.1.2 Conceito de cerâmica .....	6
2.1.3 Classificação do setor .....	6
2.2 Argila .....	7
2.2.1 Argila para a produção de cerâmica vermelha .....	8
2.3 Tijolos .....	9
2.3.1 Processo produtivo .....	10
2.4 O processo de Secagem .....	11
2.5 Secadores tipo túnel .....	13
2.6 Modelos Matemáticos .....	13
2.6.1 Camada fina .....	14
2.6.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos .....	14
2.6.1.2 Modelos difusivos .....	16
2.6.2 Camada espessa .....	17
2.6.2.1 Modelo da Universidade Estadual de Michigan .....	17
2.7 Processo de secagem da argila .....	25
2.7.1 Fases do processo de secagem .....	26
2.7.2 Retração .....	28
2.7.3 Fissuras e descoloração .....	30
3 Modelagem Teórica .....	32
3.1 Caracterização do problema .....	32
3.2 Caracterização do secador .....	33



3.3 Modelagem Matemática .....	37
3.4 Solução numérica do modelo proposto .....	45
3.5 Simulação da condensação da água .....	49
3.6 Casos estudados .....	51
4 Resultados e Discussões .....	52
5 Conclusões e Sugestões .....	77
5.1 Conclusões .....	77
5.2 Sugestões para futuros trabalhos .....	78
Referências Bibliográficas .....	79
Anexos .....	87

## RESUMO

TAVARES, Francisca Valdeiza de Souza, *Secagem Convectiva de Sólidos em Secador Tipo Túnel: Modelagem e Simulação*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado).

O presente trabalho tem por objetivo estudar teoricamente a secagem de tijolos cerâmicos vazados em secador de fluxos-cruzados tipo túnel. Foi proposto uma modelagem matemática baseando-se nos balanços de massa e energia, escritos para um volume diferencial localizado numa posição arbitrária da camada de sólido. Para obter a solução numérica das equações governantes, utilizou-se o método dos volumes finitos numa formulação explícita e o esquema “upwind” como função de interpolação para os termos convectivos. A metodologia foi usada para descrever o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados com dimensões industriais, em diferentes condições operacionais. Resultados do teor de umidade e temperatura do produto, umidade absoluta, umidade relativa e temperatura do ar ao longo do leito, em diversos tempos de processo são apresentados, analisados e comparados com dados experimentais reportados na literatura, obtendo-se uma boa concordância. Verificou-se que secagem a temperaturas e umidades relativas moderadas gera produto de boa qualidade pós-secagem.

*Palavras chaves:*

Secagem, Fluxos cruzados, Volumes finitos, Tijolos vazados.

## ABSTRACT

TAVARES, Francisca Valdeiza de Souza, *Convective Drying of Solids in a Tunnel Dryer: Modeling and Simulation*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado).

The present work aims to study theoretically the drying of holed ceramic bricks in a cross-flow tunnel dryer. It was proposed a mathematical model based on mass and energy balances, written for a differential volume located in an arbitrary position of the solid layer. For the numerical solution of the governing equations, the finite volume method in an explicit formulation with the "upwind" squema as interpolation function for the convective terms was used. The methodology was employed to describe the drying of hollow ceramic bricks with industrial dimensions in different operating conditions. Results of the moisture content and temperature of the product, and absolute humidity, relative humidity and temperature of the air along the bed at different times of the process are presented, analyzed and compared with experimental data reported in the literature. A good agreement was obtained. Results show that drying process at moderate temperatures and relative humidities produces good quality products.

Keywords:

Drying, Crossflow, Finite-volume, Holed brick.

## LISTA DE FIGURA

Figura 2.1	Maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos	5
Figura 2.2	Amostras de argilas	8
Figura 2.3	Argila de várzea	9
Figura 2.4	Argila de morro	9
Figura 2.5	Fluxograma do processo de fabricação de tijolos	10
Figura 2.6	Volume elementar de uma camada do produto	19
Figura 2.7	Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood	28
Figura 2.8	Visão esquemática de uma massa de argila - água em diferentes estágios da secagem	29
Figura 2.9	Variação da retração em função da água de conformação	29
Figura 3.1	Vagonetas usadas na secagem no secador industrial	34
Figura 3.2	Vista externa do secador industrial	34
Figura 3.3	Vista esquemática do secador industrial	35
Figura 3.4	Vista angular da vagoneta	36
Figura 3.5	Vista superior e frontal das vagonetas	36
Figura 3.6	Vistas frontal e lateral da vagoneta	37
Figura 3.7	Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado	38
Figura 3.8	Volume infinitesimal de sólido na camada	38
Figura 3.9	Esquema do tijolo utilizado nos experimentos	42
Figura 3.10	Esquema das condições iniciais e de contorno no secador	45
Figura 3.11	Esquema numérico e o volume de controle utilizado	45
Figura 3.12	Malha com 20 pontos nodais	49
Figura 4.1	Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) do teor de umidade de tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	53
Figura 4.2	Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) da temperatura do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	54
Figura 4.3	Teor de umidade do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	55
Figura 4.4	Temperatura do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).	56
Figura 4.5	Umidade relativa do ar na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).	56

	= H) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).	
Figura 4.6	Razão de umidade do ar na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).	57
Figura 4.7	Pressão de vapor saturado na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).	57
Figura 4.8	Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t=0$ ) à temperatura constante de $50^{\circ}\text{C}$ na estufa. a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	58
Figura 4.9	Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 260$ minutos) na temperatura constante de $50^{\circ}\text{C}$ na estufa ( $\theta_{\text{tij}} = 33,6^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{amb.}} = 26,4^{\circ}\text{C}$ , $\text{UR}_{\text{amb.}} = 74\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	58
Figura 4.10	Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	60
Figura 4.11	Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	60
Figura 4.12	Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	61
Figura 4.13	Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	61
Figura 4.14	Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	62
Figura 4.15	Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).	62
Figura 4.16	Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) do teor de umidade do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	63
Figura 4.17	Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) da temperatura do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	64
Figura 4.18	Teor de umidade do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	65
Figura 4.19	Temperatura do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4. cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.	66
Figura 4.20	Umidade relativa do ar na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um	67

	secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	
Figura 4.21	Umidade absoluta do ar na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	68
Figura 4.22	Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t = 0$ ) à temperatura constante de $60^{\circ}\text{C}$ . a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	69
Figura 4.23	Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 290$ minutos) na temperatura constante de $60^{\circ}\text{C}$ na estufa ( $\theta_{\text{tij}} = 42,6,3^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$ , $\text{UR}_{\text{amb.}} = 77\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	69
Figura 4.24	Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	71
Figura 4.25	Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	72
Figura 4.26	Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	73
Figura 4.27	Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	74
Figura 4.28	Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.	75
Figura 4.29	Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t = 0$ ) à temperatura constante de $80^{\circ}\text{C}$ na estufa. a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	76
Figura 4.30	Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 40$ minutos) na temperatura constante de $80^{\circ}\text{C}$ na estufa ( $\theta_{\text{tij}} = 37,1^{\circ}\text{C}$ , $T_{\text{amb.}} = 26,9^{\circ}\text{C}$ , $\text{UR}_{\text{amb.}} = 58\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).	76

## **LISTA DE TABELA**

Tabela 2.1	Tipos e caracterização da cerâmica vermelha	7
Tabela 3.1	Condições do ar de secagem e do produto na entrada do secador para quatro casos estudados	51
Tabela 3.2	Parâmetros da Equação 3.9	51

## NOMENCLATURA

### *Letras Latinas*

$A_c$	Área de contato	$[m^2]$
$Bi$	Número de Biot de transferência	$[-]$
$Bi_c$	Número de Biot de transferência de calor	$[-]$
$Bi_m$	Número de Biot de transferência de massa	$[-]$
$c_a$	Calor específico do ar	$[J/kgK]$
$c_p$	Calor específico do produto	$[J/kgK]$
$c_v$	Calor específico do vapor	$[J/kgK]$
$c_w$	Calor específico para aquecer a água no ambiente	$[J/kg]$
$D$	Difusividade de massa do sólido	$[m^2/s]$
$D_h$	Diâmetro hidráulico	$[mm]$
$dM/dt$	Taxa de difusão	$[kg/kg.s]$
$\partial M/\partial t$	Taxa de difusão	$[kg/kg.s]$
$dT/dt$	Taxa de variação de temperatura do produto	$[^{\circ}C/min]$
$exp$	Exponencial	$[-]$
$f_1, f_2, f_3, f_4$	Equação da camada fina apropriada	$[-]$
$Fo_m$	Número de Fourier de massa	$[-]$
$h_{ai}$	Entalpia inicial do ar	$[J/kg]$
$h_{af}$	Entalpia final do ar	$[J/kg]$
$h_{ao}$	Entalpia na entrada do aquecedor	$[J/kg]$
$h_{as}$	Entalpia específica do ar seco	$[J/kg]$
$h_{at}$	Entalpia específica num tempo $t$	$[J/kg]$
$h_{\infty}$	Entalpia específica do ambiente	$[J/kg]$
$h_c$	Coefficiente de transferência de calor por convecção	$[W/m^2/K]$
$h_{fg}$	Calor latente de vaporização de água livre	$[J/kg]$
$h_m$	Coefficiente de transferência de massa	$[m/s]$
$m_p$	Massa do produto	$[g]$
$M$	Teor de umidade do produto	$[kg/kg]$
$M_{\infty}$	Teor de umidade do meio externo	$[kg/kg]$
$\bar{M}$	Teor de umidade médio	$[kg/kg]$
$\bar{M}^*$	Teor de umidade médio adimensional	$[-]$
$\bar{M}_{ant}$	Teor de umidade médio anterior	$[kg/kg]$
$M_o$	Teor de umidade inicial do produto	$[kg/kg]$
$\bar{M}_o$	Teor de umidade médio inicial do produto	$[kg/kg]$
$M_e$	Teor de umidade de equilíbrio	$[kg/kg]$
$\bar{M}_e$	Teor de umidade médio de equilíbrio	$[kg/kg]$
$P$	Pressão	$[Pa]$



$P_{vs}$	Pressão do vapor saturado	[Pa]
$P_{atm}$	Pressão atmosférica	[Pa]
$Q$	Calor	[W]
$\dot{Q}_{conv}$	Fluxo de calor por convecção	[W]
$\dot{Q}_{rad}$	Fluxo de calor por radiação	[W]
$\dot{Q}_{ef}$	eficiência do fluxo de calor	[kJ/s]
$R$	Constante universal do ar	[J/kg°C]
$R_1$	Dimensão do sólido em relação ao comprimento	[mm]
$R_2$	Dimensão do sólido em relação à largura	[mm]
$R_3$	Dimensão do sólido em relação à altura	[mm]
$S$	Área superficial do sólido homogêneo	[m <sup>2</sup> ]
$T_{ai}$	Temperatura do ar na entrada	[°C]
$T_{af}$	Temperatura do ar na saída	[°C]
$T$	Temperatura do ar de secagem	[°C]
$T_{abs}$	Temperatura absoluta	[°C]
$T_{ref}$	Temperatura de referência	[°C]
$T_o$	Temperatura inicial do produto	[°C]
$T_{ao}$	Temperatura do ar na entrada do aquecedor	[°C]
$T_{\infty}$	Temperatura do meio externo	[K] ou [°C]
$t$	Tempo de secagem	[min]
$u_p$	Velocidade do produto	[m/s]
$UR$	Umidade relativa	[%]
$V$	Volume do sólido	[m <sup>3</sup> ]
$w$	Velocidade do ar	[m/s]
$\tilde{x}$	Razão de umidade absoluta	[kg/kg]
$\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3$	Razão de umidade absoluta em cada secção do secador	[kg/kg]
$x_{af}$	Umidade absoluta final	[kg/kg]
$x_{ai}$	Umidade absoluta do ar na entrada	[kg/kg]

### ***Letras gregas***

$\alpha$	Coefficiente de condutividade hidráulica	[-]
$\mu$	Viscosidade dinâmica da água	[-]
$\varepsilon$	Porosidade do produto	[-]
$\bar{\theta}_a$	Temperatura média do ar	[°C]
$\bar{\theta}_o$	Temperatura inicial do produto	[°C]
$\rho$	Densidade do sólido homogêneo	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_a$	Densidade do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Densidade do produto	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	Densidade relativa da substância seca	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\theta$	Temperatura do produto	[°C]
$\nabla$	Divergente	[-]

### ***Superescrito***

\* adimensional

***Subscrito***

ant	Anterior
a	Ar
c	Calor
conv	Convecção
e	Equilíbrio
M	Massa
o	Inicial
p	Produto
rad	Radiação
1, 2, 3	respectivas secções do secador
ent	Entrada
w	Água
v	Vapor

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

Ultimamente, no Brasil, vivencia-se um notável crescimento no setor de construção civil. Em 2010, o crescimento neste setor foi de 15,2% e a estimativa para 2013 é que o crescimento seja em torno de 3,5 a 4%, segundo o Sindicato da Indústria da Construção Civil do estado de São Paulo, SindusCon-SP (Luders, 2013). O setor de cerâmicos é de singular importância para economia do Brasil, e tem ganhado destaque. Os fatores que contribuem para este fato são vários, entre eles a abundância de matéria prima na natureza e as fontes de energia alternativa.

A distribuição de indústrias no país ainda é muito heterogênea, sendo a região sul e sudeste as que mais concentram essas atividades. Entretanto outras regiões do país têm ganhado certo destaque, a exemplo o nordeste, que possui uma grande quantidade de recursos minerais, abundância de gás natural, mercado em expansão e grande potencial para exportação (Silva, 2009). É válido salientar que, além das indústrias de cerâmica vermelha outras empresas do segmento têm sido implantadas e ganhado espaço no setor. Mas ainda há muito que se melhorar em relação ao setor cerâmico no nordeste. A estimativa era que já em 2010 essa região fosse um polo cerâmico e disputasse nacional e internacionalmente com o sul e sudeste (Voltolini, 2011). No entanto, necessita-se de muito mais investimentos, pesquisas e novas tecnologias para explorar o enorme potencial desta região.

Um item de singular importância no contexto deste cenário em ascensão é o tijolo cerâmico, muito utilizado nas mais diversas construções. O desenvolvimento de novas tecnologias para otimização do processo industrial nesta área tem sido objeto constante de estudos, pois apesar dos avanços nas últimas décadas, ainda existe muito a se fazer no tocante a otimização da produção do setor cerâmico no nordeste.

Os tijolos cerâmicos são peças bastante utilizadas pela indústria civil e o seu processo de fabricação compreende as diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias primas, homogeneização, secagem e queima. A secagem de tijolos é um processo termodinâmico de fundamental importância na fabricação de produtos cerâmicos, que consiste na perda de água do produto por evaporação (Silva, 2009). A etapa de secagem é de fundamental importância para a qualidade do produto final. Nela devem-se programar os parâmetros de secagem que melhor se adequa ao produto em questão, já que para cada produto há uma variação das condições do ar de secagem visando um menor tempo de processo e uma melhor qualidade.

Diante do que foi mencionado, visando contribuir com o avanço no âmbito tecnológico, este trabalho apresenta um estudo numérico da secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais em secador tipo túnel de fluxo cruzado. Assim sendo os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Propor uma modelagem matemática para descrever a secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador de fluxos cruzados tipo túnel e a solução numérica das equações governantes;
- Desenvolver um código computacional via volumes finitos, na plataforma Mathematica, para estudar o efeito das condições do ar sobre a qualidade do produto durante o processo de secagem;
- Simular a secagem em diversas condições operacionais;
- Simular a distribuição de temperatura e umidade do produto e temperatura e umidade absoluta do ar no secador, para cada condição de secagem;

- Avaliar a influência dos parâmetros de secagem: temperatura e umidade relativa do ar nas taxas de secagem e aquecimento do produto, bem como na sua qualidade pós-secagem;
- Comparar os resultados numéricos com dados experimentais reportados na literatura, da cinética de secagem de tijolos, para validar a metodologia matemática desenvolvida, e propor condições otimizadas do processo para este tipo de produto.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

#### **2.1 Cerâmica**

##### **2.1.1 Histórico**

Relatos históricos indicam que a atividade cerâmica era praticada por quase todos os povos da antiguidade. Na Grécia, em Roma e em outras regiões, a produção de cerâmica era vendida nas feiras, e havia uma exportação contínua de ânforas fenícias (vasos de forma geralmente ovóide e com alças) para todo o Mediterrâneo, em virtude da sua forma artística e da sua utilidade para servir água, vinho e azeite (Bellingieri, 2003 apud Silva, 2009).

Desde a pré-história o homem sentiu a necessidade de se defender dos predadores e até mesmo das condições da natureza. Era preciso adaptar-se ao habitat e utilizar-se de recursos naturais para sobreviver nele. Abrigar-se, era também um motivo de segurança. Ao longo da história o homem aperfeiçoou suas técnicas e descobriu novos materiais, entre eles a argila, o que posteriormente lhe permitiu a construção dos mais diversos objetos e templos.

No Brasil, o setor industrial de produção em cerâmica vermelha, também chamada cerâmica estrutural, teve origem no século XVI nos estados da Bahia e Pernambuco, espalhando-se até os dias de hoje, por todos os estados, nas suas mais diversas formas e

técnicas de fabricação (Tapia et al., 2000).

Objetos cerâmicos, tais como vasos, potes, telhas e tijolos, já eram produzidos no Brasil pelos indígenas e pelos colonizadores europeus, durante o período colonial e imperial. Tratava-se, entretanto, de uma produção artesanal. Foi a partir do final do século XIX que a cerâmica se organizou como “indústria”, em São Paulo, com o surgimento de olarias e fábricas de louças de barro, que produziam, em série, telhas, tijolos, ladrilhos, vasos, potes, manilhas, etc. Na década de 1910, surgiram as primeiras empresas de louças e porcelanas. E, a partir daí, a cerâmica diversificou-se e cresceu em importância dentro da economia paulista (Bellingieri, 2005).

No que diz respeito à tecnologia atual, a aplicabilidade da cerâmica vai muito além dos tijolos refratários e do uso na construção civil. Há aplicações aeroespaciais e de tecnologia de ponta, tais como blindagem térmica de ônibus espaciais, produção de nanofilmes, sensores para detectar gases tóxicos, varistores de redes elétricas e tantos outros.

Segundo Prado e Bressiani (2013), o Brasil atualmente é o segundo maior produtor de revestimentos e também o segundo maior mercado consumidor do mundo, ficando atrás apenas da China. Nos últimos anos o setor tem experimentado vigoroso crescimento ultrapassando produtores tradicionais como a Itália e a Espanha (Figura 2.1).

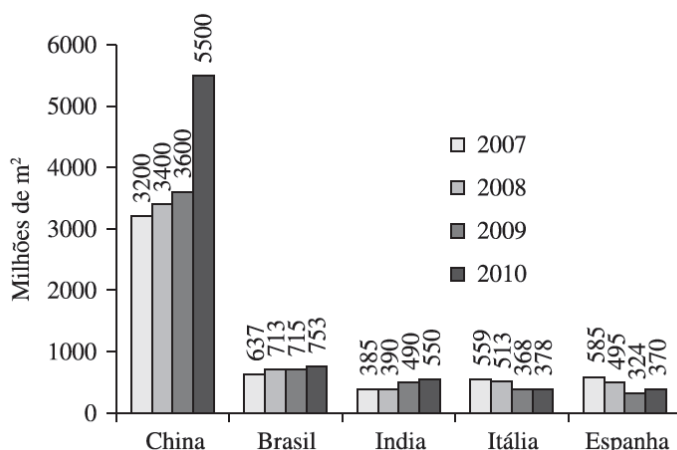


Figura 2.1-Maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos. Fonte: Prado e Bressiani (2013).

Esse expressivo crescimento do setor de revestimentos pode ser explicado pela forte ligação da indústria cerâmica e o setor da construção civil. Fatores tais como: o aumento de renda média da população, a maior facilidade de financiamento, os projetos governamentais de incentivo à construção civil e as obras de infraestrutura capitaneadas por mega eventos que ocorrerão proximamente como a Copa do Mundo de Futebol (2014) e as Olimpíadas (2016), foram determinantes no crescimento da construção civil e conseqüentemente na melhora do desempenho da indústria cerâmica (Prado e Bressiani, 2013).

### **2.1.2 Conceito de cerâmica**

A palavra cerâmica vem do grego κέραμος, que quer dizer matéria-prima queimada. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (Abeceram), cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

### **2.1.3 Classificação do setor**

O setor cerâmico por ser muito grande e heterogêneo é dividido em sub-setores em função de diversos fatores como matérias primas, propriedades e áreas de utilização. Assim sendo é mais fácil discernir entre um segmento e outro. Em geral, o setor é dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento (placas cerâmicas), cerâmica branca, materiais refratários, isolantes térmicos, fritas e corantes, abrasivos, vidro, cimento e cal, cerâmica de alta tecnologia/cerâmica avançada.

A indústria de cerâmica vermelha ou estrutural produz tijolos furados, tijolos maciços, tabelas ou lajes, blocos de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. Distribui-se por todo país, muito pulverizada, em micro e pequenas empresas, quase sempre de organização simples e familiar. Levantamentos mostram que existem 11.000 unidades produtivas, em uma média de 25 a 30 empregados, somando entre 250.000 a 300.000 empregos (Bustamante e Bressiani, 2000).

A Tabela 2.1 a seguir mostra mais detalhadamente a classificação dos produtos do setor de cerâmica vermelha ou estrutural.



Tabela 2.1 – Tipos e caracterização da cerâmica vermelha. Fonte: Silva (2009)

Tipos	Caracterização
Porosos	Tijolos maciços, tijolos maciços prensados, tijolos laminados, tijolos vazados, painéis pré-fabricados, telhas, componentes para lajes, ladrilhos, lajotas, condutores para cabos elétricos, diversos (peitoris, plaquetas de revestimento etc).
Vidrados	Ladrilhos
	Vidrados esmaltados
	Tijolos laminados
	Tubos
	Vidrado internamente, vidrado interna e externamente e não vidrados
Argila expandida	Obtidos a partir de termo-expansão de alguns tipos de argilas (ilita). No processo de produção adiciona-se óleo mineral à massa cerâmica. São lançados em forno rotativo inclinado, com maçarico na parte inferior.

## 2.2 Argila

A definição de argila (Figura 2.2) é muito variável de acordo com as áreas de estudo, função, formação técnica ou científica. Entretanto um termo, de uma forma geral, bastante aceitável considera a argila como sendo um produto natural, terroso, constituído por componente de grão muito fino, entre os quais se destacam por serem fundamentais, os minerais argilosos. Este produto desenvolve, quase sempre, plasticidade em meio úmido e endurece depois de seco e, mais ainda, depois de cozido (Meira, 2001).

Do ponto de vista químico e mineorológico, as argilas são constituídas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, as vezes também de ferro e magnésio, geralmente cristalinos, denominados argilominerais. Ainda pode conter outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis (Almeida, 2009).



Figura 2.2- Amostras de argilas. Fonte: <http://www.ceramicanorio.com/beaba.html>

### **2.2.1 Argila para a produção de cerâmica vermelha**

A argila constitui, portanto, a principal matéria prima da produção de telhas e tijolos. São geralmente argilas quaternárias e, as vezes terciárias, das margens de rios, lagos ou várzeas, ricas em ferro e álcalis, de granulometria fina e contendo teor considerável de matéria orgânica, fatores responsáveis pela plasticidade elevada. As argilas para fabricação de tijolos devem ser moldadas facilmente e ter o valor médio ou elevado para tensão ou módulo de ruptura à flexão, antes e após a queima. Costumam apresentar cor vermelha após a queima em baixas temperaturas, com um mínimo de trincas e empenamentos. Elevados teores de ferro bivalente e elementos alcalinos podem reduzir a faixa de vitrificação e causar colorações indesejáveis (Tomazetti, 2003).

A origem da argila possui forte influência nas características do produto final e suas propriedades têm íntima relação com o local onde são extraídas. De acordo com Tomazetti (2003), os principais depósitos onde podem ser encontradas as argilas para produção de tijolos são em várzeas e morros.

- Argila de várzea (Figura 2.3): geralmente ocorre às margens de rios, apresentando granulometria muito fina e muito plástica, o que indica a presença de matéria orgânica, resultando em alta perda de fogo e contração linear. As argilas de várzea variam sua coloração natural de cinza a preto (Muller et al., 1990).



Figura 2.3- Argila de várzea. Fonte: <http://g1.globo.com>.

- Argilas de morro (Figura 2.4): encontrada longe de banhados e rios, apresenta textura terrosa, granular ou em blocos, desagregando-se geralmente em pequenos fragmentos. Possui baixa plasticidade, coloração natural mais clara e cor variável entre vermelha e amarelada após a queima, contém quartzo e feldspato como impurezas, além de baixo teor de matéria orgânica. Nessas argilas é muito comum a presença de seixos e cascalho, e, eventualmente, de carbonatos.



Figura 2.4- Argila de morro. Fonte: [www.museumin.ufrgs.br](http://www.museumin.ufrgs.br).

### 2.3 Tijolos

Segundo Tomazetti (2003), o tijolo é considerado o mais antigo material de construção feito pelo homem. As construções milenares, por todo o mundo, mostram claramente a utilização de tijolos em diferentes culturas. Isto comprova sua aceitação e versatilidade pelos diferentes povos, ao longo do desenvolvimento da humanidade. Ao invés de se tornarem obsoletos, os tijolos ainda são largamente utilizados pelo homem, devido as suas propriedades

físicas, térmicas, acústicas, mecânicas e facilidade de mão-de-obra. Os tijolos são fabricados pelas indústrias da cerâmica vermelha, que estão entre as mais tradicionais em todo o mundo.

### 2.3.1 Processo produtivo

O processo de produção de tijolos cerâmicos vazados segue as seguintes etapas: extração da argila; beneficiamento; extrusão; secagem; queima; seleção e estoque (Batista et al., 2009). Um maior detalhamento destas etapas é ilustrado no fluxograma a seguir (Figura 2.5).



Figura 2.5- Fluxograma do processo de fabricação de tijolos. Fonte: <http://ceramicprimavera.net/processo-produtivo.html>

## 2.4 O processo de secagem

Um dos melhores processos utilizados, quando se quer conservar um produto, seja ele biológico ou químico, por um determinado tempo, tem sido a secagem ou desidratação dos mesmos, que consiste na separação parcial de um líquido (geralmente água) da matéria sólida. Pode ser explicado como um processo de transferência de calor e massa, consistindo na remoção de parte da umidade contida no interior do produto por meio de evaporação (Fortes, 1982 apud Oliveira, 2006).

Costa (2007) afirma que a secagem é uma das operações industriais mais usadas na prática, tanto para o acabamento ou equilíbrio da umidade própria dos diversos materiais processados com o ar ambiente, como é o caso das madeiras e de seus derivados, das borrachas, dos couros, dos plásticos, da celulose e seus derivados, etc., como para a sua melhor conservação, como é o caso dos cereais, dos alimentos e dos materiais perecíveis de uma maneira geral.

A técnica de secagem convectiva diferencia-se das outras técnicas de separação, pela maneira como a água é retirada do sólido. Na secagem há uma diferença de pressão parcial do vapor de água entre a superfície do produto e o ar que a envolve, o que proporciona a migração do líquido de dentro pra fora e conseqüentemente a retirada das moléculas de água do mesmo.

Oliveira (2006) afirma que, durante o processo de secagem os sólidos sofrem variações em suas características químicas, físicas e biológicas, e dependendo da intensidade do efeito provocado sobre o produto, pode-se causar perda ou inutilizá-lo para determinadas funções. Como por exemplo, os grãos, suas características alimentícias podem ser afetadas, e no caso das sementes, sua característica germinativa. No caso de materiais cerâmicos podem ocorrer trincas, deformação entre outros efeitos.

Diante da importância do processo de secagem um vasto número de pesquisadores tem trabalhado muito na análise do mesmo. Uns focam nas condições externas do ar, tais como, temperatura, umidade relativa e velocidade, correlacionadas à taxa de secagem do produto. Outros consideram as condições internas ao produto com ênfase nos mecanismos de

movimento de umidade e seus efeitos sobre o mesmo. O conhecimento dos mecanismos de movimento de água no interior dos materiais é de fundamental importância e precede a tentativa de descrever a migração de água na massa de um produto (Holanda, 2007).

A seguir são listadas várias teorias de secagem que foram propostas para descrever o transporte de massa e calor em meios capilares porosos.

- Teoria de difusão líquida;
- Teoria de vaporização-condensação;
- Teoria capilar;
- Teoria de Kricher;
- Teoria de Luikov;
- Teoria de Philip e De Vrie;
- Teoria de Berger e Pei;
- Teoria de Fortes e Okos.

Uma discussão sobre as teorias de secagem pode ser encontradas em Fortes e Okos (1980), Alvarenga et al. (1980), Keey (1982), Lima (1995), Mariz (1986), Dand citado por Ibrahim et al. (1997).

De acordo com as teorias listadas acima, os seguintes mecanismos de transporte de umidade em sólidos tem sido fornecidos pela literatura (Fortes e Okos, 1980; Strumillo e Kudra, 1986; Brooker et al., 1992 e Lima, 1999):

- Transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade;
- Transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- Transporte por efusão (escoamento Knudsen): ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, liofilização;
- Transporte de vapor por termofusão devido a gradientes de temperatura;
- Transporte de líquidos por forças capilares devido a fenômenos de capilaridade;
- Transporte de líquido por pressão osmótica devido à força osmótica;

- Transporte de líquido devido à gravidade;
- Transporte de líquido e de vapor, devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- Transporte por difusão superficial, devido à migração da mistura líquida mais vapor pelos poros da superfície do produto.

## 2.5 Secadores tipo túnel

Esse tipo de secador é constituído de um túnel propriamente dito, metálico ou de tijolos e um trilho no qual se move uma série de carrinhos que carregam o material a ser secado. Eles percorrem o túnel desde o extremo mais frio e úmido até o mais quente e seco.

Este túnel pode ser equipado com elementos próprios de aquecimento, ventiladores, controladores de umidade, controladores de temperatura e pressão entre outros elementos (Lehmkuhl, 2004).

## 2.6 Modelos Matemáticos

Os estudos acerca de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem têm sido constantemente objetos de inúmeros pesquisadores. Cada vez mais surgem novos modelos mais sofisticados capazes de representar o mais fiel possível os fenômenos físicos do processo, visto que a secagem envolve diversos fenômenos de transferência simultânea de calor, massa e '*momentum*', gerando a necessidade de modelos efetivos para simulação do processo.

A complexidade do processo depende entre outras coisas da espessura da camada do material. Pode-se então classificá-los em modelos de camada fina (camada do material de espessura muito fina) e em camada espessa (modelos que se referenciam a altura do secador). Do ponto de vista prático a secagem em camada fina é muito limitada. Mas para ter-se uma boa compreensão do processo de secagem em camada espessa faz-se necessário dispor de equações para a cinética de secagem do material em camada fina sob determinadas condições operacionais pré-estabelecidas (Silva, 2002; Farias, 2003).

### 2.6.1 Camada fina

Ainda conforme Silva (2002), as equações em camada fina (modelos concentrados) podem ser classificadas em empíricas, semi-empíricas e teóricas. Os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material são negligenciados durante o processo. Assumindo, portanto que o material alcança a temperatura média do ar imediatamente, no início do processo.

Em se tratando de equações empíricas, estas possuem uma relação direta entre o teor de umidade e o tempo de secagem, enquanto que as semi-empíricas são análogas a lei de Newton do resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional a diferença entre o conteúdo de água do produto e seu respectivo conteúdo de água de equilíbrio para as condições de secagem especificadas. Já as equações teóricas geralmente utilizam difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto, e aplicam a equação de difusão.

Parti (1983) apud Lima (1999) afirma que os modelos empíricos e semi-empíricos são aplicados para número de Biot de transferência de massa menor que 10 e número de Biot de transferência de calor menor que 1,5. Vale resaltar que esta afirmação depende da geometria do corpo e da definição dada a estes parâmetros.

#### 2.6.1.1 Modelos empíricos e semi-empíricos

Conforme Parti (1990) apud Lima (1999) e Farias (2003), Simmonds et al. foram os primeiros pesquisadores a aplicarem o modelo semi-empírico análogo a lei de Newton do resfriamento, sugerido por Lewis, citado por Jayas et al. (1991). Neste modelo, a taxa de secagem é função dos teores de umidade do produto em qualquer tempo de secagem e do seu teor de umidade de equilíbrio nas condições de secagem. Em símbolos tem-se:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -K_1(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad (2.1)$$

Definindo  $M^* = (M - M_e)/(M_o - M_e)$  e integrando a Eq. 2.1 ao longo do tempo, tem-se:



$$\bar{M}^* = \exp(-K_1 t) \quad (2.2)$$

O modelo acima é conhecido como “lei exponencial”. Vale ressaltar que quando se determinar a taxa de umidade pela Eq. 2.1,  $K_1$  depende também do tempo de secagem. Misra e Brokker (1980), afirmam que a umidade relativa também tem um efeito na taxa de secagem.

Portanto apesar desta equação ter sido bastante utilizada por inúmeros pesquisadores, nota-se que o modelo não foi satisfatório em alguns casos, e para tanto modificações são requeridas. A Equação 2.2 tem algumas limitações porque a linearidade das isotermas de sorção da maioria dos produtos foi observada apenas dentro da faixa de UR entre 0,2 e 0,8 (Beke e Vaz, 1984 apud Lima, 1999).

É importante ressaltar que o efeito da velocidade na constante de secagem é trivial e, portanto negligenciado no processo em camada fina. Entretanto há concretas conclusões de que se tratando de camada espessa a velocidade tem forte influencia na constante de secagem (Barre et al., 1971).

O modelo a seguir (Equação 2.3), é conhecido como equação de Page para camada fina (Parti, 1990; Zhang e Litchfield, 1991; Brooker et al., 1992; Sokhansanj, 1984; Jayas et al., 1991; Lima e Rocha, 1997; Park et al., 1997; Mata e Menegalli, 1997a; Soponronnarit et al., 1996 apud Farias, 2003). A adição de um termo exponencial na variável tempo da equação do modelo da lei exponencial (Equação 2.2) gera um novo modelo exponencial mais preciso, para descrever as variações dos dados medidos, especialmente para o primeiro estágio do processo de secagem (Lima 1999). O novo modelo é expresso por:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-K_1 t^{K_2}) \quad (2.3)$$

Rapusas e Driscoll (1995) apud Lima (1999) lembram que nos modelos aqui referenciados, as constantes de secagem  $K_i$ , podem ser determinadas sem referência a forma e a variações dimensionais do material secado. Isso se torna muito positivo em casos onde a geometria do produto não pode ser especificada com precisão, ou mesmo onde não ocorrem grandes variações geométricas do produto durante a secagem.

Por fim, pode-se mostrar, de uma forma geral, que as variações do teor de umidade do produto em processo de secagem, segundo um modelo de secagem em camada fina sob condições constantes do ar pode ser expresso pela expressão:

$$\bar{M}^* = f(T_a, UR_a, v_a, \bar{M}_o, t, \text{encolhimento e outros})$$

Vale salientar que é muito importante o conhecimento dos efeitos do processo de secagem sobre as propriedades do material a ser seco, uma vez que afetam significativamente os fenômenos de transferência de massa no interior do material. É preciso conhecer previamente o comportamento do material frente às condições de secagem, pois há uma relação direta com a qualidade do produto final.

### 2.6.1.2 Modelo difusivo

Para diversos autores a difusão de água líquida é considerada o principal mecanismo de transporte de água em produtos (Brooker et al., 1992; Sarker et al., 1994; Zogzas e Maroulis, 1996; Liu e Simpson, 1997; Park et al., 1997; Frei e Chau, 1997; Baroni e Hubinger, 1997; Sabadini et al., 1997; Park e Brod, 1997; Tolaba et al., 1997; Quitana-Hernandez et al., 1997; Li et al., 1997; Lima, 1999; Carmo, 2000; Oliveira, 2001; Farias, 2002; Nascimento, 2002).

Fick, em 1885, seguindo o trabalho de Fourier de 1822 (Bird et al., 1960) estudou processo de mistura de soluções e formulou duas leis. A primeira lei de Fick é fenomenológica e indica o fluxo  $\vec{J}$  de uma substância difundida através de uma área de secção transversal unitária é proporcional ao gradiente de concentração medido normalmente a esta secção (Lima, 1999).

$$\vec{J} = -D\rho_s \frac{dM}{dy} \quad (2.4)$$

A segunda lei de Fick, que diz que a espécie em difusão varia com o tempo, tem sido muito utilizada. Em outras palavras ela estabelece que a difusão de água, por exemplo, se dê em termos do gradiente de concentração no sólido:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.5)$$

onde M é o teor de água do produto, D é o coeficiente de difusão líquida e t é o tempo.

Normalmente o coeficiente de difusão D, é considerado constante, ou dependente da temperatura e/ou do conteúdo de água do produto. Contudo, vale salientar que a compressão mecânica reduz a porosidade e a difusividade de água efetiva; portanto a pressão tem efeito negativo na difusividade de água (Karathanos et al., apud Saravacos, 1995).

O coeficiente de difusão geralmente tem sido considerado constante nos modelos, no entanto, observações experimentais mostram que ocorrem importantes discrepâncias entre os resultados experimentais e teóricos, quando comparados com os obtidos com coeficiente de difusão variável, principalmente no período de taxa decrescente (Lima, 1999)

## **2.6.2 Camada espessa**

Embora seja importante se ter conhecimento acerca da secagem de uma só partícula, unidade ou até mesmo de uma camada de material de pequena espessura, esse fato não altera significativamente as condições do ar de secagem. Entretanto, quando o material é superposto dentro do secador, formando uma camada espessa, as propriedades termodinâmicas do ar de secagem são modificadas consideravelmente. Seu potencial de secagem diminui. Em virtude disto, os modelos de secagem em camada espessa são mais completos que os de camada fina, possuindo equações mais complexas que levam em consideração as transferências de calor e massa entre o produto a ser seco e o ar que o circunda.

### **2.6.2.1 Modelo da Universidade Estadual de Michigan**

O modelo de secagem da Universidade Estadual de Michigan tem sido usado para simular a secagem de sólido e baseia-se nas prévias ideias de Shumann, Van Arsdel e Klapp, citados por Bakker-Arkema et al. (1974).

Neste modelo, foram assumidas as seguintes suposições:

- a redução de volume durante a secagem é desprezível;
- o gradiente de temperatura dentro dos grãos individualmente é desprezível;
- a condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- a distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- as paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;
- as capacidades caloríficas do ar e dos grãos são constantes durante pequenos intervalos de tempo
- as variações de temperatura e a razão de umidade do ar com respeito ao tempo são desprezíveis quando comparadas com as variações de temperatura e razão de umidade com respeito a posição;

$$\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial T}{\partial y} \quad \text{e} \quad \frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} \ll \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y}$$

- uma equação fiel de secagem em camada fina e de umidade de equilíbrio é conhecida.

A seguir apresentam-se os modelos mais comumente usados de acordo com a técnica de secagem utilizada. Tais modelos foram citados nos trabalhos de Farias (2003) e Holanda (2007).

#### ➤ **Secagem em camada fixa**

O modelo de secagem em camada fixa é baseado nos balanços de massa e energia, escritas para um volume diferencial ( $Sdy$ ) localizado numa posição arbitrária da camada de produtos conforme a Figura 2.6. Este modelo é aplicado para a secagem de grãos em silos e em batelada. É importante observar o fato de que neste modelo o produto não se move e, portanto, sua velocidade é nula.

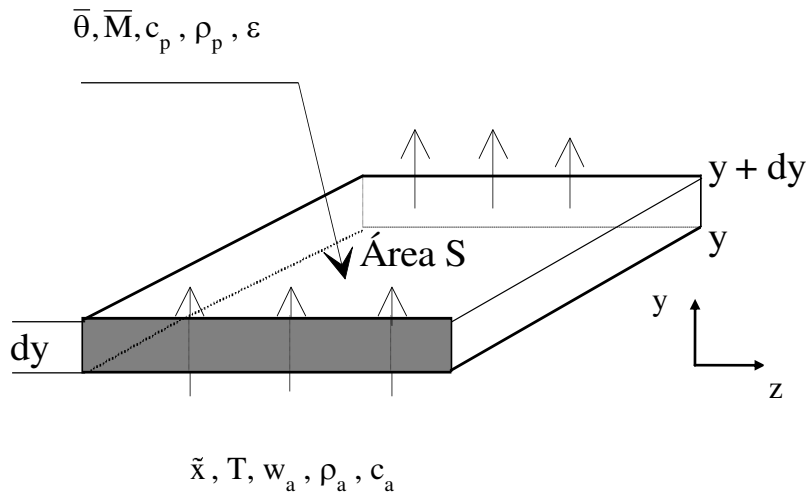


Figura 2.6 - Volume elementar de uma camada do produto

De acordo com os princípios de conservação de massa e conservação de energia faz-se um balanço dos mesmos no volume elementar acima. Logo, as seguintes equações podem ser obtidas:

• **Balanço de energia para o ar**

$$\begin{aligned}
 & \text{[Energia que entra na área S na posição y]} \\
 & \quad - \\
 & \text{[Energia que sai da área S na posição y+dy]} \\
 & \quad = \\
 & \text{[Energia transferida ao produto, por convecção]} \\
 & \quad + \\
 & \text{[Variação, com relação ao tempo, da entalpia do ar nos espaços vazios]}
 \end{aligned}$$

Em símbolos:

$$\begin{aligned}
 & (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x} c_v) S T dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x} c_v) \left( T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S dt = \\
 & = A^* h_c (T - \bar{\theta}) S dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v) \varepsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{2.6a}$$

De acordo com as suposições assumidas para o modelo, após reagrupar e fazer as devidas simplificações obtém-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{h_c (T - \bar{\theta}) A^*}{\rho_a w_a (c_a + \tilde{x} c_v)} \quad (2.6b)$$

**• Balanço de energia para o produto**

$$\begin{aligned} & \text{[Energia transferida por convecção, do ar ao produto]} \\ & = \\ & \text{[Energia necessária para aquecer o produto]} \\ & + \\ & \text{[Energia necessária para evaporar a água do produto]} \\ & + \\ & \text{[Energia necessária para aquecer o vapor de água evaporada]} \end{aligned}$$

Em símbolos, tem-se:

$$\begin{aligned} A^* h_c S (T - \bar{\theta}) dy dt &= (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S dy \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} dt - \\ &- h_{fg}^* \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} dy S dt - c_v (T - \bar{\theta}) \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt \end{aligned} \quad (2.7a)$$

Reagrupando os termos obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^*}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) + \left[ \frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \right] \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \quad (2.7b)$$

**• Balanço de massa para o ar**

[Quantidade de vapor de água que entra na área S na posição y]

-

$$\begin{aligned}
& \text{[Quantidade de vapor de água que sai da área } S \text{ na posição } y+dy] \\
& \quad + \\
& \quad \text{[Variação da umidade do ar nos espaços vazios]} \\
& \quad = \\
& \quad \text{[Umidade cedida pelo produto]}
\end{aligned}$$

Em símbolos tem-se:

$$\rho_a w_a S \tilde{x} dt - \rho_a w_a S \left( \tilde{x} + \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} dy \right) dt + \varepsilon S \rho_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} dy dt = \rho_p S \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy dt \quad (2.8a)$$

Reagrupando os termos e fazendo as devidas simplificações, tem-se:

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.8b)$$

Os índices a, v, w, e p indicam que as propriedades que os contêm se referem ao ar, vapor, água e produto, respectivamente.

#### • Balanço de massa para o produto

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada delgada, apropriada para cada produto, que é dada por:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_1 \quad (2.9)$$

onde ( $f_1$ ) representa uma expressão de camada fina apropriada.

Para resolver qualquer equação diferencial é necessário conhecer as condições iniciais e/ou de contorno. E que estas sejam para os modelos de secagem ao nível de secador. Para este estudo as seguintes condições podem ser usadas:

- (a) a temperatura e o teor de umidade iniciais do produto;
- (b) a temperatura e a umidade absoluta inicial do ar de secagem.

Para os modelos de secagem em camada fixa as condições de contorno são:

$$\begin{aligned} T(y=0,t) &= T_{ent} & \bar{\theta}(y,t=0) &= \bar{\theta}_o \\ \bar{M}(y,t=0) &= \bar{M}_o & \tilde{x}(y=0,t) &= \tilde{x}_{ent} \end{aligned}$$

### ➤ Secagem de fluxo concorrente

Em secadores de fluxo concorrente, ar e produto fluem na mesma direção ao longo do secador (Park et al., 2007). Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa. Portanto, fazendo-se os balanços de energia e de massa para o ar de secagem e para o produto, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v x} (T - \bar{\theta}) \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) - \left( \frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_2 \quad (2.13)$$

onde (  $f_2$  ) representa uma expressão de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxo concorrente as condições de contorno são:

$$T(y=0,t) = T_{ent} \quad \bar{\theta}(y,t=0) = \bar{\theta}_o$$



$$\bar{M}(y=0, t) = \bar{M}_o \quad \tilde{x}(y=0, t) = \tilde{x}_{ent}$$

➤ **Secagem em fluxo contracorrente**

Nos secadores de fluxo contracorrente o ar e o produto fluem em sentido contrário ao longo do secador (Park et al., 2007).

Os balanços de energia e de massa são obtidos de forma semelhante ao que foi feito para camada fixa, obtendo-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v \tilde{x}} (T - \bar{\theta}) \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left( \frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_3 \quad (2.17)$$

onde (  $f_3$  ) representa uma expressão de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxo contracorrente as condições de contorno são:

$$T(y=L, t) = T_{ent} \quad \bar{\theta}(y=0, t) = \bar{\theta}_o$$

$$\bar{M}(y=0, t) = \bar{M}_o \quad \tilde{x}(y=L, t) = \tilde{x}_{ent}$$

➤ **Secagem em fluxo cruzado**

Secadores de fluxos cruzados caracterizam-se pela passagem do ar perpendicularmente a uma camada do produto, onde o ar escoa na direção  $y$  e o sólido na direção  $z$ . Os balanços de energia e de massa são obtidos de modo semelhante ao que foi feito para camada fixa. Logo, tem-se o seguinte sistema de equações:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v \tilde{x}} (T - \bar{\theta}) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \left( \frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left( \frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_4 \quad (2.21)$$

onde (  $f_4$  ) representa uma expressão de camada fina apropriada. Para os modelos de secagem em fluxos cruzados as condições são:

$$T(y=0, t) = T_{ent} \quad \bar{\theta}(y, t=0) = \bar{\theta}_o$$

$$\bar{M}(y, t=0) = \bar{M}_o \quad \tilde{x}(y=0, t) = \tilde{x}_{ent}$$

A solução analítica para os sistemas de equações obtidos a partir do modelo da Universidade Estadual de Michigan é impossível; sendo assim, usam-se técnicas numéricas para se obter uma solução.

## 2.7 Processo de secagem da argila

A etapa de secagem merece especial atenção no processo produtivo de tijolos cerâmicos. De acordo com Batista et al. (2009), isto se faz necessário porque logo após a conformação da peça cerâmica, a água está distribuída, quase que homogeneamente, entre as partículas de argila e outros componentes da argila. Esta água precisa ser retirada cuidadosamente e de forma homogênea, já que a saída da água faz com que as partículas de argila e outros componentes se aproximem, diminuindo o tamanho da peça (fenômeno este conhecido por encolhimento ou retração volumétrica). Se essa diminuição não for uniforme poderá provocar trincas ou, em casos extremos a quebra da peça.

O ar de secagem tem que basicamente executar as seguintes funções no processo: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor d'água produzido, a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça e o movimento de líquido e/ou vapor no interior da peça.

Do ponto de vista termodinâmico é importante se fazer uma análise da influência da temperatura e umidade relativa do ar. Costa (2007) define umidade relativa como sendo a relação entre a massa de vapor d'água contido na unidade de volume da mistura e a massa de vapor d'água, que o mesmo conteria caso estivesse saturado.

No fenômeno de secagem da argila, a eficiência do processo está diretamente ligada tanto a questões termodinâmicas das relações entre a água líquida, o vapor d'água e o ar seco, quanto às questões morfológicas do meio poroso, que é a argila, e a velocidade de secagem da peça.

Sob o aspecto termodinâmico, analisa-se a influência da umidade relativa do ar no processo. A pressão de saturação do vapor d'água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante da pressão de saturação estiver a pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver o vapor d'água evaporada das peças a secar. Portanto, a capacidade do ar em absorver vapor d'água cresce com a temperatura, de modo que quanto maior a temperatura do ar maior a sua capacidade de secagem. Além disto, ar mais quente diminui o volume de ar necessário à secagem e em função disto as potências dos exaustores e circuladores de ar são

reduzidas, diminuindo-se os custos de secagem. O calor contido no ar quente é utilizado para aquecimento da massa de produtos a secar, da massa estática do secador, para evaporar a água de umidade dos produtos e para compensar as perdas inevitáveis em todo o sistema (Hartke, 2004).

Entretanto, a velocidade de secagem da peça cerâmica é limitada pelo comportamento de meio poroso da argila. Como a umidade da peça se encontra no interior de seus poros, a forma e estrutura destes terão uma grande influência sobre a secagem, de modo que mesmo sob um ambiente termodinamicamente favorável à evaporação da água, a umidade pode vir a ficar presa no interior dos poros da argila. Isto ocorre quando a superfície da peça seca muito rapidamente e os poros ainda cheios de água, mas muito estreitos, não fornecem umidade a uma taxa compatível com a da evaporação. A parte seca da peça sofre então uma contração, dificultando ainda mais a difusão da umidade do interior do poro para a superfície, o que limita assim a velocidade de secagem da argila (Hartke, 2004).

Percebe-se então a intrínseca e complexa relação entre o processo de extrusão, com sua influência nas propriedades do meio poroso, e o processo de secagem.

Dentro deste contexto é importante destacar os tipos de água presente nos argilominerais. Determinadas propriedades tais como plasticidade, resistência mecânica a úmido e a seco, retração linear e volumétrica são fortemente alteradas pela adição de água nos argilominerais (Santos, 1989).

### **2.7.1 Fases do processo de secagem**

De acordo com Hartke (2003), pode-se dizer que em termos gerais o processo ideal de secagem é dividido em quatro fases distintas:

- adaptação;
- saída da água coloidal;
- formação de vazios;
- expulsão da umidade intersticial.

Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura e pressão), nas quais será efetuada a secagem. Em seguida evapora a água coloidal e ocorrem variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação dos grãos da sua microestrutura. Ainda nesta fase a água constantemente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que então evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante e função principalmente da porosidade da peça. Na terceira fase ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior da peça e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma conseqüente redução da velocidade de evaporação e de secagem. A última fase da secagem, que nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos próprios fornos de queima é a de expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial, onde a velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero. Na Figura 2.7 está definido o processo de secagem, admitindo que esta aconteça sob condições externas constantes.

O conhecimento acerca das propriedades do ar de secagem é imprescindível à compreensão do mecanismo de secagem. O ar irá atuar como condutor de calor e transporte de vapor de água produzido. Para haver a evaporação da água é necessário que ela consuma energia, na forma de calor, para passar do estado líquido para o estado de vapor. Esse consumo de energia provoca a diminuição da temperatura na superfície do corpo cerâmico. O que se encontra nas vizinhanças das peças fica saturado de vapor de água fazendo com que o processo seja interrompido. Para a secagem prosseguir, o ar precisa então estar aquecido, com baixa umidade relativa e preferencialmente circulando, para que desta forma possa fornecer calor à peça e remover umidade ao seu redor.

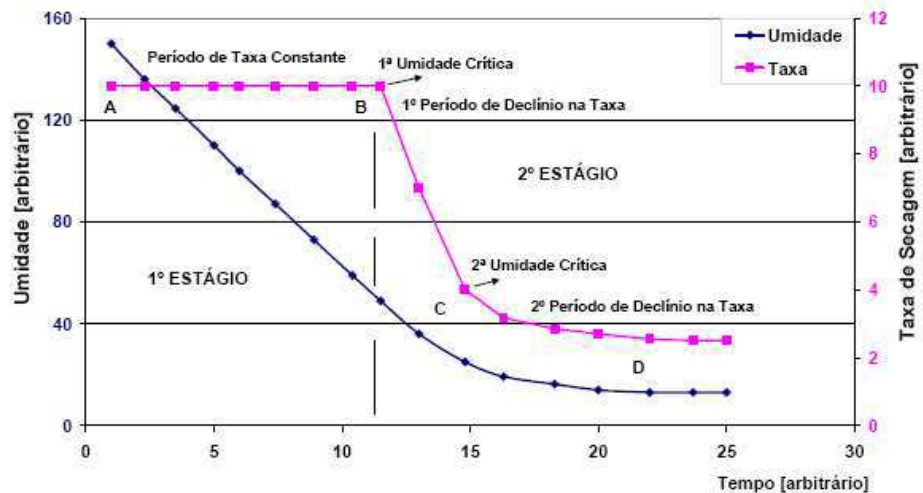


Figura 2.7 - Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood. Fonte: Brosnan e Robinson (2003).

## 2.7.2 Retração

Observa-se experimentalmente que quanto maior a umidade com que a peça for feita, maior será a retração na secagem. Diante disto, é importante que a umidade saia homogeneamente de toda a peça, pois se a secagem for feita de modo desigual, ela diminuirá de tamanho desigualmente, causando tensões que poderão se transformar em trincas. Peças com variação de espessura devem secar cuidadosamente. As partes mais finas secarão mais rapidamente, diminuindo de tamanho e perdendo a plasticidade. Quando a parte mais grossa secar e diminuir de tamanho, aparecerão trincas. Isso é importante em peças torneadas de fundo grosso, em esculturas, em placas ocadas e em todas as peças que tenham espessuras variáveis (Silva et al., 2009).

As condições de secagem dos materiais cerâmicos são relativamente críticas quanto à integridade dos mesmos. A velocidade de secagem deve ser condicionada à velocidade do fenômeno da migração da água, que é relativamente lento. Isto evita que a secagem superficial seja mais rápida e leve a fissuras na peça (Lehmkuhl, 2004).

Na Figura 2.8 está esquematicamente representado o comportamento de uma massa cerâmica durante o processo de secagem. Inicialmente todas as partículas de argila estão envoltas por água. Com a remoção da água, as partículas se aproximam e a massa retrai. Na primeira fase de retração a variação do volume do produto úmido é proporcional ao

decréscimo do volume de água. Com o progresso da secagem as partículas se aproximam gradativamente até encostarem-se (Lehmkuhl, 2004).

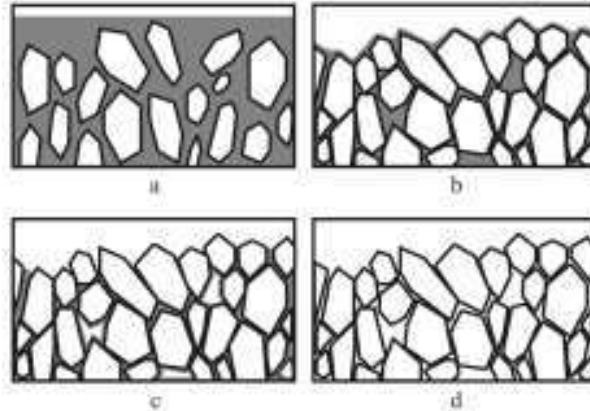


Figura 2.8 – Visão esquemática de uma massa de argila - água em diferentes estágios da secagem. Fonte: Verduch e Solana (2000).

A retração continua a uma velocidade menor, uma vez que a perda de água passa a ser parcialmente compensada pela formação de poros. Este período é definido como a segunda fase de retração. Na última fase a retração assume um estado final. Uma secagem adicional aumenta o volume do poro, porém o volume total da peça permanece constante (Lehmkuhl, 2004).

A Figura 2.9 mostra uma típica curva de Bigot, que descreve a evolução da retração de secagem em função da perda de água de conformação (Abajo, 2000; Oller, 1981; Beltran et. al., 1995).

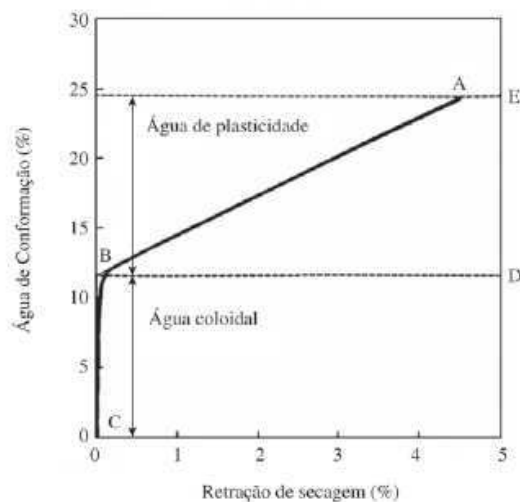


Figura 2.9 – Variação da retração em função da água de conformação. Fonte: Vieira et al. (2003).

Ainda segundo Vieira et al. (2003) o ponto (A) representa na ordenada (ponto E), a umidade das peças no início da etapa de secagem. Na abscissa, pode-se obter a retração total de secagem que irá ocorrer. A linha (A-B) representa a primeira fase de secagem com eliminação de água de plasticidade, localizada entre as partículas. Esta é a fase mais problemática na etapa de secagem já que a eliminação de água entre partículas é acompanhada de retração. Conforme já mencionado anteriormente, com a retração de secagem aumenta-se o risco de aparecimento de defeitos. A linha (B-C) representa a segunda fase de secagem caracterizada pela eliminação de água intersticial. Teoricamente, o ponto (B) deveria situar-se no eixo da abscissa, indicando ausência de retração de secagem quando se iniciar a eliminação de água intersticial. Entretanto, na prática, nem todas as partículas entram em contato ao mesmo tempo, já que a superfície seca com mais rapidez que o interior da peça. Com isso, parte da água evaporada ainda se origina da interposição entre partículas. Por outro lado, a medida que evapora esta água de plasticidade a água intersticial proveniente dos capilares e que não produzem retração, vai tornando-se predominante. O ponto (D) separa os dois tipos de água de umidade. A água de plasticidade corresponde ao valor (D-E), enquanto que a água intersticial é representada pelo segmento (D-C).

### 2.7.3 Fissuras e descoloração

Fissuras e descoloração são indesejáveis fenômenos que ocorrem em peças verdes durante sua secagem, prejudicando sua qualidade. Descolorações são particularmente indesejáveis nos produtos cerâmicos de face reta como tijolos de parede aparente, pavimento e telhas (Almeida, 2009). Isso porque estes produtos além de desempenharem seu papel fundamental, tornam-se parte da decoração do ambiente. As trincas são indesejáveis e devem ser evitadas em todos os produtos. Sua ocorrência depende, em boa parte, das condições de secagem. Através de um controle preciso, esses problemas podem ser prevenidos.

Segundo Elias (1995) apud Silva (2009), a sensibilidade à secagem é definida como o risco de aparecimento de fissuras durante a secagem. Matematicamente é expressa pela equação:

$$S_s = \frac{\text{Contração durante a secagem (\%)}}{\text{Tempo de aparecimento da primeira fissura (min)}}$$



A sensibilidade à secagem ( $S_s$ ) pode ser diminuída adicionando-se à pasta determinadas matérias primas, como por exemplo, o quartzo, feldspato ou similares. Estas matérias primas, separadas por grupos, funcionam cada uma delas com um princípio físico diferente. Em se tratando de grês cerâmico, é preferível o feldspato porque a transformação alotrópica do quartzo pode provocar rupturas durante o resfriamento. Já o hidróxido de cálcio e/ou similares, possuem ação coagulante, formando macro agrupamento de partículas. Estes materiais reduzem a microcapilaridade e facilitam a secagem. Certas matérias orgânicas como o papel de jornal, serragem, lodos de depuradoras, etc. aplicados em quantidades moderadas, exercem uma ação de ancoragem das partículas argilosas e, portanto facilitam a migração de água (Silva, 2009).

De acordo com Telljohann (2003), pode-se reduzir o gradiente de umidade, responsável pelo risco de trincas, diminuindo a velocidade de secagem. A tendência de a peça trincar, também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade de umidade da peça. Quanto maior a peça, mais pesada e mais irregular, maiores serão as possibilidades de acontecer problemas durante a secagem. Também se deve tomar cuidado ao fazer peças que demoram vários dias para se concluir, pois a umidade da peça que se está trabalhando pode variar e provocar problemas na secagem, principalmente nas emendas.

Dentro deste contexto é importante destacar os tipos de ligações de água, geralmente presente nos argilominerais. Vieira et al. (2003) afirma que o tipo de água denominado de água de conformação, pode ser dividido em dois tipos: o primeiro tipo é denominado de água intersticial. O segundo tipo é denominado de água livre ou água de plasticidade (Abajo, 2000; Barba et al. 1997; Beltran et al., 1995). A água intersticial está relacionada com a água necessária para preencher os poros das partículas. Enquanto que a água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação. Esta última água é a responsável pela retração das peças.

## **CAPÍTULO 3**

### **MODELAGEM TEÓRICA**

#### **3.1 Caracterização do problema**

O problema abordado nesta pesquisa está direcionado a modelagem matemática e simulação numérica da secagem de tijolos cerâmicos em um secador de fluxos cruzados. Nessas condições, utilizou-se um modelo baseando-se no modelo proposto pela Universidade Estadual de Michigan, que contempla os balanços de massa e energia para o ar e para o produto onde, no modelo proposto, são incluídos todos os termos transientes aplicados para o ar e para o produto, considerando porosidade do leito e condensação do vapor de água no produto, fornecendo equações adequadas para descrever o processo de secagem. O fenômeno de secagem de tijolos é complicado, pois leva em consideração tanto aspectos da argila quanto do ambiente de secagem. Desta maneira é necessário que se admita algumas hipóteses simplificadoras, a fim de garantir a “computacionabilidade” do problema e consistência na solução. Neste modelo as seguintes considerações foram adotadas:

- Propriedades termofísicas e mecânicas constantes;
- A água migra no interior do sólido na forma líquida e evapora na superfície;

- Geração interna de massa e de calor desprezível;
- O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- Corpo homogêneo e isotrópico;
- As variações dimensionais foram desconsideradas;
- As tensões no interior de tijolos são consideradas provenientes das tensões hídricas e das tensões térmicas, que surgem no tijolo devido às variações do teor de umidade e da temperatura, respectivamente;
- Condição de contorno convectiva na superfície do sólido, com teor de umidade, temperatura dependendo da posição e do tempo;
- O campo do teor de umidade e temperatura no interior do corpo é uniforme no início do processo;
- Os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

### **3.2 Caracterização do secador**

O secador industrial da Cerâmica Cincera no qual este trabalho se baseia (Figuras 3.1 e 3.2) é do tipo túnel medindo 73 x 3,30 x 5,10 m<sup>3</sup> com dois ventiladores que auxiliam no direcionamento do ar de secagem ao produto, sendo a secagem controlada basicamente em função do teor de umidade do produto. A capacidade aproximada do secador é de 48 vagonetas, sendo 24 em cada lado no interior do secador, ao longo de seu comprimento, usadas para transportar o produto através de trilhos e movidas por pistão. Essas vagonetas permanecem uma após a outra no secador conforme o controle da secagem.



Figura 3.1 – Vagonetas usadas na secagem no secador industrial.

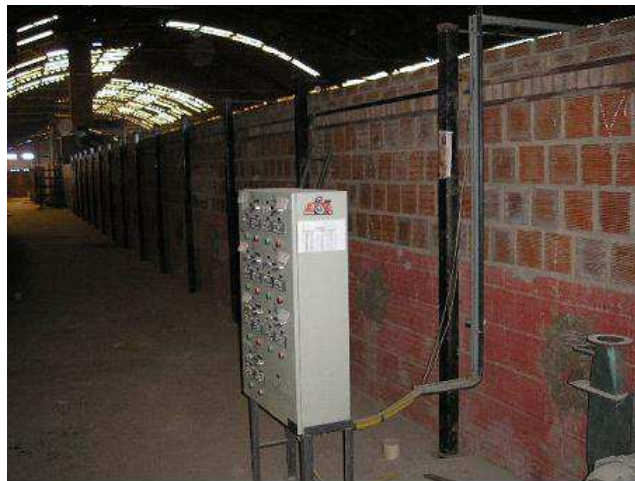


Figura 3.2 – Vista externa do secador industrial.

As vagonetas têm em média 1008 tijolos, os tijolos têm a forma geométrica de um paralelepípedo com oito furos de formas semelhantes. Cada tijolo mede em média 19 cm de comprimento, 19 cm de altura e 9 cm de largura, dispostos na vagoneta da seguinte forma: 7

tijolos na largura, 16 ao longo de seu comprimento e 9 tijolos ao longo de sua altura. As vagonetas têm dimensões de 2,08 m de comprimento, 1,40 m de largura e 2,86 m de altura. Os ventiladores também são transportados através de uma vagoneta e impulsionados por pistão, deslocando-se com velocidade constante e sincronizada.

O secador recebe o ar para secagem, reutilizado do forno, com temperatura e umidade relativa, fixas que chega ao produto por canais internos e na direção de baixo para cima conforme mostra a Figura 3.3.

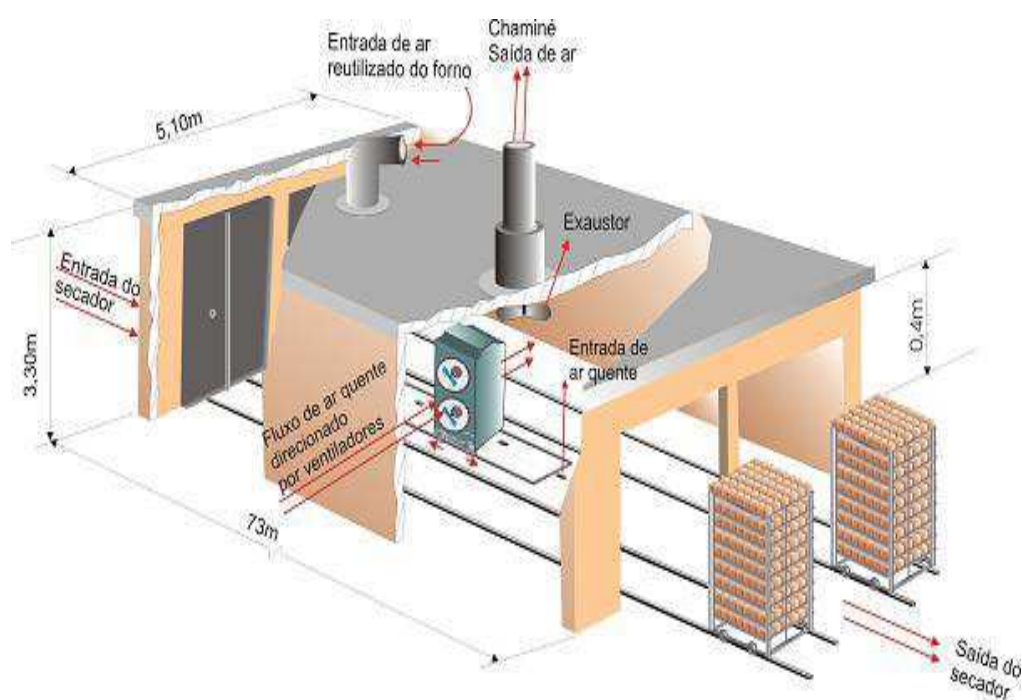


Figura 3.3 – Vista esquemática do secador industrial. Fonte: Almeida (2009).

No interior do secador as vagonetas preenchidas com tijolos (Figuras 3.4, 3.5 e 3.6) são submetidas a um fluxo de ar perpendicular oriundo de ventiladores dentro do secador, conforme ilustrado nas Figuras 3.4 e 3.5. O tempo de secagem, a velocidade do ar e a velocidade da vagoneta são definidos de forma empírica a partir das condições finais do processo, tais como umidade e o aspecto visual do tijolo.

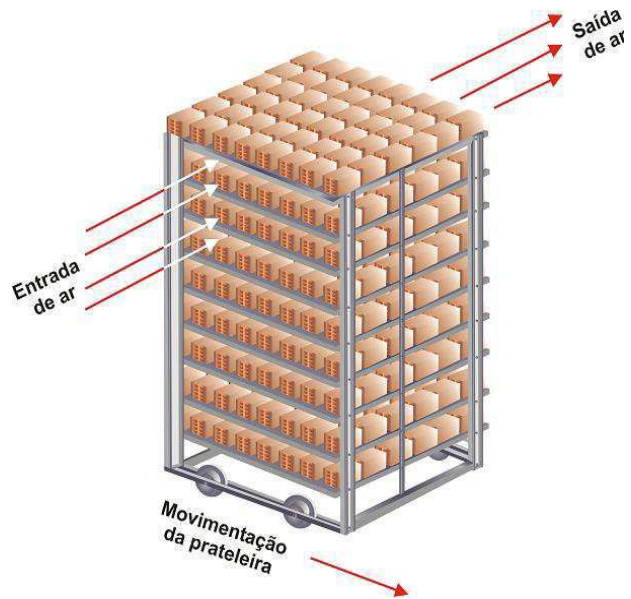


Figura 3.4 – Vista angular da vagoneta. Fonte: Almeida (2009).

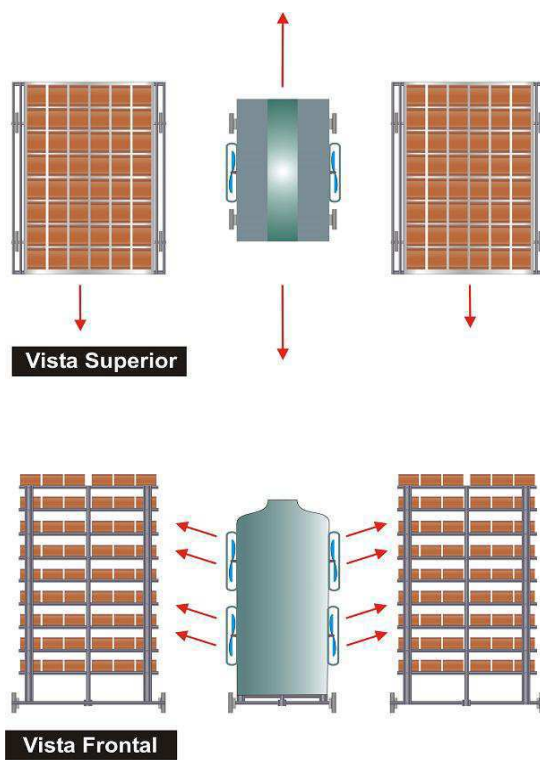


Figura 3.5 – Vista superior e frontal das vagonetas. Fonte: Almeida (2009).

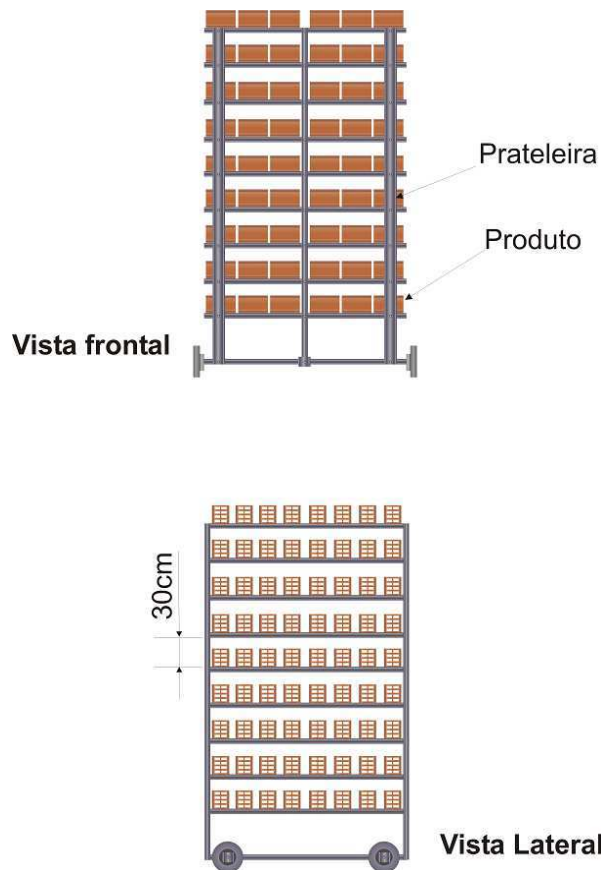


Figura 3.6 – Vistas frontal e lateral da vagoneta. Fonte: Almeida (2009).

No início da secagem, o produto é submetido ao ar com uma temperatura mais elevada e com baixa umidade absoluta. Ao longo do processo esse ar recebe umidade do produto diminuindo sua temperatura e por sua vez aumentando a temperatura do produto. No final da secagem, o ar apresenta-se com uma temperatura menor enquanto o produto atinge seu ponto de equilíbrio com o meio.

### 3.3 Modelagem matemática

Para a obtenção das equações governantes, que representam os balanços de massa e energia para o ar e para o produto, considere as Figuras 3.7 e 3.8. A Figura 3.7 mostra um esquema de um secador túnel tipo contínuo de fluxos cruzados. Enquanto que na Figura 3.8 tem-se uma fração volumétrica deste secador.

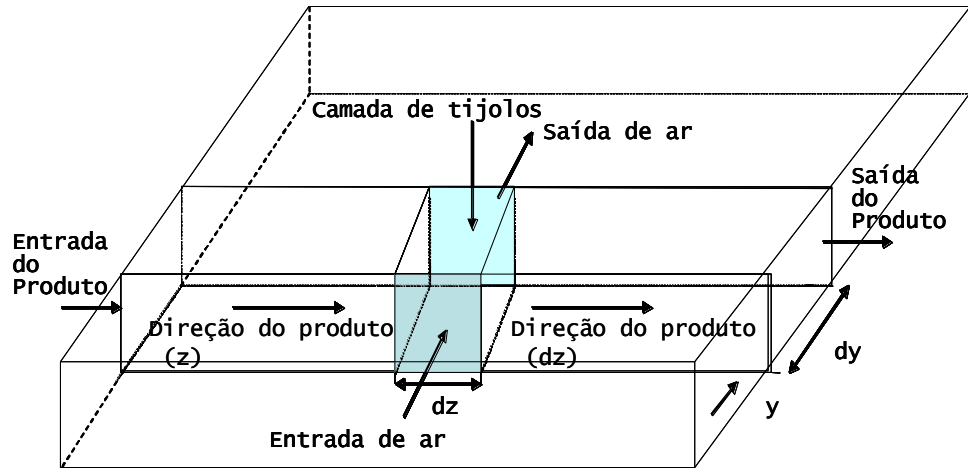


Figura 3.7 - Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado.

Fonte: Almeida (2009).

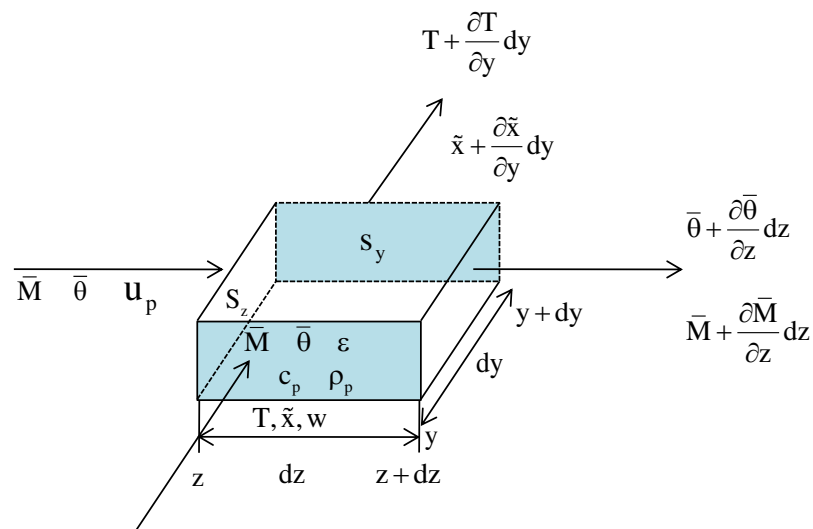


Figura 3.8 - Volume infinitesimal de sólido na camada. Fonte: Almeida (2009).

A partir da Figura 3.8, as seguintes equações podem ser obtidas:

- **Balço de energia para o ar**

[ Energia que entra na área S na posição y ]

-

[ Energia que sai da área S na posição y+dy ]

=



[ Energia transferida ao produto, por convecção ]

+

[ Variação, com relação ao tempo, da energia do ar nos espaços vazios ]

$$\begin{aligned}
 (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x}c_v)T(S)dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x}c_v)\left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy\right)Sdt = \\
 A^* h_c (T - \bar{\theta})(S)dydt + (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x}c_v)\varepsilon(S)dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

reorganizando os termos da equação acima, tem-se:

$$-(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x}c_v) \frac{\partial T}{\partial y} = A^* h_c (T - \bar{\theta}) + (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x}c_v)\varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.2}$$

ou ainda

$$-\frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x}c_v)\varepsilon} + \frac{\partial T}{\partial t} \tag{3.3}$$

Logo, pode-se reescrever a Equação (3.3) da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left( \frac{w_a}{\varepsilon} \right) \frac{\partial T}{\partial y} = -\frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x}c_v)\varepsilon} \tag{3.4}$$

Para as equações seguintes, têm-se procedimentos semelhantes.

#### • Balanço de energia para o produto

[ Energia transferida por convecção, do ar ao produto ]

=

[ Energia necessária para aquecer o produto ]

+

[ Energia necessária para evaporar a água do produto ]

+

[ Energia necessária para aquecer o vapor de água evaporada ]

$$A^* h_c (T - \bar{\theta}) = (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) \left( \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) - [h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})] \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.5)$$

ou ainda

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{[h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})]}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.6)$$

#### • Balanço de massa para o ar

[ Quantidade de vapor de água que entra na área S na posição y ]

-

[ Quantidade de vapor de água que sai da área S na posição y+dy ]

+

[ Variação da umidade do ar nos espaços vazios ]

=

[ Umidade cedida pelo produto ]

que dá como resultado:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \tilde{x}) + \nabla \cdot (\rho_a \frac{w}{\varepsilon} \tilde{x}) = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.7)$$

#### • Balanço de massa do produto

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada fina, apropriada para cada produto. Neste estudo o tijolo cerâmico furado é o produto base para a pesquisa. Neste caso, utiliza-se a Equação (3.9) citada por Silva (2009).

$$\frac{M - M_e}{M_o - M_e} = c_1 \exp(k_1 t) + c_2 \exp(k_2 t) \quad (3.8)$$

Derivando a Equação (3.9), obtém-se:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = [c_1 k_1 \exp(k_1 t) + c_2 k_2 \exp(k_2 t)](M_o - M_e) \quad (3.9)$$

onde  $t$  é o tempo. Os parâmetros  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $k_1$  e  $k_2$  da Equação (3.9) foram obtidos após ajuste com dados experimentais do teor de umidade dados por Silva (2009).

O calor latente de vaporização da água, calor específico do tijolo, densidade do sólido seco, volume do produto, área de superfície de contato, área de superfície específica e fração volumétrica do leito (porosidade) são definidos por:

$$h_{fg} = 352,8(374,14 - T)^{0,33052} \text{ (kJ/kg) (Pakowski et al., 1991)}$$

$$c_p = 1,673 \times 10^3 \text{ J/kgK (Nascimento, 2002)}$$

$$\rho_p = 1985,8 \text{ kg/m}^3 \text{ (Nascimento, 2002)}$$

$$V_p = 0,00131 \text{ m}^3$$

$$A_p = 0,3332 \text{ m}^2$$

$$A^* = \frac{A_p(1 - \varepsilon)}{V_p}$$

$$\varepsilon = 0,864401$$

onde  $A_p$  e  $V_p$  representam a área de superfície de contato e o volume dos tijolos, respectivamente, obtidas a partir das dimensões do tijolo. O parâmetro  $A^*$  corresponde à área de superfície específica do tijolo.

Almeida (2009) considerou, nos experimentos de secagem em estufa e secador industrial, o seguinte esquema (Figura 3.9) do tijolo cerâmico vazado adotado no presente trabalho.

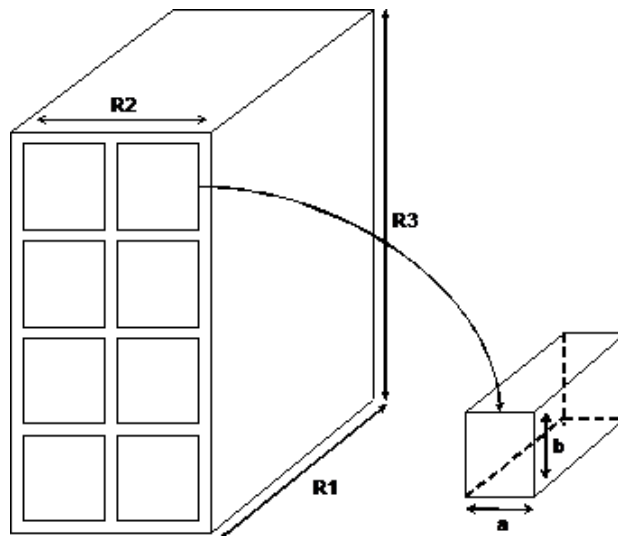


Figura 3.9 – Esquema do tijolo utilizado nos experimentos. Fonte: Almeida (2009).

As equações para o cálculo da área superficial dos tijolos, utilizados nos experimentos, representados pela Figura 3.20, e do volume desses tijolos podem ser definidas por:

$$A_c = A_L + A_I \quad (3.10)$$

$$V = V_T - V_f \quad (3.11)$$

- $A_L$  corresponde à área lateral (faces) dos tijolos
- $A_I$  sua área interna (faces internas determinadas pelos furos)
- $V_T$  o volume dos tijolos maciços (sem os furos)
- $V_f$  o volume dos furos.

O calor específico do ar usado neste trabalho é dado por Jumah et al. (1996). Já a densidade do ar, temperatura absoluta, constante universal do ar, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e pressão atmosférica local são dados por Rossi (1987).

$$c_a = 1,00926 - 4,04033 \times 10^{-5} T_a + 6,17596 \times 10^{-7} T_a^2 - 4,0972 \times 10^{-10} T_a^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.12)$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm} M_a}{R T_{abs}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.13)$$

$$T_{abs} = T_a + 273,15 \text{ K} \quad (3.14)$$

$$R_a = 8314,34 \text{ J/kg}^\circ\text{C} \quad (3.15)$$

$$UR = \frac{P_{atm} \tilde{x}_a}{(x_a + 0,622) P_{vs}} \quad (3.16)$$

$$P_{vs} = 22105649,25 \text{Exp} \{ [-27405,53 + 97,5413 T_{abs} - 0,146244 T_{abs}^2 + 0,12558 \times 10^{-3} T_{abs}^3 - 0,48502 \times 10^{-7} T_{abs}^4] / [4,34903 T_{abs} - 0,39381 \times 10^{-2} T_{abs}^2] \} \text{ (Pa)} \quad (3.17)$$

$$P_{atm} = 101325 \text{ Pa} \quad (3.18)$$

Os calores específicos da água nas fases líquidas e vapor são determinados por (Jumah et al., 1996):

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \times 10^{-2} T_{abs} - 3,5047 \times 10^{-5} T_{abs}^2 + 3,6010 \times 10^{-8} T_{abs}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.19)$$

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \times 10^{-3} T_{abs} + 0,84386 \times 10^{-6} T_{abs}^2 - 0,26966 \times 10^{-9} T_{abs}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.20)$$

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor utilizou-se a equação apresentada por Almeida (2009), que mostrou resultados coerentes e fisicamente reais. A Equação (3.21)

pode ser usada para dutos não circulares de forma retangular, similar à geometria do tijolo furado, objeto deste estudo:

$$h_c = (k_a / D_h)(0,023Re^{4/5}Pr^{1/3}) \quad (3.21)$$

onde:

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \text{ (para dutos em forma retangular, que é o caso de tijolo furado) é o diâmetro hidráulico,}$$

comprimento característico do tijolo (em forma de paralelepípedo);

$$Re = \frac{\rho_a w_a R_l}{\mu_a} \text{ é o número de Reynolds;}$$

$$Pr = \frac{c_a \mu_a}{k_a} \text{ é o número de Prandtl.}$$

No cálculo do diâmetro hidráulico  $a$  e  $b$  são as dimensões da seção retangular e  $n$  é o número de dutos internos. A velocidade da vagoneta usada nas simulações foi  $u_p = 0,00088$  m/s, tendo como base dados experimentais observados no processo de secagem em um secador industrial tipo túnel. O tempo de secagem é de aproximadamente vinte e três horas.

Para a pesquisa o secador foi dividido em três seções. As condições iniciais e de contorno a seguir são mostradas esquematicamente na Figura 3.10:

$$\bar{M}(y, z = 0, t = 0) = \bar{M}_0$$

$$\bar{\theta}(y, z = 0, t = 0) = \bar{\theta}_0$$

$$T(y = 0, z < L/3, t) = T_1$$

$$\tilde{x}(y = 0, z < L/3, t) = \tilde{x}_1$$

$$T(y = 0, L/3 \leq z < L/1,5, t) = T_2$$

$$\tilde{x}(y = 0, L/3 \leq z < L/1,5, t) = \tilde{x}_2$$

$$T(y = 0, L/1,5 \leq z < L, t) = T_3$$

$$\tilde{x}(y = 0, L/1,5 \leq z < L, t) = \tilde{x}_3$$

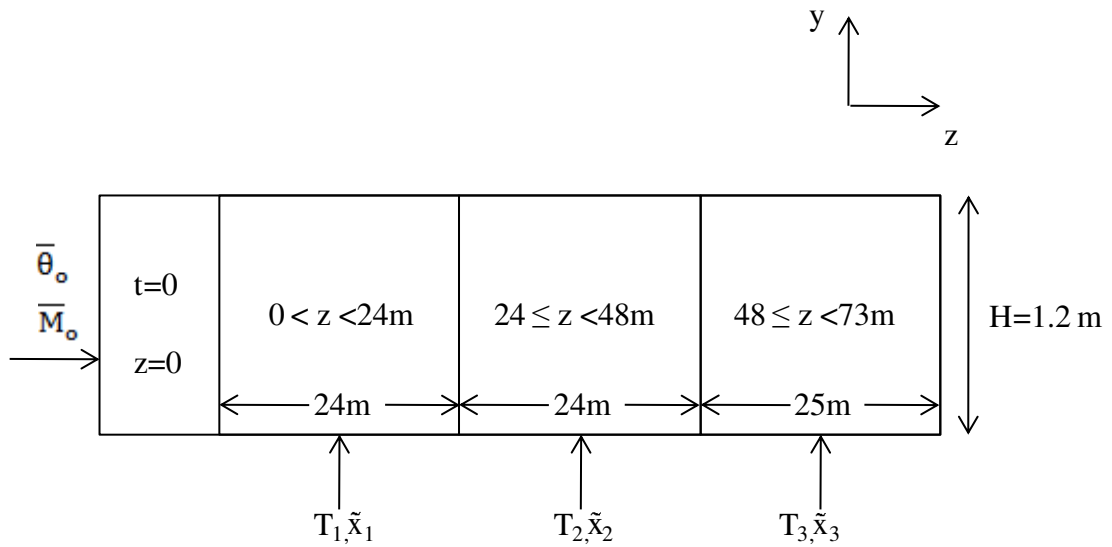


Figura 3.10 – Esquema das condições iniciais e de contorno no secador.

### 3.4 Solução numérica do modelo proposto

A solução do problema transiente abordado neste trabalho foi obtida utilizando-se o método numérico de volumes finitos. (Maliska, 1995; Pantankar, 1980) A Figura 3.11 ilustra um esquema numérico e o volume de controle analisados neste trabalho.

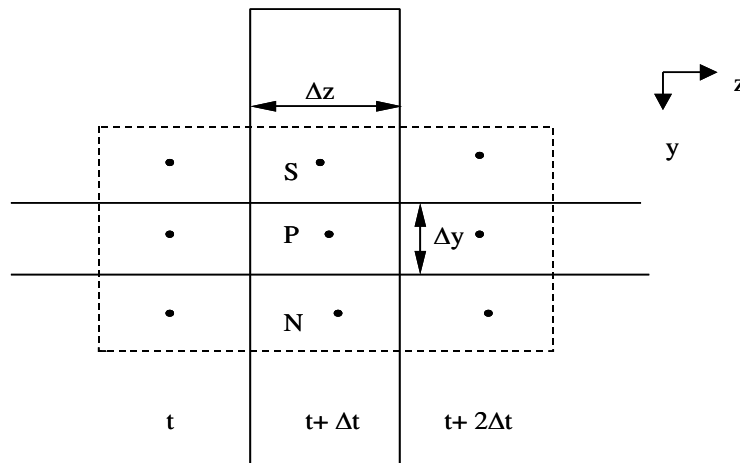


Figura 3.11 - Esquema numérico e o volume de controle utilizado.

Após a integração das equações diferenciais parciais, (Equação 3.4, 3.7, 3.8, 3.10), no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como segue.

• **Balço de energia para o ar**

A Equação (3.4) é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left( \frac{w_a}{\varepsilon} \right) \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.22)$$

Integrado no volume e no tempo, tem-se:

$$(T_p - T_p^o) \Delta x \Delta y \Delta z + \left( \frac{w_a}{\varepsilon} \right) (T_n - T_s) \Delta t \Delta x \Delta z = - \frac{A^* h_c (T_p - \bar{\theta}_p) \Delta x \Delta y \Delta z}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.23)$$

Para o esquema upwind, pode-se escrever a Equação (3.23) na forma:

$$\left( \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \right) T_p = \left( \frac{w_a}{\varepsilon} \right) T_s + \left( \frac{\Delta y}{\Delta t} \right) T_p^o + \left( \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \right) \bar{\theta}_p \quad (2.24)$$

Escrevendo numa forma geral, obtém-se:

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^T \quad (3.25)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.25a)$$

$$A_s = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.25b)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.25c)$$



$$S_c^T = \frac{A^* h_c \Delta y \bar{\theta}_p}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.25d)$$

Para as equações que seguem o procedimento é análogo.

• **Balço de energia para o produto**

Aplicando o procedimento anterior para a Equação(3.6), tem-se:

$$A_p \bar{\theta}_p = A_p^o \bar{\theta}_p^o + S_c^{\bar{\theta}} \quad (3.26)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_p}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z \quad (3.26a)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.26b)$$

$$S_c^{\bar{\theta}} = \frac{(h_{fg}^* + c_v T_p) \rho_p}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z + \frac{h_c A^* T_p \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.26c)$$

sendo  $\Delta t_m = (npy-1) \Delta t$ , onde npy é o número de pontos nodais na direção y.

• **Balço de massa do ar**

Seguindo o mesmo procedimento para a Equação (3.7):

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.27)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.27a)$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.27b)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.27c)$$

$$S_c^x = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.27d)$$

#### • Balanço de massa do produto

Da mesma forma para a Equação (3.9):

$$A_p \bar{M}_p = A_p^o \bar{M}_p^o + S_c^{\bar{M}} \quad (3.28)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.28a)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.28b)$$

$$S_c^{\bar{M}} = (-[c_1 k_1 \exp(k_1 t) + c_2 k_2 \exp(k_2 t)](M_o - M_e)) \Delta z \quad (3.28c)$$

É importante ressaltar que os gradientes de umidade e temperatura do ar e produto ocorrem nas direções do fluxo de ar e saída do secador. Nenhuma mudança no ar e tijolo

ocorre na direção perpendicular às direções citadas. Isso se deve ao fato do secador ser considerado como uma única vagoneta já que as vagonetas são introduzidas uma a uma preenchendo todo o seu comprimento.

Nas equações 3.5 e 3.8 utilizou-se o esquema upwind como função de interpolação para os termos convectivos e um procedimento parabólico na direção  $z$  (Patankar, 1980; Maliska, 2004).

Para a obtenção dos resultados foi desenvolvido um programa no ambiente Mathematica® e usado uma malha de 20 pontos nodais, ver Figura 3.12. O programa encontra-se em anexo.

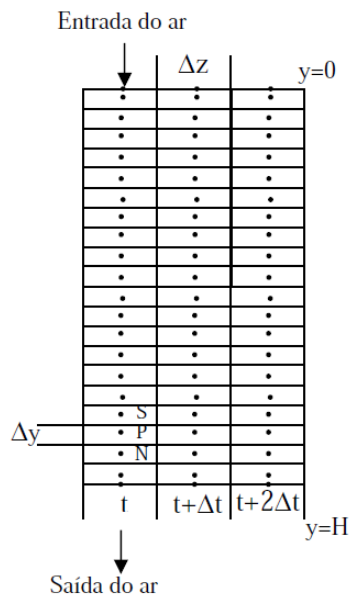


Figura 3.12 – Malha com 20 pontos nodais.

### 3.5 Simulação da condensação de água

Almeida (2009) incorporou no código usado em seu trabalho a simulação de condensação da água. Depois de  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ ,  $T$  e  $\bar{x}$  serem calculados em cada posição no leito e em qualquer tempo do processo, a umidade relativa é calculada. Se o seu valor é maior do que 1, a saturação ou a supersaturação é assumida e a condensação é modelada. A condensação

pode ocorrer quando uma alta quantidade de umidade é carregada pelo ar, o qual é resfriado quando passa através do tijolo.

Para modelar a condensação, será utilizado o mesmo procedimento usado por Almeida (2009). Assim:

- Em um determinado ponto do leito, calculados  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ , T e  $\tilde{x}$ , determina-se, UR e Pvs, usando as equações 3.15 e 3.16;
- Se  $UR > 1$  faz-se  $\tilde{x}_a = \tilde{x}_a - \Delta\tilde{x}_a$  e prossegue-se ao passo c; se  $UR \leq 1$  para a condensação e vá para um novo ponto nodal;
- Com o novo  $\tilde{x}_a$ , determina-se os novos valores de  $\bar{M}$ ,  $\bar{\theta}$ , T e  $\tilde{x}$ ;
- Com os novos valores de T, determina-se Pvs e a UR e retorna-se ao passo b.

O novo valor de T é calculado por:

$$T = \frac{\frac{\rho_a w_a \Delta z}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x}) T_{ant} + \rho_p \Delta y (c_p + c_w \bar{M}_{ant}) \bar{\theta}_{ant}}{\rho_a w_a \frac{dz}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x})} + \frac{-\rho_p \Delta y (c_p + c_w M_o) T_{ant} - \rho_a w_a \left(\frac{\Delta z}{u_p}\right) h_{fg}^* (\tilde{x}_{ant} - \tilde{x})}{\rho_a w_a \frac{\Delta z}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x})} \quad (3.29)$$

O subscrito “ant” significa o valor calculado da grandeza antes de ser verificada a existência da condensação ( $UR < 1$ ).

O novo valor de  $\bar{M}$  é dado por:

$$\bar{M} = \bar{M}_{ant} + \left(\frac{\rho_a w_a \Delta z}{\rho_p u_p \Delta y}\right) \cdot (\tilde{x}_{ant} - \tilde{x}) \quad (3.30)$$

Um valor  $\Delta x_a = 10^{-8}$  kg/kg foi usado na simulação.

### 3.6 Casos estudados

Neste estudo foram analisados cinco casos onde se variou as condições do ar na entrada das três secções do secador, mantendo constante a velocidade do mesmo. Um melhor detalhamento está mostrado na Tabela 3.1, a seguir.

Tabela 3.1 - Condições do ar de secagem e do produto na entrada do secador para quatro casos estudados.

Caso	Ar							Produto	
	T <sub>1</sub> (°C)	T <sub>2</sub> (°C)	T <sub>3</sub> (°C)	$\tilde{x}_1$ (kg/kg)	$\tilde{x}_2$ (kg/kg)	$\tilde{x}_3$ (kg/kg)	w (m/s)	M <sub>o</sub> (kg/kg)	$\theta_o$ (°C)
1	60	70	80	0,01697	0,0149	0,01367	20	0,14795	20,5
2	50	60	70	0,01617	0,01697	0,0149	20	0,13969	20,6
3	50	70	90	0,01617	0,0149	0,01454	20	0,13969	20,6
4	60	80	100	0,01697	0,01367	0,0114	20	0,14795	20,5

A Tabela 3.2 mostra os parâmetros da Equação (3.8) para o cálculo do teor de umidade reportado por Silva (2009).

Tabela 3.2 - Parâmetros da Equação (3.8).

T(°C)	Parâmetros					
	c <sub>1</sub>	k <sub>1</sub>	c <sub>2</sub>	k <sub>2</sub>	M <sub>o</sub> (kg/kg)	M <sub>e</sub> (kg/kg)
50	0,576178	-0,0047115	0,4822324	-0,0047112	0,13969	0,00011
60	0,54774	-0,0059453	0,5133493	-0,0059452	0,14795	0,00268
70	-1,083353e-18	0,0067809	1,04505	-0,0070948	0,15414	0,00076
80	0,535201	-0,0091904	0,527668	-0,0091903	0,15248	0,00039
90	10,63554	-0,0142978	-9,613313	-0,0150184	0,15921	0,00151
100	4,879507	-0,0083828	-3,827964	-0,0078813	0,16903	0,00038

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção da água do tijolo cerâmico vazado, quatro casos foram escolhidos para simulação. A Tabela 3.1 apresenta todas as condições de secagem usadas neste trabalho.

Para validar a metodologia, foram comparados resultados numéricos do teor de umidade do tijolo cerâmico vazado com dados experimentais de secagem em estufa obtidos na literatura (Silva, 2009) para secagem em fluxos cruzados. A comparação é possível, pois a velocidade da vagoneta é próxima de zero, que é similar a uma secagem em leito fixo. A análise tem como base a primeira camada de tijolos do leito ( $y = 0$ ), o que possibilita uma melhor comparação e conseqüentemente uma melhor aproximação dos resultados. A Figura 4.1 contempla as curvas experimentais e a numérica para o teor de umidade ao longo do tempo, para o caso 1. O modelo se ajusta bem e apresenta pequenos erros. O que se pode observar é que para este caso, ao final da primeira secção do secador, que tem comprimento de 24m, o produto praticamente já atingiu a umidade de equilíbrio.

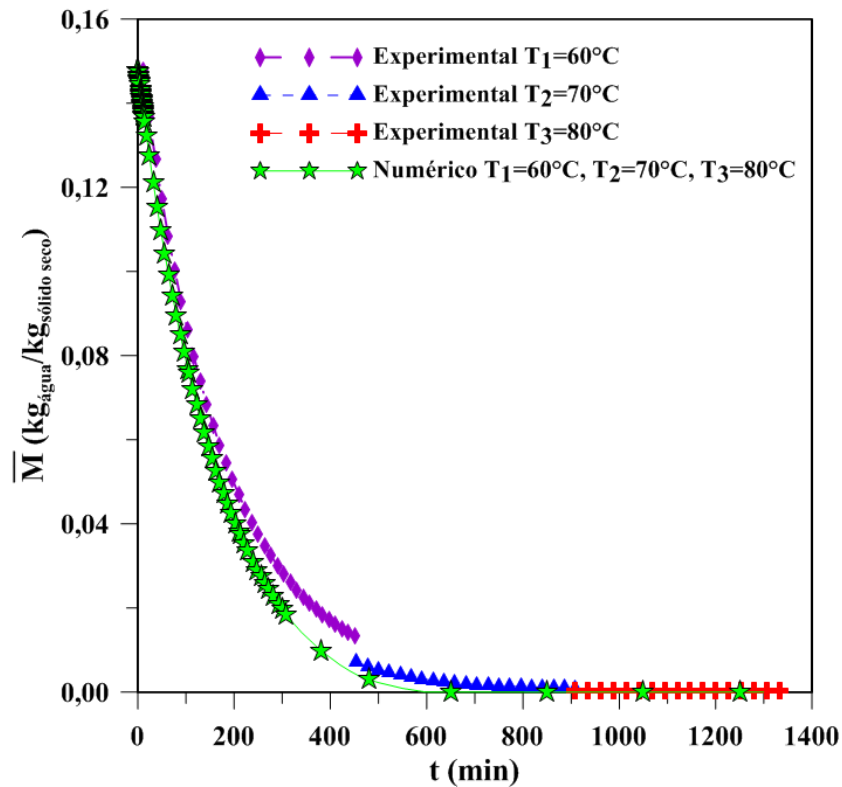


Figura 4.1 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) do teor de umidade de tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

A seguir é apresentada a Figura 4.2 que compara os dados numéricos e experimentais da temperatura dos tijolos cerâmicos vazados durante o processo de secagem para o primeiro caso. A comparação é feita apenas para a primeira secção do secador onde as condições de entrada do ar tanto numérico quanto experimental são iguais. A diferença observada entre os dados numéricos e experimentais pode ser explicada pelo fato de que a velocidade do ar de secagem que foi usada na simulação ser bem maior do que a velocidade do ar na estufa, o que aumenta consideravelmente o coeficiente de transferência de calor. Além disso, pode ser atribuído também aos procedimentos usados na realização dos experimentos, tais como posição do tijolo na estufa.

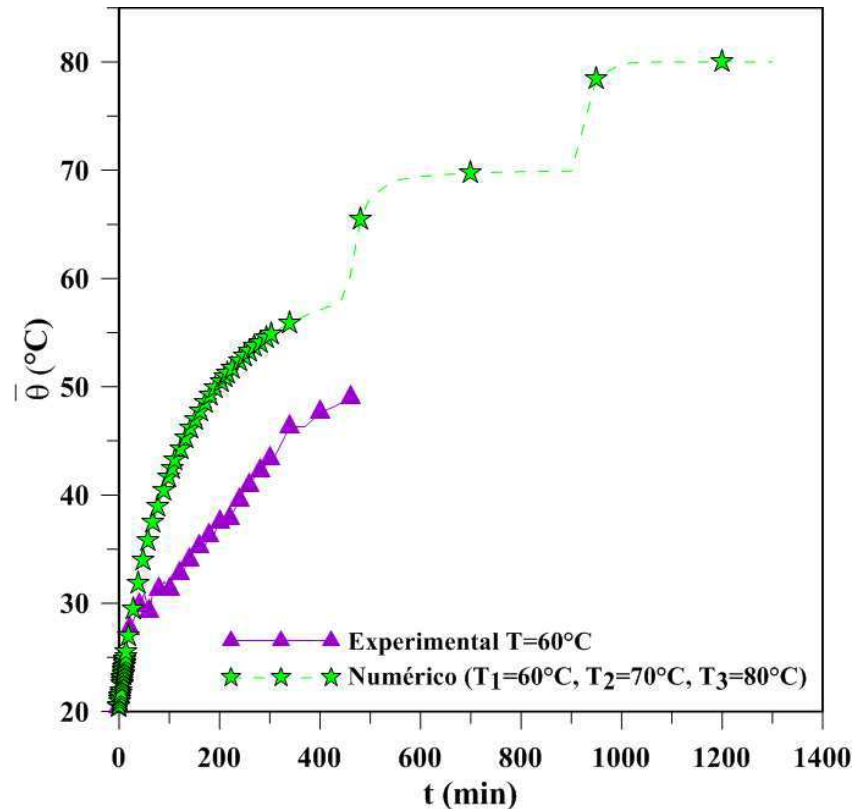


Figura 4.2 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) da temperatura do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

A Figura 4.3 e Figuras 4.4 a 4.7 mostram a análise feita em função do tempo para a primeira ( $y=0$ ) e a última ( $y=H$ ) camada de tijolos relativos ao primeiro caso (vide Tabela 3.1). Nas figuras são mostrados os valores do teor de umidade médio do tijolo ( $\bar{M}$ ), temperatura do produto ( $\bar{\theta}$ ), umidade relativa (UR), razão de umidade ( $x$ ) e pressão de vapor saturado ( $P_{vs}$ ) todos em relação ao tempo, respectivamente.

É possível observar que a primeira e a última camada secam de forma praticamente igual. Isto se deve ao fato de que a quantidade de umidade que é transferida para o ar no início do leito não é suficiente para diminuir seu potencial de secagem, e este consegue absorver da última camada praticamente a mesma quantidade de água da primeira. Este é um ponto interessante, pois esse ar ainda pode ser reutilizado, inclusive para secagem. Já a umidade relativa na primeira camada ( $y=0$ ) praticamente não varia, enquanto que na última ( $y=H$ ) da primeira secção do secador evidencia-se um pico que decresce ao longo do tempo. Este fenômeno se deve ao fato de que o ar que chega à última camada do leito no início do processo, tem recebido uma grande quantidade de água proveniente das primeiras camadas



dos tijolos. Para as demais secções, a variação da umidade relativa nas últimas camadas é muito pequena. E como já era de se esperar, tanto a primeira quanto a última camada entram em equilíbrio ao fim do tempo de secagem. Em relação à razão de umidade (umidade absoluta) nota-se que na última camada ( $y=H$ ) da primeira secção há um súbito aumento, mas logo em seguida decresce. Isto porque o ar chega mais úmido nas últimas camadas e a razão entre a massa de vapor e a massa de ar seco aumenta. A pressão de vapor saturado em  $y=0$  é maior do que em  $y=H$ , pelos mesmos motivos que atingem o teor de umidade e a temperatura do produto, citados anteriormente.

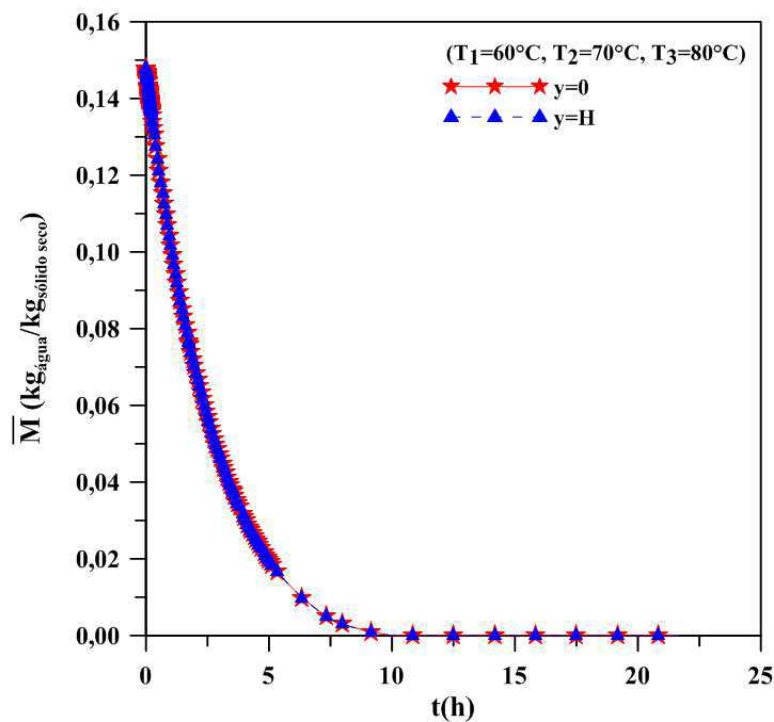


Figura 4.3 - Teor de umidade do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

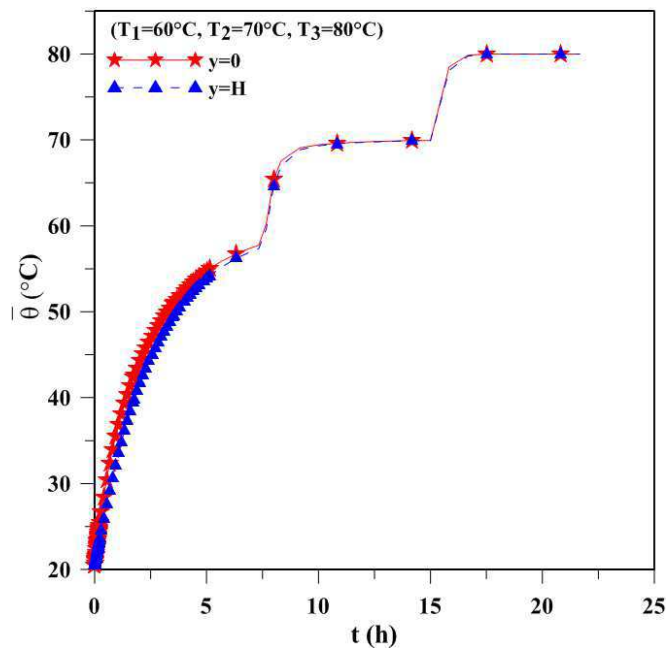


Figura 4.4 - Temperatura do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).

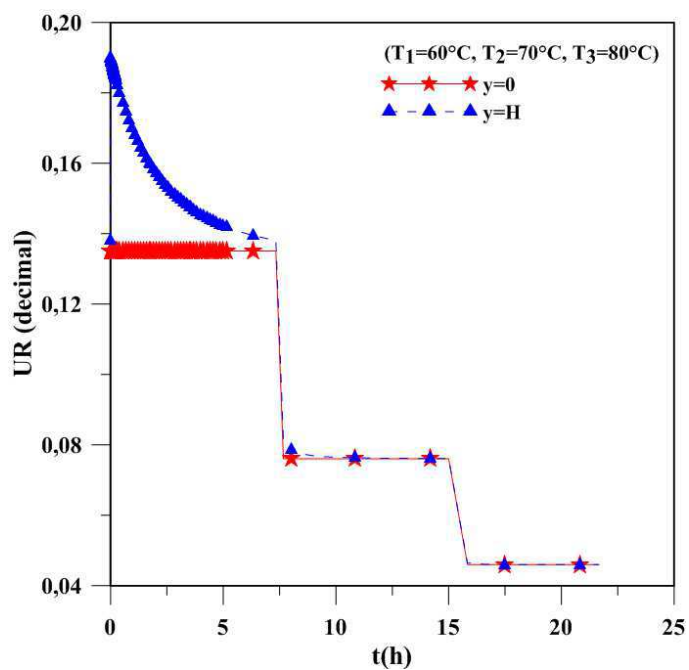


Figura 4.5 - Umidade relativa do ar na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).

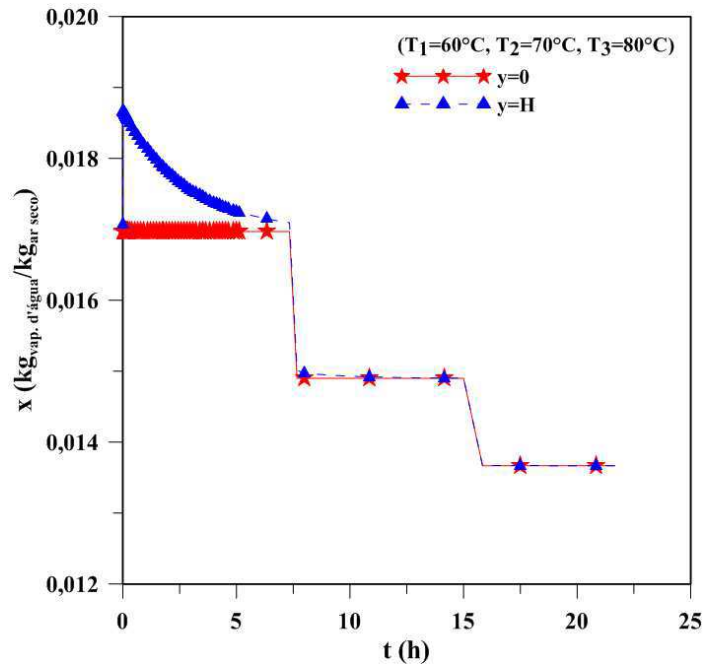


Figura 4.6 - Razão de umidade do ar na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).

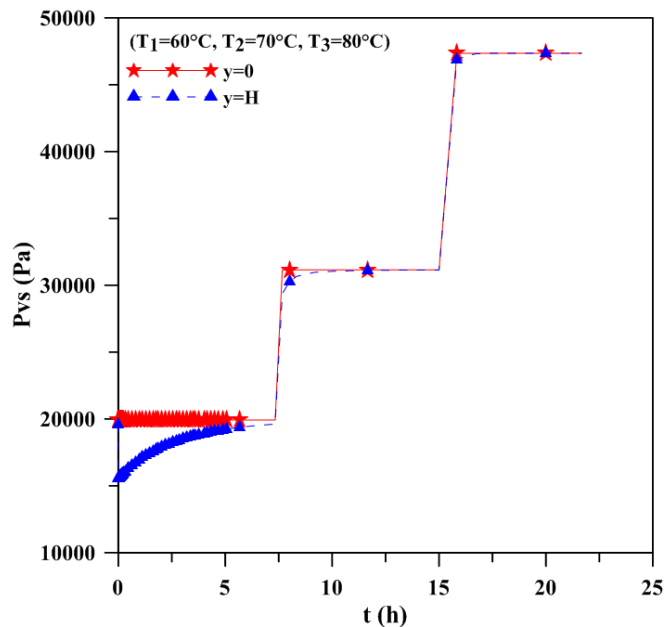


Figura 4.7 - Pressão de vapor saturado na primeira camada ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. (Caso 1).

As Figuras 4.8 e 4.9 ilustram as faces das amostras usadas no trabalho de Silva (2009) para a temperatura de  $50^\circ\text{C}$  em diferentes instantes do processo de secagem. Ele verificou que

secagens a baixas temperaturas e altas umidades relativas implicam em produto de melhor qualidade, contudo o tempo de secagem é mais elevado, quando comparado à secagem em elevadas temperaturas e baixas umidades relativas. Nestas figuras verifica-se claramente a não-existência de trincas ou fissuras macroscópica que podem comprometer o produto durante o processo de queima.



(a)

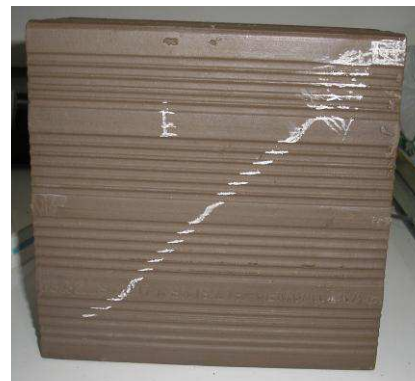


(b)

Figura 4.8 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t=0$ ) à temperatura constante de  $50^{\circ}\text{C}$  na estufa. a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).



(a)



(b)

Figura 4.9 - Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 260$  minutos ) na temperatura constante de  $50^{\circ}\text{C}$  na estufa ( $\theta_{ij} = 33,6^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{amb.} = 26,4^{\circ}\text{C}$ ,  $UR_{amb.} = 74\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).

Nas Figuras 4.10 a 4.15, são mostrados, respectivamente, os valores do teor de umidade ( $\bar{M}$ ), temperatura do produto ( $\bar{\theta}$ ), temperatura do ar de secagem (T), umidade relativa (UR), razão de umidade (x) e pressão de vapor saturado (Pvs) em tempos diferentes ao longo do leito. Nota-se nos tempos observados que tanto o teor de umidade quanto a temperatura do produto praticamente não variam ao longo do leito, ou seja, não se verifica a presença de altos gradientes térmicos e hídricos durante o processo de secagem. Isso pode ser explicado pelo fato de que a temperatura do ar de secagem usada na simulação foi aumentada gradativamente. Muito embora a umidade relativa do ar de secagem seja baixa.

O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumentam a taxa de secagem e o tijolo alcança mais depressa a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Não são aconselháveis altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do tijolo porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no tijolo, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo e conseqüentemente inviabilizando a sua comercialização. É de grande importância uma secagem prévia, controlada. Se a secagem não for uniforme, certamente aparecerão distorções nas peças, por outro lado se for muito lenta, tornará o processo produtivo antieconômico (Nascimento, 2002).

De acordo com Cadé et al. (2005), durante a secagem geram-se tensão de sentido contrário entre a camada externa e a interna do sólido, e quanto maior a perda de água, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com possibilidade de trincar.

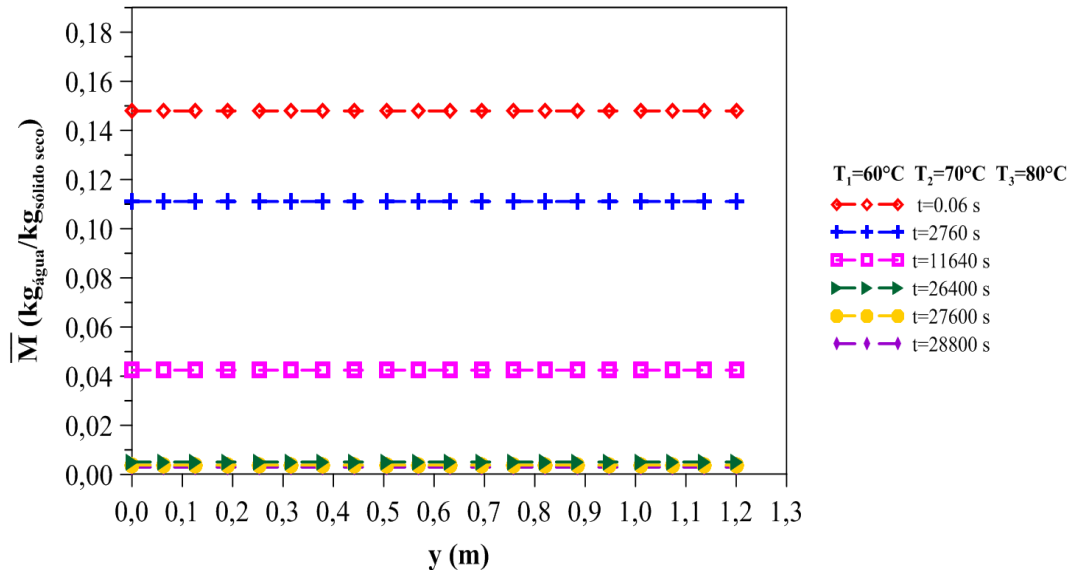


Figura 4.10 - Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

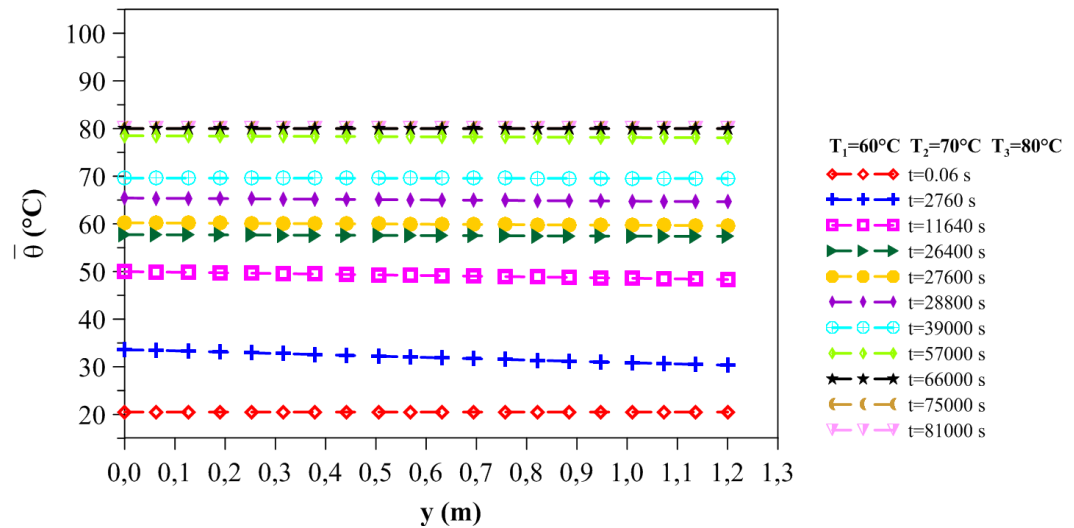


Figura 4.11 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

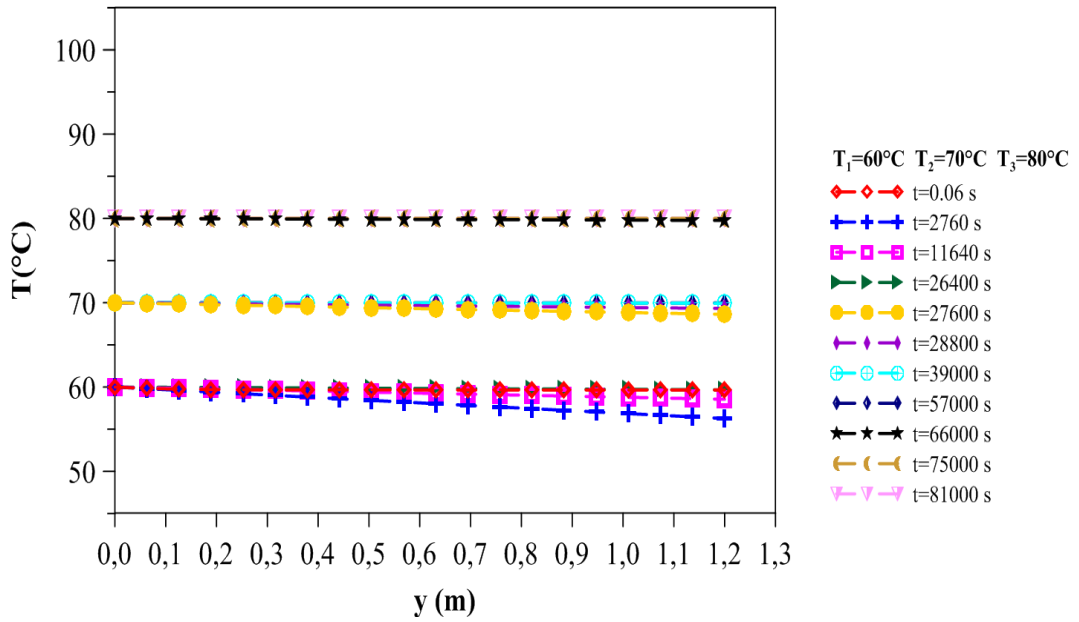


Figura 4.12 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

Em relação à umidade relativa (Figura 4.14) observa-se que no início do processo ( $t=11640\text{s}$ ) há uma pequena variação da mesma ao longo do leito, em decorrência da quantidade de água recebida dos tijolos. Isto provoca uma pequena diminuição da temperatura do ar de secagem, conforme pode ser observado na Figura 4.13.

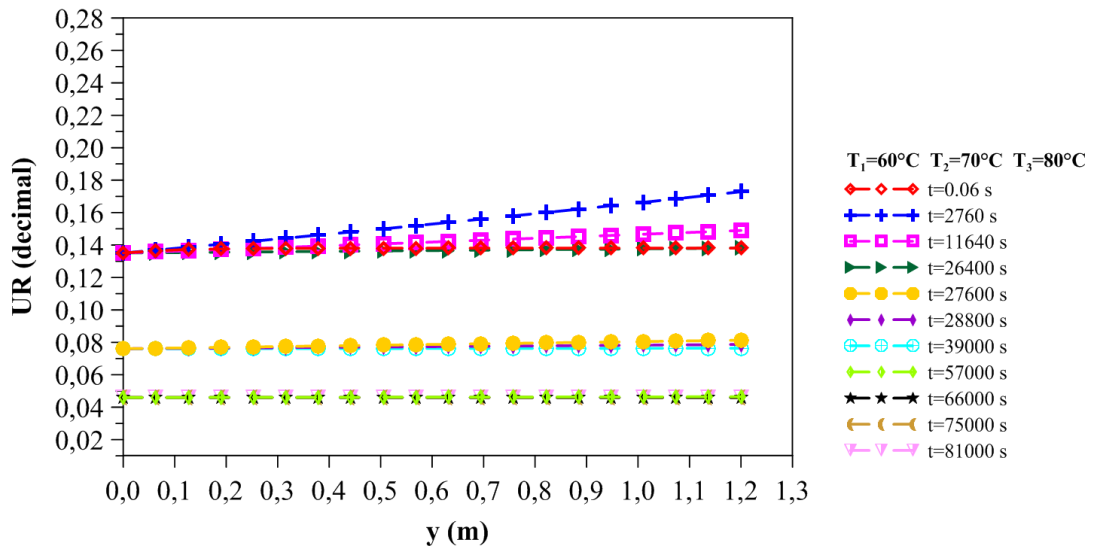


Figura 4.13 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

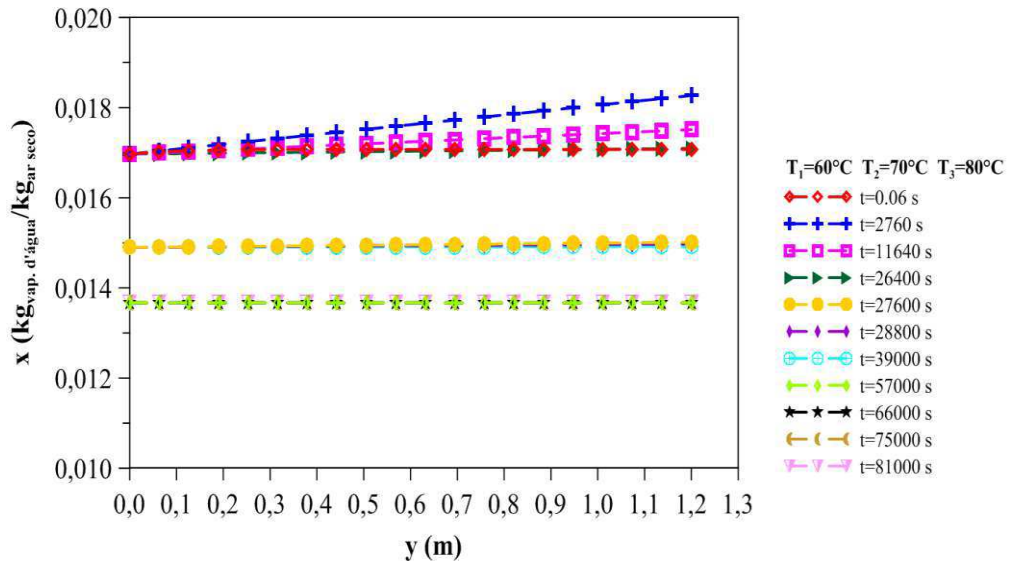


Figura 4.14 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).

Na Figura 4.15 observa-se que ocorre uma perceptível variação na razão de umidade logo no início do leito o que já era de se esperar e se explica pelos mesmos motivos referentes à umidade relativa. No que diz respeito à pressão de vapor saturado (Figura 4.16), tem-se uma pequena diminuição desta ao longo da posição no leito, devido à redução da temperatura do ar de secagem dentro do leito gerada pelo fornecimento de energia ao produto e para evaporar a água na superfície do mesmo.

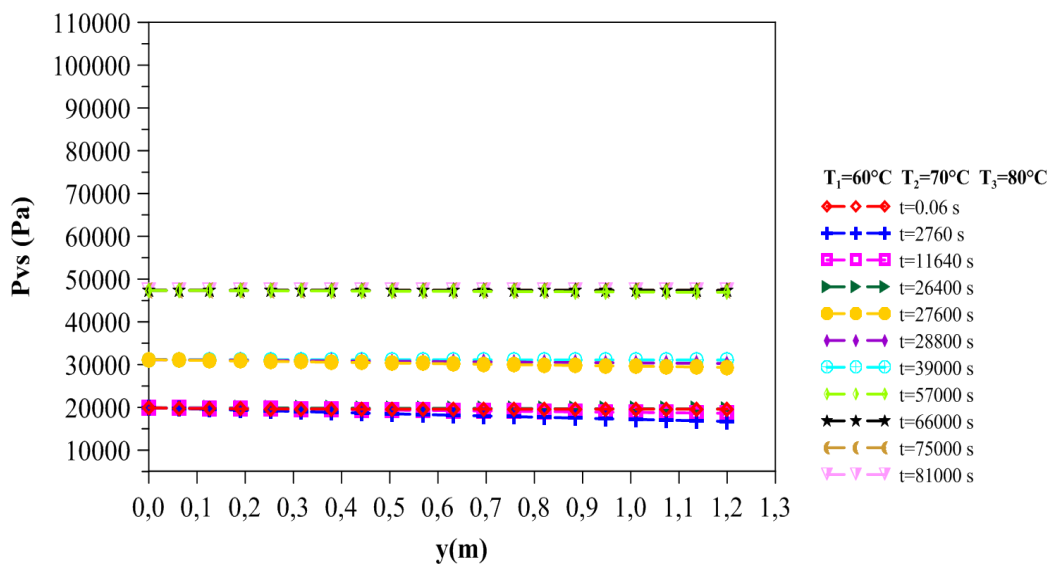


Figura 4.15 - Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 1).



Na Figura 4.16a-c são apresentados os gráficos de comparação dos teores de umidade do tijolo, numérico e experimental (Silva, 2009) dos casos dois ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=60^\circ\text{C}$ ,  $T_3=70^\circ\text{C}$ ), três ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=70^\circ\text{C}$ ,  $T_3=90^\circ\text{C}$ ) e quatro ( $T_1=60^\circ\text{C}$ ,  $T_2=80^\circ\text{C}$ ,  $T_3=100^\circ\text{C}$ ), respectivamente para secagem convectiva de tijolos cerâmicos vazados. Esta comparação é feita na posição  $y=0$ . Como se pode notar o modelo numérico apresenta um bom ajuste em todos os casos analisados neste estudo, o que valida a metodologia usada na presente pesquisa.

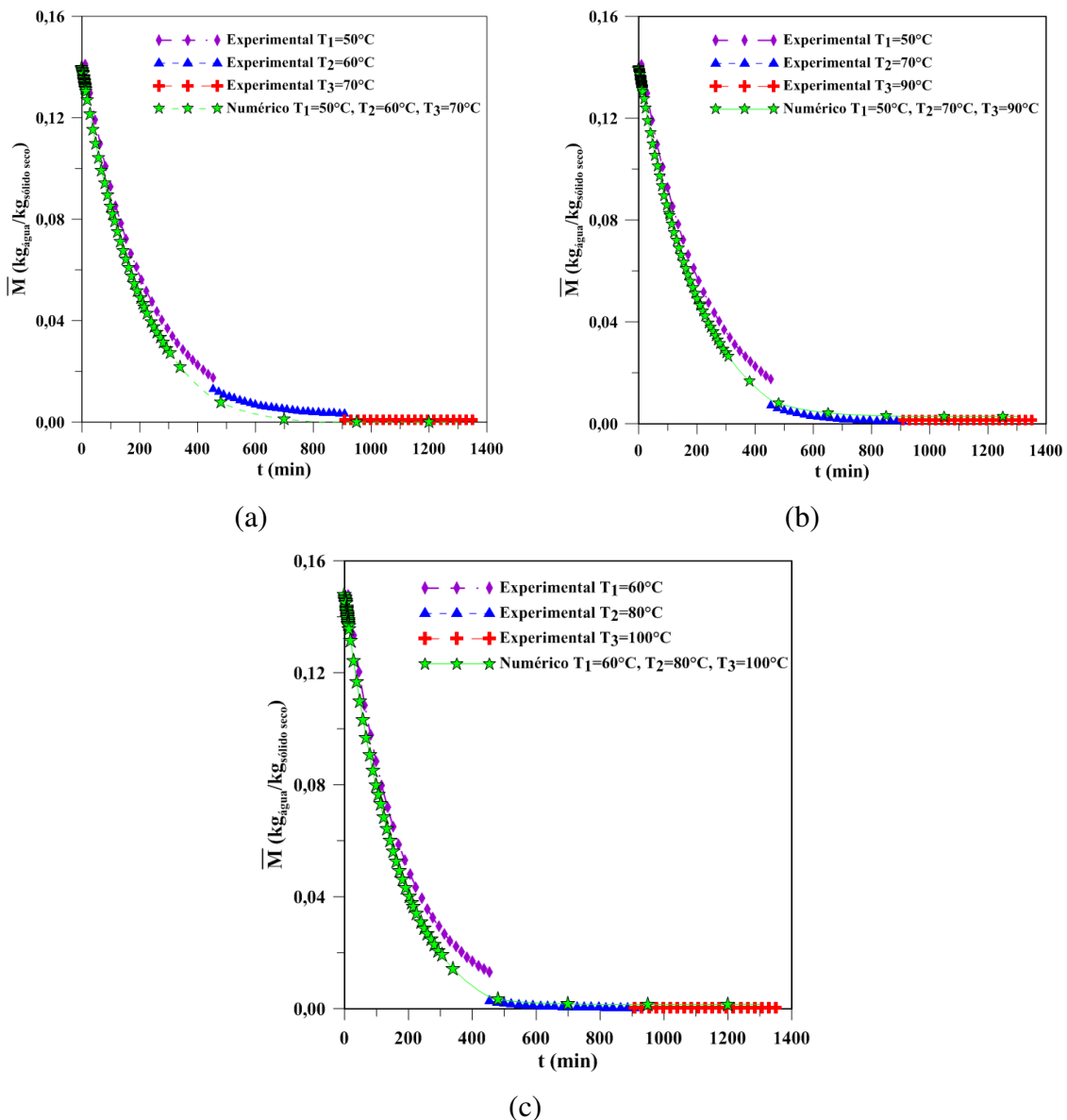


Figura 4.16- Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) do teor de umidade do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

Já na Figura 4.17a - c são apresentados os gráficos da temperatura do produto, numérico e experimental (Silva, 2009) dos casos dois ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=60^\circ\text{C}$ ,  $T_3=70^\circ\text{C}$ ), três ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=70^\circ\text{C}$ ,  $T_3=90^\circ\text{C}$ ) e quatro ( $T_1=60^\circ\text{C}$ ,  $T_2=80^\circ\text{C}$ ,  $T_3=100^\circ\text{C}$ ), respectivamente, para a secagem convectiva de tijolos cerâmicos vazados. Novamente verifica-se um relativo desvio entre os resultados, devido ao fato já explicado na Figura 4.2.

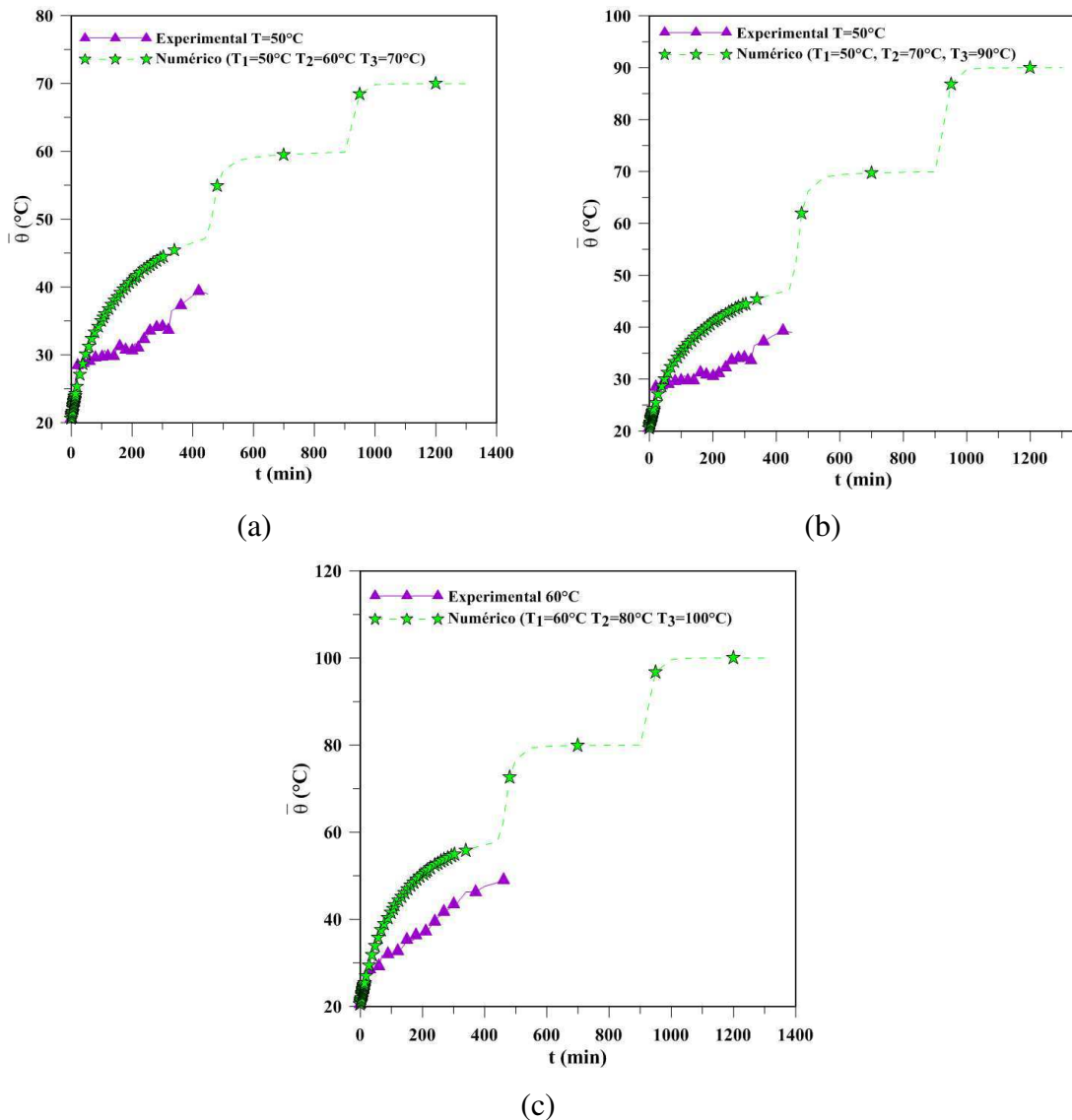


Figura 4.17 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) da temperatura do tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

É apresentado nas Figuras 4.18-4.21 um comparativo relativo a teor de umidade do produto, temperatura, umidade relativa, razão de umidade do produto, na posição inicial do leito ( $y=0$ ) e final ( $y=H$ ), ao longo do processo de secagem para a primeira secção do secador.

Analisando estas figuras verifica-se um comportamento similar ao apresentado para o Caso 1. Isto é, pequenos gradientes térmicos e hídricos ao longo do leito.

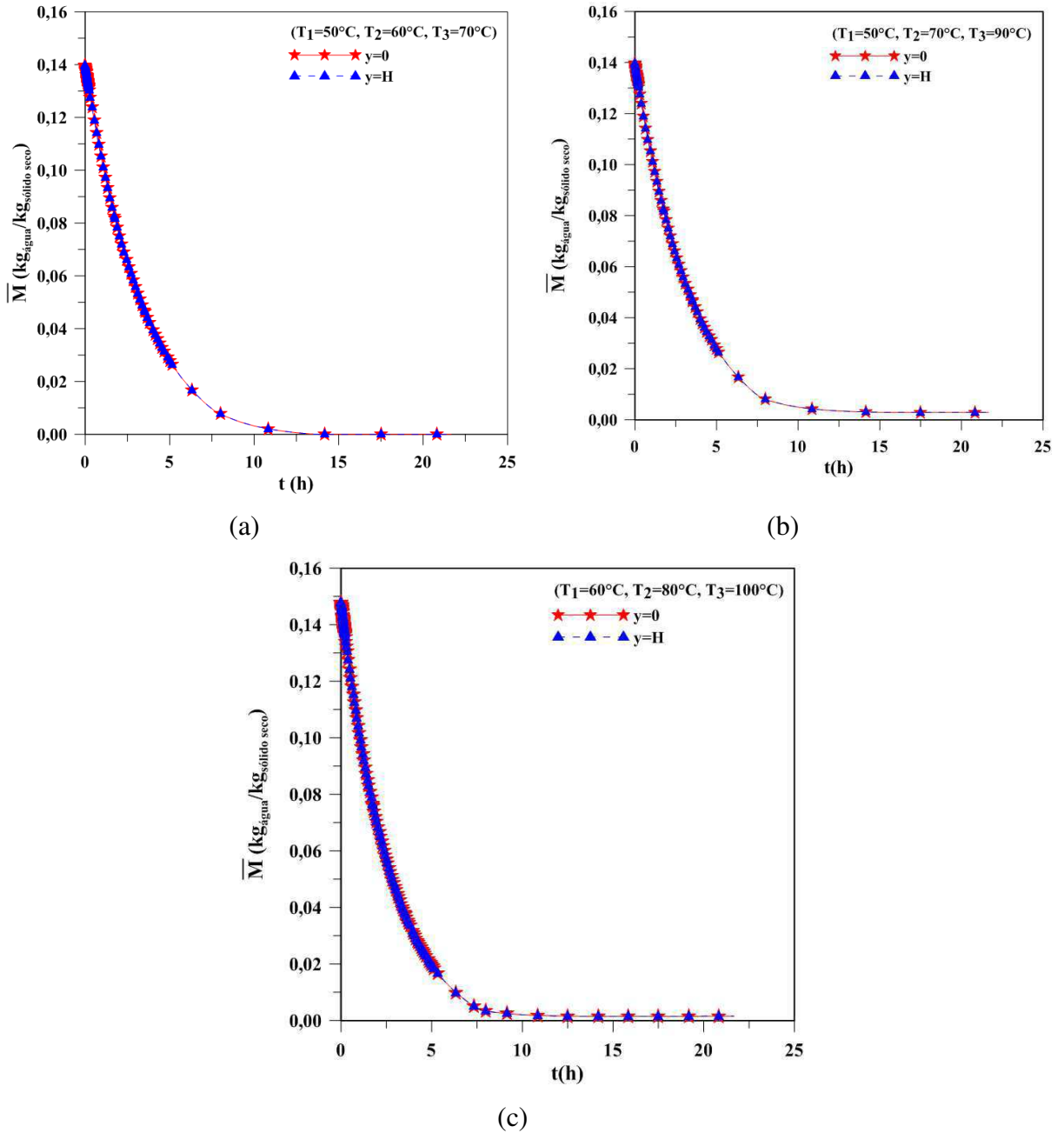


Figura 4.18 - Teor de umidade do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

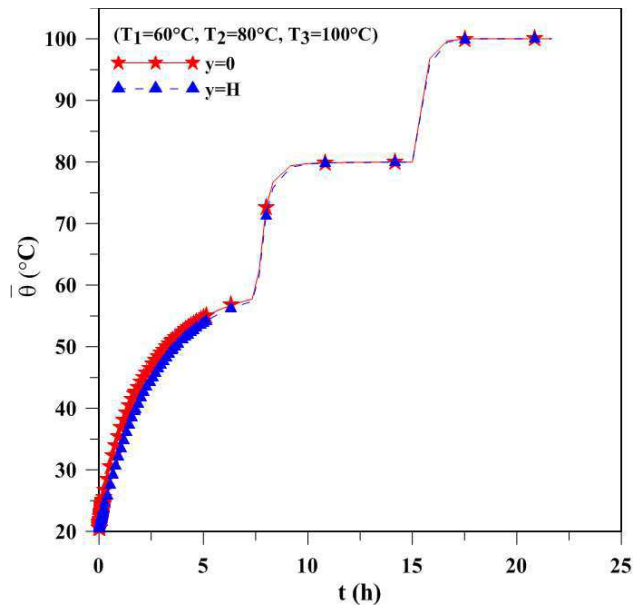
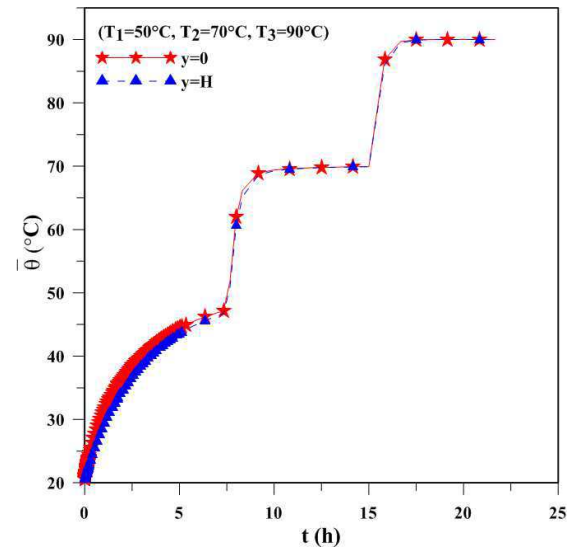
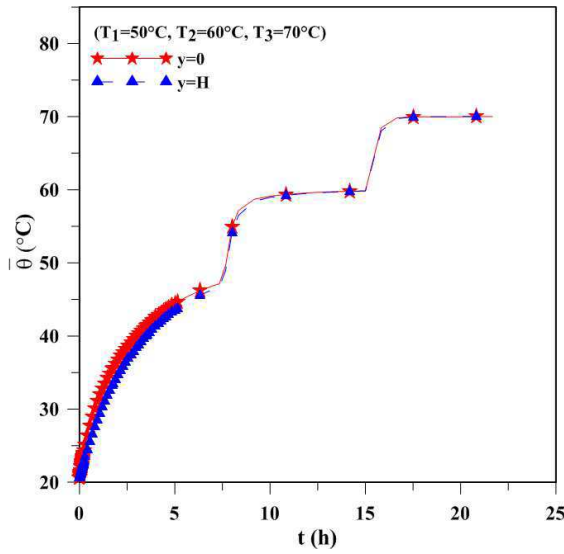


Figura 4.19 - Temperatura do produto na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

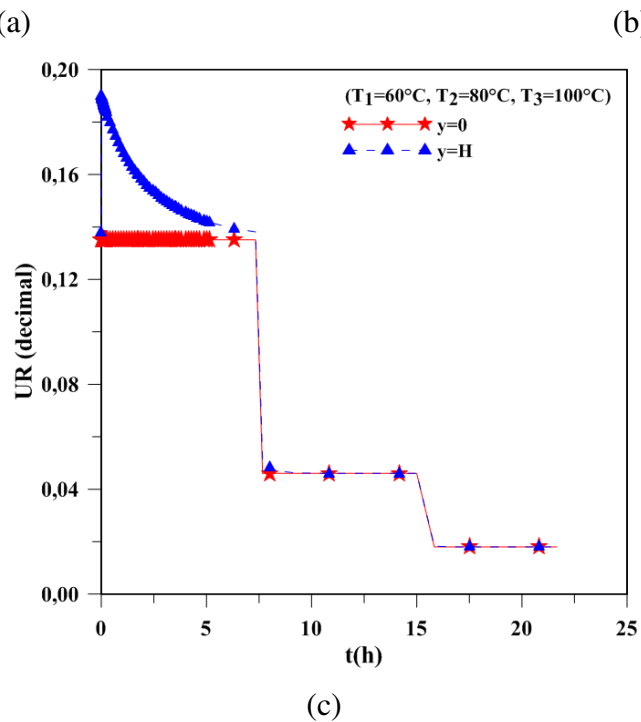
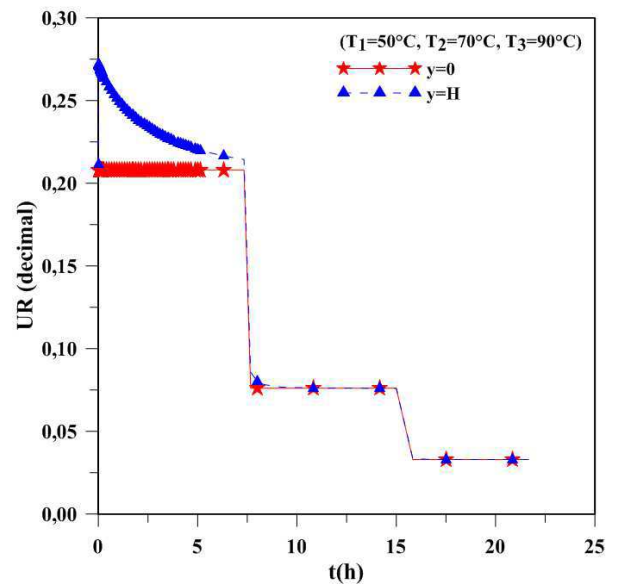
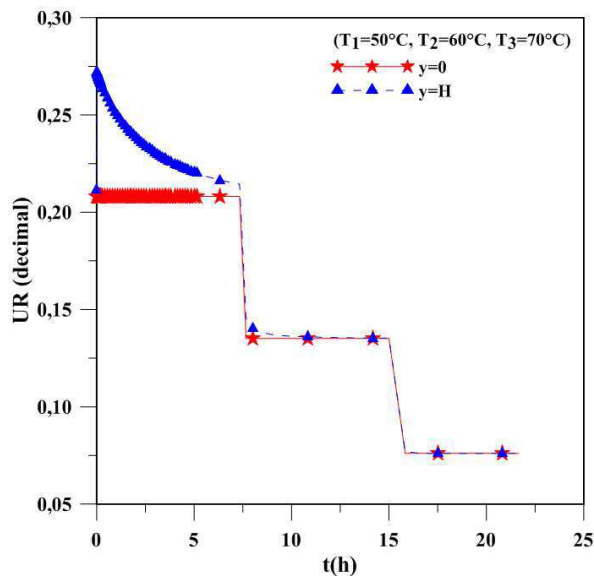


Figura 4.20 - Umidade relativa do ar na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

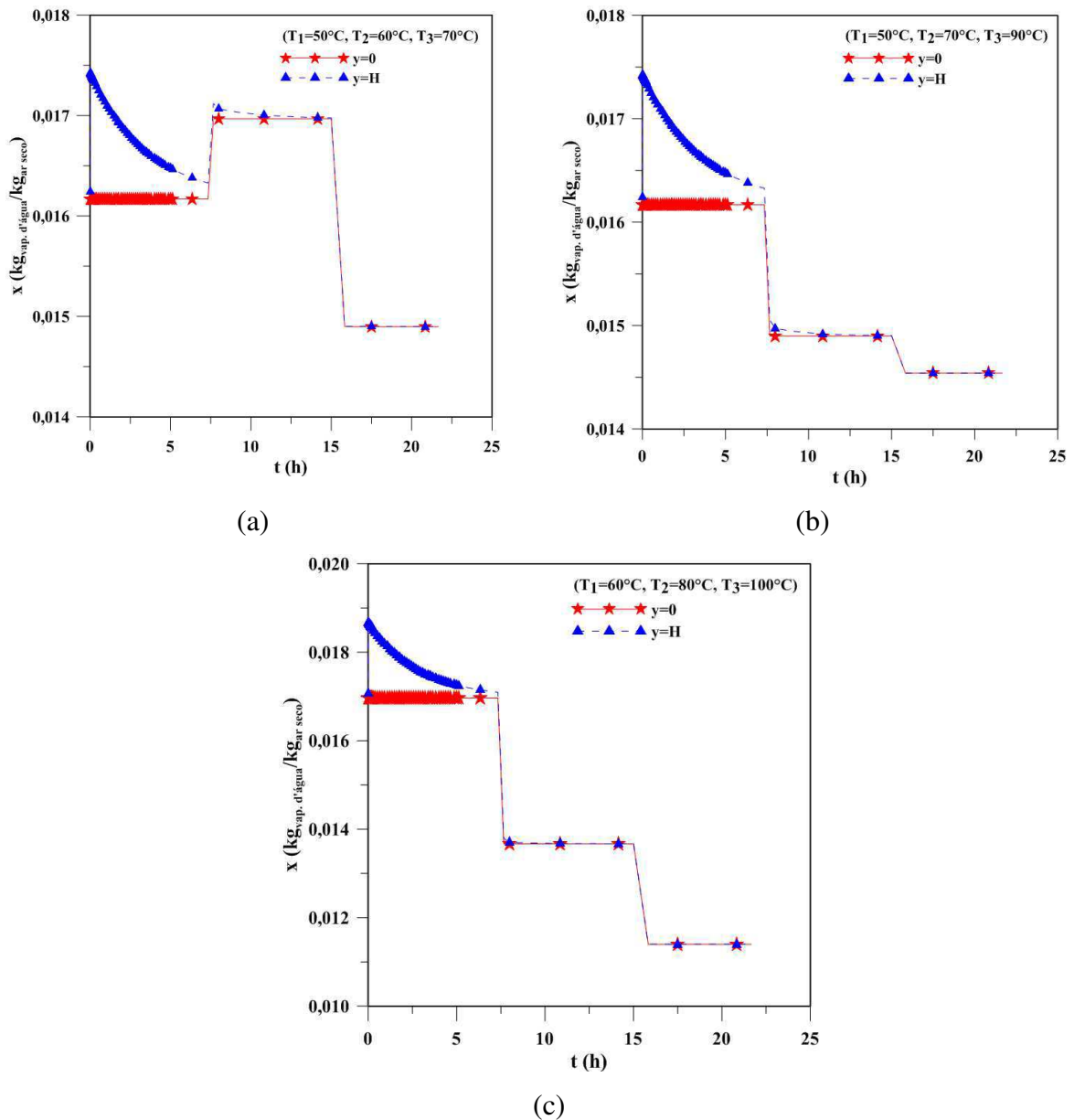


Figura 4.21 - Umidade absoluta do ar na primeira ( $y = 0$ ) e na última camada ( $y = H$ ) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

Nas Figuras 4.22 e 4.23 são mostradas fotos das faces frontal e esquerda das amostras usadas por Silva (2009) para a temperatura de  $60^\circ\text{C}$  antes de iniciar o processo de secagem ( $t=0$ ), e em um tempo posterior ( $t=290$  minutos)..



(a)



(b)

Figura 4.22 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t = 0$ ) à temperatura constante de  $60^{\circ}\text{C}$ . a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).



(a)



(b)

Figura 4.23 - Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 290$  minutos) na temperatura constante de  $60^{\circ}\text{C}$  na estufa ( $\theta_{\text{tij}} = 42,6,3^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{UR}_{\text{amb.}} = 77\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).

As Figuras 4.24 a 4.28 apresentam um comparativo entre o teor de umidade ( $\bar{M}$ ), a temperatura do produto ( $\bar{\theta}$ ), a temperatura do ar de secagem (T), a umidade relativa (UR) e razão de umidade (x) para os casos dois ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=60^\circ\text{C}$ ,  $T_3=70^\circ\text{C}$ ), três ( $T_1=50^\circ\text{C}$ ,  $T_2=70^\circ\text{C}$ ,  $T_3=90^\circ\text{C}$ ) e quatro ( $T_1=60^\circ\text{C}$ ,  $T_2=80^\circ\text{C}$ ,  $T_3=100^\circ\text{C}$ ), respectivamente. Nota-se que a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem têm forte influência na cinética do processo. Na Figura 4.26 para todos os casos é notável que logo no início do processo a temperatura do ar decresce um pouco ( $t=2760\text{s}$ ) no fim do leito ( $y=H$ ) e logo em seguida volta a crescer. Isso se deve ao fato de que o ar ao entrar em contato com o tijolo úmido e com temperatura bem inferior a sua, acaba por ceder energia ao produto buscando o equilíbrio. Conseqüentemente, o ar mais seco aquece e remove umidade do tijolo. Fato que pode ser observado na Figura 4.27. A umidade do ar na primeira secção do secador nas últimas camadas sofre um sensível aumento em decorrência da quantidade de água que ele retira das primeiras camadas do produto, chegando mais úmido ao fim do leito.



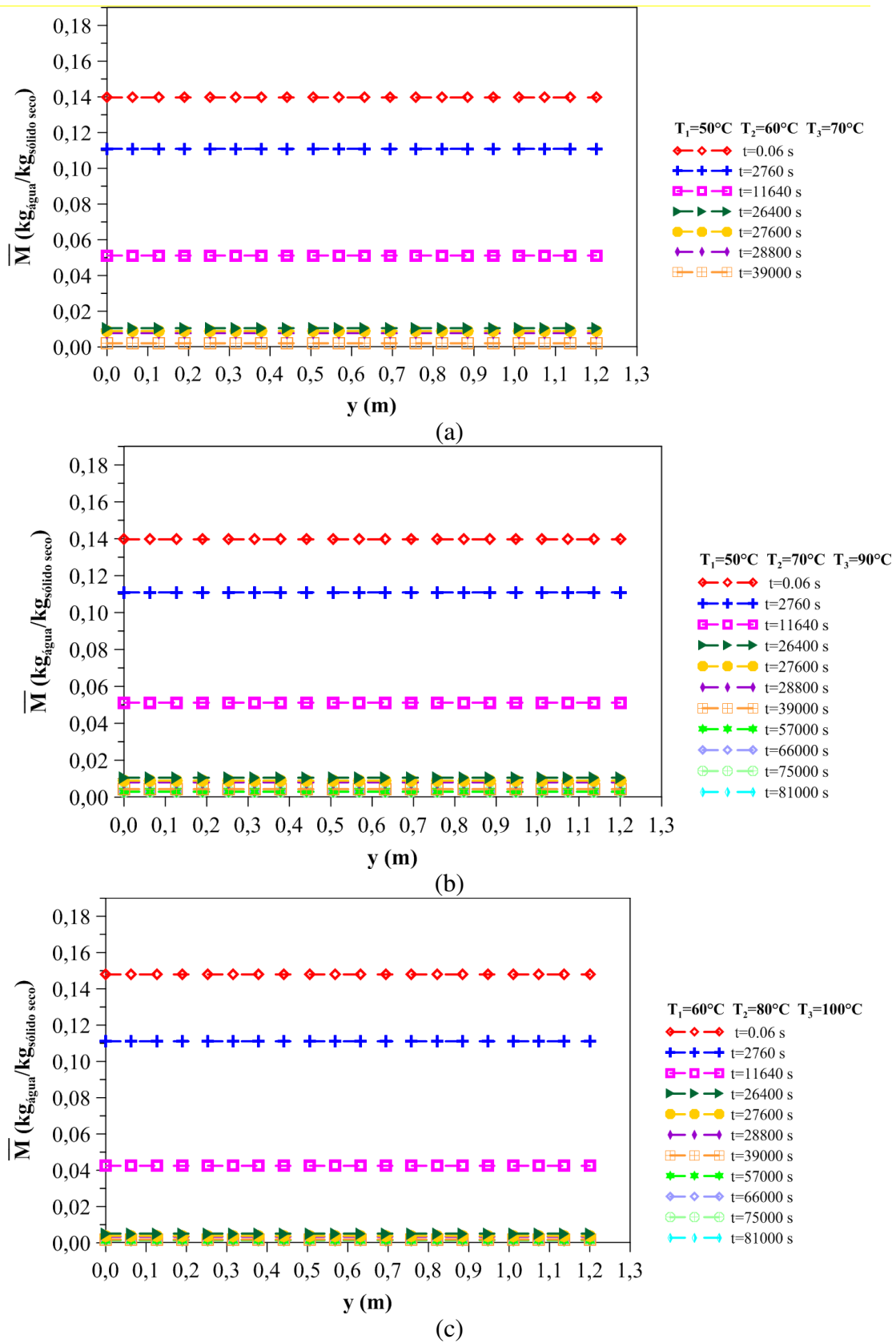


Figura 4.24 - Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

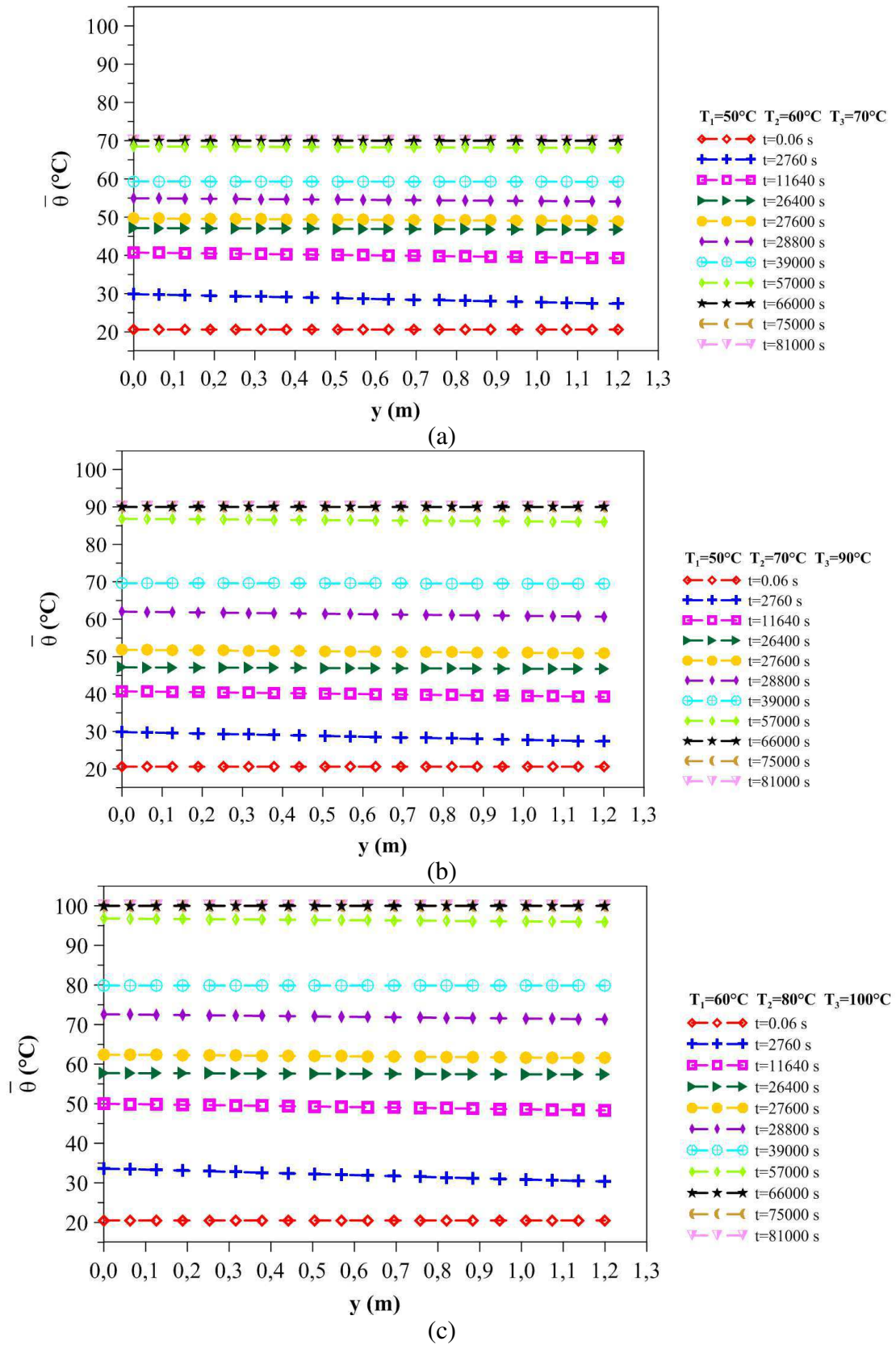
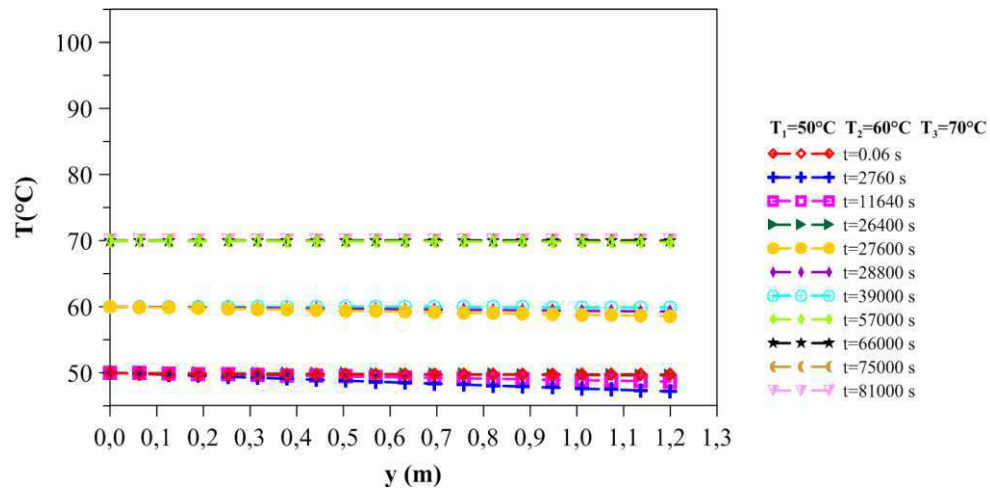
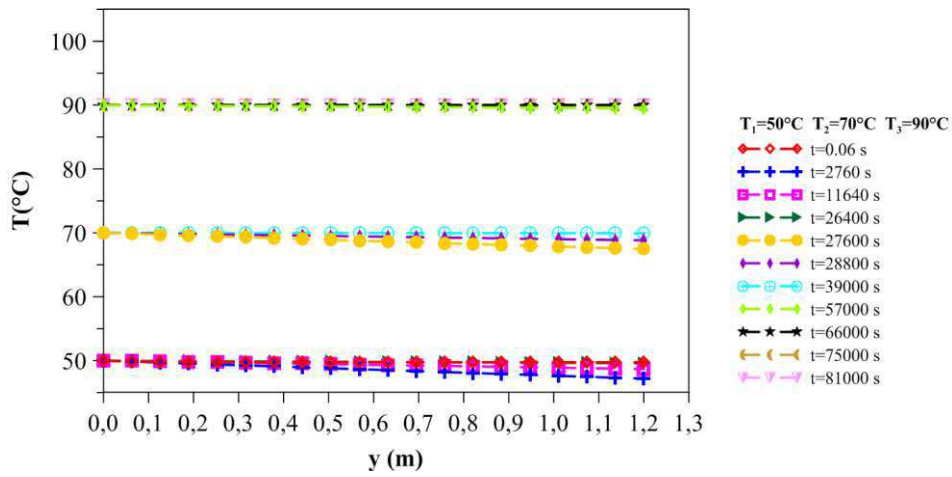


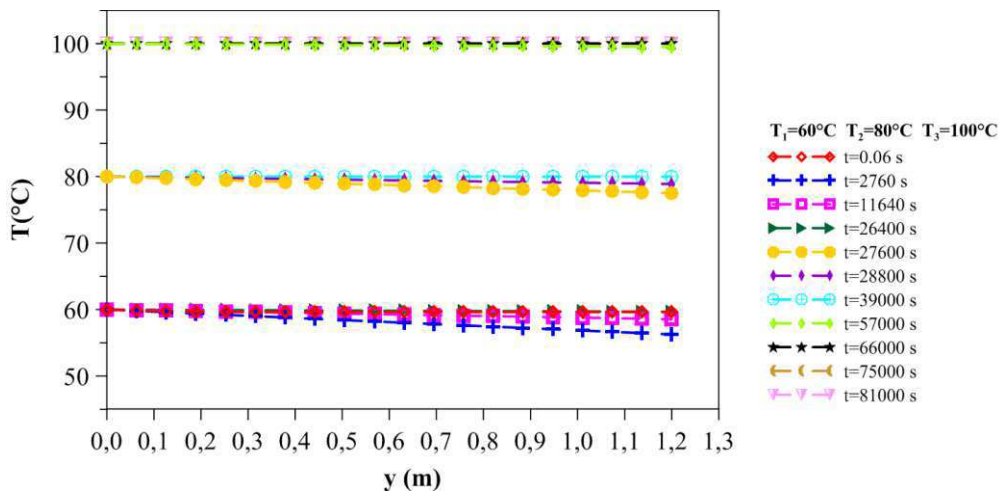
Figura 4.25 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.26 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

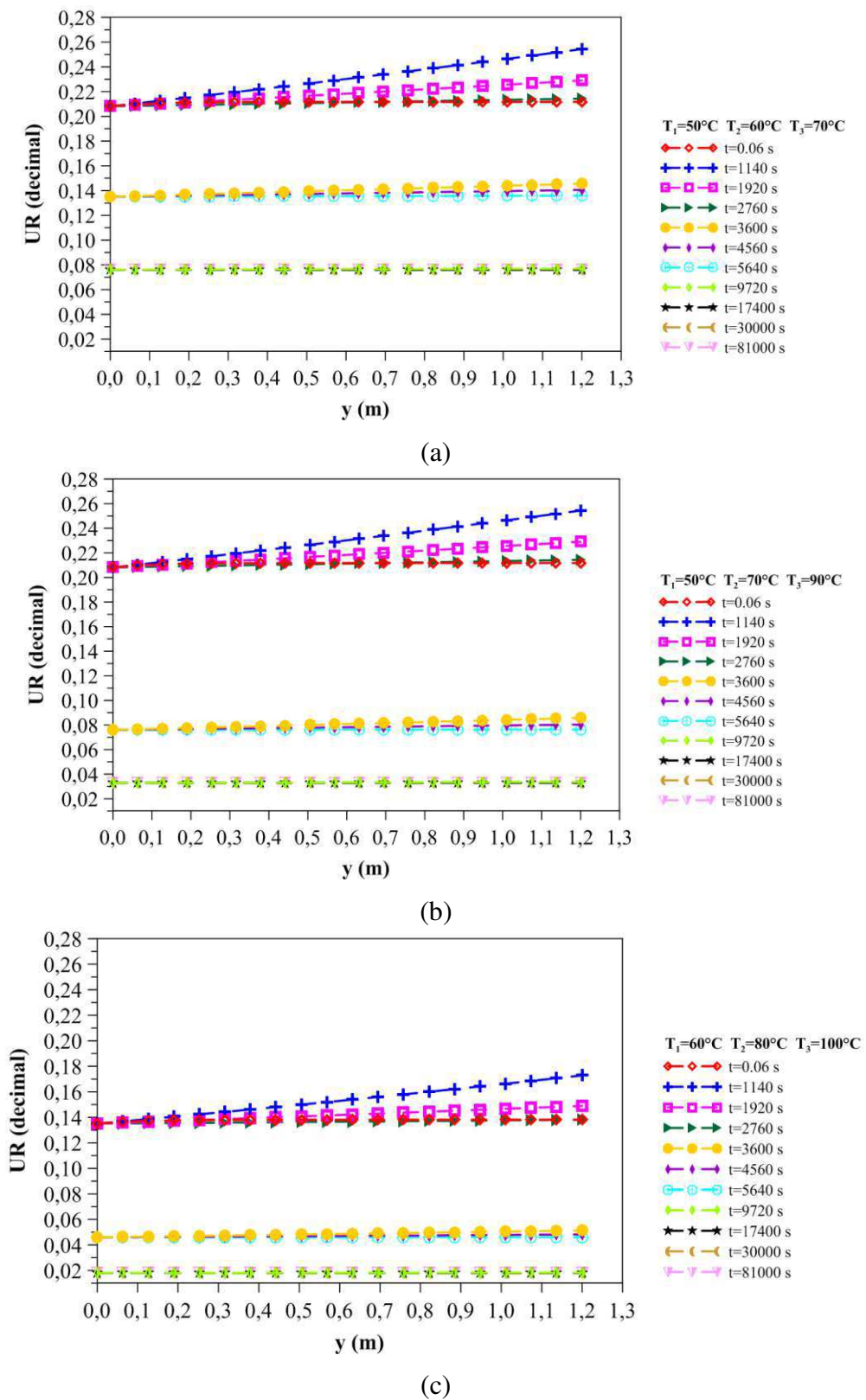


Figura 4.27 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

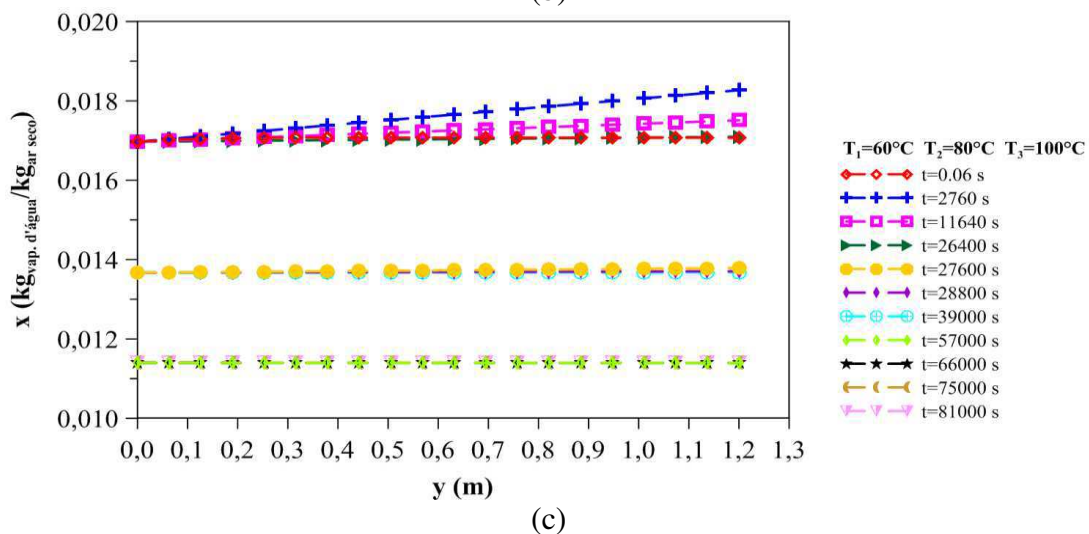
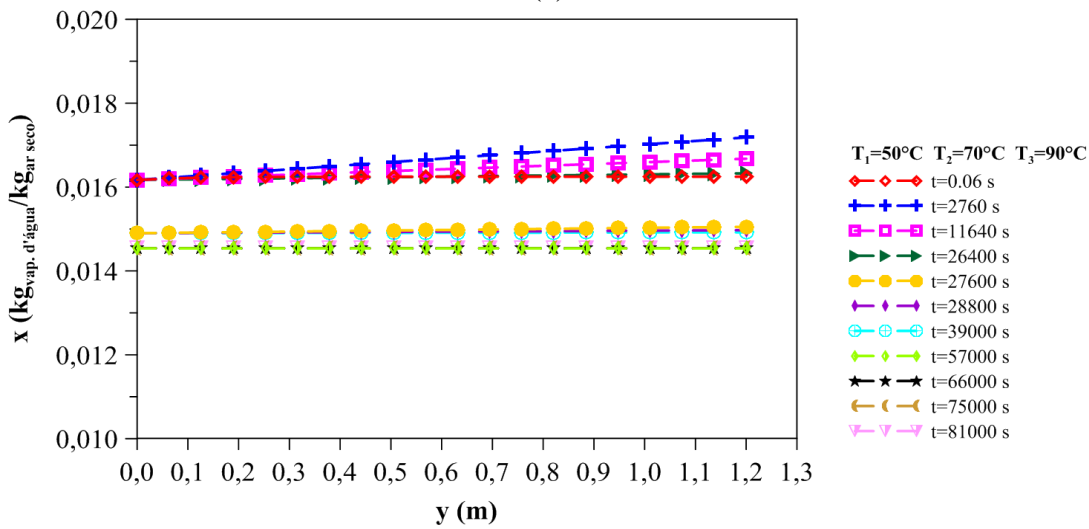
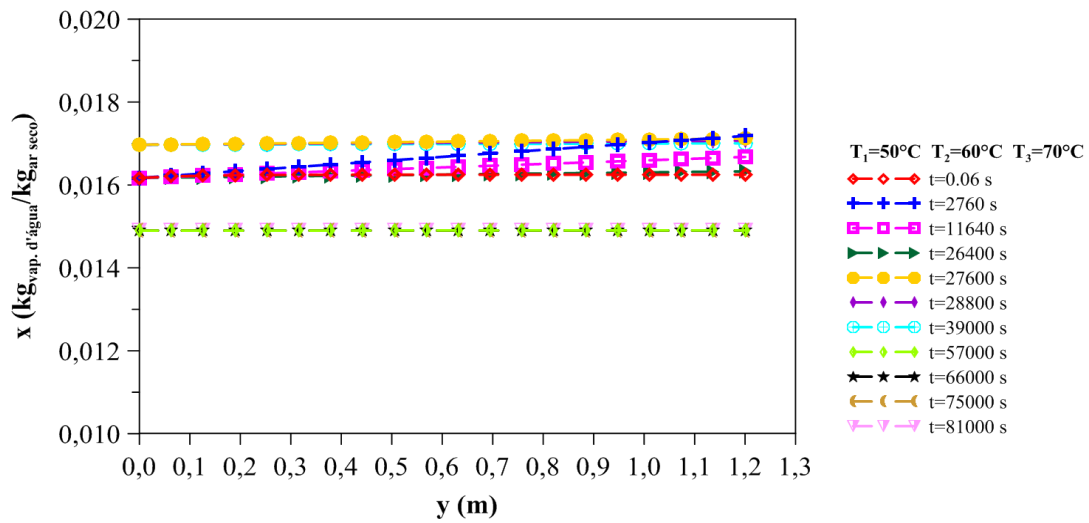


Figura 4.28 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. a) Caso 2, b) Caso 3, c) Caso 4.

É nítido nas imagens a seguir que altas temperaturas provocam uma secagem não uniforme. Como o ar está com uma umidade relativa baixa, ao entrar em contato com o produto ele retira água (por convecção) da sua superfície. Internamente a água migra devido ao gradiente hídrico estabelecido entre a superfície e o interior. Como o ar está muito quente e seco a água no interior do produto migra a uma velocidade muito grande, não dando tempo para a acomodação dos grãos, provocando trincas e deformações. Na Figura 4.32a é possível observar as trincas e na Figura 4.32b as extremidades tijolo mais secas.



Figura 4.29 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ( $t = 0$ ) à temperatura constante de  $80^{\circ}\text{C}$  na estufa. a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).



Figura 4.30 – Vista da amostra submetida à secagem ( $t = 40$  minutos) na temperatura constante de  $80^{\circ}\text{C}$  na estufa ( $\theta_{\text{tij}} = 37,1^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\text{amb.}} = 26,9^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{UR}_{\text{amb.}} = 58\%$ ). a) Frontal, b) Esquerda. Fonte: Silva (2009).

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES E SUGESTÕES**

#### **5.1 Conclusões**

De acordo com os resultados obtidos nesta pesquisa pode-se concluir que:

- A modelagem matemática apresentada descreve bem o fenômeno de secagem de tijolos cerâmicos vazados em secador tipo túnel;
- O método dos volumes finitos se mostrou adequado para simular o processo de secagem em secador de fluxo cruzado;
- Os métodos numéricos apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais do teor de umidade dos tijolos submetidos à secagem, mostrando assim que a metodologia usada é satisfatória;
- As condições do ar de secagem têm influência direta na cinética de secagem do tijolo: Temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas mais baixas implicam que o material seca mais rápido;

- Para temperaturas de 50°C e 60°C e umidades relativas de 20,8% e 13,5%, respectivamente, as velocidades de secagem e aquecimento do tijolo se mostraram bem controladas, o que provavelmente diminui os riscos de defeitos no produto;
- Durante o processo não se observou o fenômeno de condensação de água, isto porque a umidade relativa do ar de secagem usado na simulação é muito baixa;
- Diante dos resultados obtidos é provável que se possa redimensionar o secador, refletindo em um ganho produtivo;

Este estudo disponibiliza informações indispensáveis à indústria de tijolos cerâmicos vazados, no tocante a otimização de secadores de fluxo cruzado tipo túnel e as condições operacionais que apresentam os melhores benefícios.

## **5.2 Sugestões para futuros trabalhos**

Como sugestão para futuros trabalhos pode-se citar:

- Comparar a metodologia de volumes finitos com outras metodologias tais como: diferenças finitas; elementos finitos, etc. para simular a secagem de tijolos em secadores de fluxos cruzados;
- Aplicar a metodologia apresentada neste trabalho para otimizar secadores de fluxos cruzados;
- Estudar a secagem em tijolos com outras dimensões e formas, e até mesmo outros produtos argilosos.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICA). Cerâmica no Brasil: Introdução. Disponível em:< [http://www.abceram.org.br/asp/abc\\_21.asp](http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp) >. Acesso em 14 maio de 2013.

ABAJO, M. F. Manual sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos, Beralmar S. A., p.193-266, Terrassa, 2000.

ALMEIDA, G. S., **Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). 2009. 211. p. Departamento de Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

Barba, A.; *et al.* **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. Instituto de Tecnologia Cerámica-AICE 1ª ed. Castellón-Espanha, p. 239-255, 1997.

BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Drying of Onion: Effects of Pre-treatment on Moisture Transport. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v.B, p.419-426. Itú S.P.

BATISTA, V.R.; NASCIMENTO, J.J.S.; LIMA, A.G.B. de. Secagem e Retração Volumétrica de Tijolos Cerâmicos Maciços e Vazados: uma Investigação Teórica e Experimental. **Matéria (Rio J.)**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 4, 2009.

BAKKER-ARKEMA, F. W.; LEREW, L. E.; DE BOER, S. F.; ROTH, M. G. Grain Drier Simulation. **Research Report**, n.224, p.2-23, 1974.

BARRE, H. J.; BAUGHMAN, R.; HAMDY, M. Y. Application of the Logarithmic Model to Cross-flow Deep-bed Grain Drying. **Transactions of the ASAE**, v. 14, n. 6, p.1061-1064, 1971.

BÊ-Á-BÁ DA CERÂMICA. Disponível em

<[http://www.emic.com.br/artigos.php?id\\_artigo=129&categoria=tecnicos&lang=16](http://www.emic.com.br/artigos.php?id_artigo=129&categoria=tecnicos&lang=16)> Acesso em 10 abril de 2013 às 15:46 horas.

BELLINGIERI, J. C. As origens da Indústria Cerâmica em São Paulo. **Cerâmica Industrial**. v. 10, n. 3, p. 19-23, 2005.

BUSTAMANTE, G. N.; BRESSIANI, J. C. A Industria Cerâmica Brasileira. **Cerâmica Industrial**. v. 5, n. 3, 2000.

BROSNAN, D. A.; ROBINSON, G. C. **Introduction to Drying of Ceramics**. The American Ceramic Society, Ohio, 2003.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. New York: AVI Book, 1992, 450 p.

CADÉ, M. A; NASCIMENTO, J. J. S.; de LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: Uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p.443-453, 2005.

CARMO, J. E. F. **Difusão em Sólidos Esferoidais Oblates: Modelagem e Simulação**. 2000, 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

COSTA, E.C.da. **Secagem Industrial**. São Paulo: Blucher, 2007.

FARIAS, R. P. de, **Simulação da Secagem de Produtos Biológicos em Secador de Fluxos Cruzados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). 2003. 84. p. Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FARIAS, S. N. **Secagem de Sólidos Esferoidais Usando o Método de Galerkin**. 2002. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

FORTES, M.; OKOS, M. R. *Advances in Drying*. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, Chapter Five: **Drying theories: their bases and limitations as applied to foods and grains**, v.1, p. 119-154. 1980.

Frank, H. O Garimpo da Família Silvestre. Disponível em <[www.museum.in.ufrgs.br/EspSilvestre.htm](http://www.museum.in.ufrgs.br/EspSilvestre.htm)> Acesso em 05 de abril 2013.

FREIRE, E. S.; CHAU, K. V. Simulation of the Drying Process of Fermented Cacao Beans. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v. B, p.356-363. Itú-SP. 1997.

HALL, C. W. *Drying and Storage of Agricultural Crops*. Connecticut: AVI publishing company, Inc. 1980 381p.

HARTKE, R. F. Análise Numérica de um Secador Contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha. Proceedings of the 10th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering - Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (ABCM). Rio de Janeiro, Brazil, 2004.

HOLANDA, P. R. H. de, **Secador para Casulos do Bicho-da-Seda: Desenvolvimento, Simulação e Experimentação**. 2007. 161 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos), Departamento de Engenharia de Processos, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

IBRAHIM, M. H.; DAUD, W. R. W.; TALIB, M. Z. M. Drying Characteristics of Oil Palm Kernels. **Drying Technology**, v 15, n.3-4, p.1103-1117, 1997.

JUMAH, R. Y.; MUJUMDAR, A S.; RAGHAVAN, G. S. V. A mathematical model for constant and intermittent batch drying of grains in a novel rotating jet spouted bed. **Drying Technology**, v.14, n.3-4, p.765-802, 1996.

LEHMKUHL, W. A. **Análise Numérica e Experimental de um Secador Contínuo Utilizado na Indústria de Cerâmica Vermelha**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

LI, Ye-Bo; CAO, C.W.; LIU, D.Y. Simulation of Recirculating Circular Grain Dryer with Tempering Stage. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p. 201-214, 1997.

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos. Estudo de Caso: Secagem de Bananas**. 1999. 256 p. Tese (Doutorado), UNICAMP, S.P.

LIU, J. Y.; SIMPSON, W. T. Solutions of Diffusion Equation with Constant Diffusion and Surface Emission Coefficients. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997, Itu. **Proceedings...** v.A, p.73-80. Itú S.P.

LUDERS, G. Construção civil no Brasil deve crescer de 3,5% a 4% em 2013. Disponível em: <http://exame.abril.com.br/economia/noticias/construcao-civil-no-brasil-deve-crescer-de-3-5-a-4-em-2013?page=1>. Acessado em 08/04/2013.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A, 2004. 453 p.

MEIRA, J. M. L. "Argilas": O que são, suas Propriedades e Classificações. VISA, 2001.

MISRA, M. K., BROOKER, D. B. Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn. **Transactions of the ASAE**, p. 1254-1260, 1980.

MULLER, L. E.; SOARES, J. M. D.; PINTO, C. A. M. et al. **Curso Básico de Cerâmica Vermelha Estrutural**. Santa Maria: UFSM, 1990. 135p.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de Difusão Transiente em Sólidos Paralelepípedos. Estudo de Caso: Secagem de Materiais Cerâmicos**, 2002. 207 p. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. DTM/CT/UFPB.

NASCIMENTO, J. J. S.; BATISTA, V. R.; LIMA, A. G. B. Secagem e Queima de Tijolos Cerâmicos Maciços e Vazados Incluindo Variações Dimensionais e Danos Estruturais. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 3, p. 46-61, 2008.

OLIVEIRA, V. A. B. **Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos: Uma Solução Analítica**. 2001 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLIVEIRA, V. A. B. **Transferência de Calor e Massa no Interior de Sólidos com Forma Esferoidal Prolata Via Termodinâmica dos Processos Irreversíveis**. 2006. 150 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Departamento de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

OLLER, S. Normas e Princípios de Extrusão de Argila e Comportamento na Secagem. **Cerâmica**. v. 27, n. 140, p. 319-329, 1981.

PAKOWSKI, Z.; BARTCZAK, Z.; STRUMILLO, C.; STENSTROM, S. Evaluation of Equations Approximating Thermodynamic and Transport Properties of Water, Steam and Air for Use in CAD of Drying Processes. **Drying Technology**. v. 9, n. 3, p. 753-773. 1991.

PARK, K. J.; BROD, F. P. R. Comparative Study of Grated Coconut (*Cocos Nucifera*) Drying Using Vertical and Horizontal Dryers. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceeding...** v. B, p. 469-475. Itú – S.P. 1997.

PARK, K. J., GODOI, L. F. G., ALONSO, L. F. T., CORRÊA JR., W. A. Drying Behavior Parameters in a Continuous Vertical Annular Static Mixer Dryer. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. A, p. 204-209. Itú – S. P. 1997.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**, New York: Hemisphere Publishing Cooperation, 1980, 197 p.

Polícia flagra extração ilegal de argila em Colatina, ES. Disponível em: <http://g1.globo.com/espírito-santo/noticia/2012/03/policia-flagra-extracao-ilegal-de-argila-em-colatina-es.html>. Acessado em 08/04/2013.

PRADO, U. S.; BRESSIANI, J. C. Panorama da Indústria Cerâmica Brasileira na Última Década. **Cerâmica Industrial**. v. 18, n. 1, p. 7-11, 2013

QUINTANA-HERNANDEZ, P.; RODRIGUES-RAMIREZ, J.; MENDES-LAGUNAS, L.; CORNEJO-SERRANO, L. Humidity Diffusion Within Sugarcane Fibers. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. B, p. 538-542. Itú – S.P. 1997.

ROSSI, S. J. **Psicrometria**. João Pessoa: FUNAPE, 1987. 60p.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas**. 2<sup>a</sup> ed., São Paulo, Edgard Blucher/EDUSP, 1989. v 2.

SABADINI, E., CARVALHO, B. C. JR., SOBRAL, P. J. A., HUBINGER, M. D. Mass Transfer and Diffusion Coefficient Determination in Salted and Dried Meat Pieces. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. B, p. 441-447. Itú – S.P. 1997.

SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. Transport Properties in Processing of Fruits and Vegetables. **Food Technology**, p. 99- 105, September 1995.

SARKER, N. N., KUNZE, O. R., STROUBOLIS, T. Finite Element Simulation of Rough Rice Drying. **Drying Technology**, v. 12, n. 4, p. 761-775, 1994.

SILVA, J. B. **Secagem de sólidos em camada fina via análise concentrada: modelagem e simulação**. 2002. 64 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

SILVA, J. B., **Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados**, Campina Grande: 2009. 174 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Departamento de Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

STRUMILLO, C., KUDRA, T. **Drying: Principles, Science and Design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986, 448p.

TAPIA, R. E. C.; VILAR, S.C. **Manual Para a Indústria de Cerâmica Vermelha**. Rio de Janeiro, 2000. (Série Uso Eficiente de Energia).

TELLJOHANN, U., Influence of Dryer Atmosphere on the Danger of Drying Cracks and Dryer Scumming. **Ziegelindustrie International**. v. 56, n. 3, p. 12-18, 2003.

TOLABA, M. P., AGUERRE, R. J., SUAREZ, C. Drying of Corn with Tempering: Simulation and Experimental Verification. In: Inter-American Drying Conference (IADC), **Proceedings...** v. B, p.516-523. Itú – S.P. 1997.

TOMAZETTI, R. R. **Análise da Produção de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul**. UFSM, 2003.

VERDUCH, A. G.; SOLANA, S.V. Formação de Eflorescência na Superfície dos Tijolos. **Cerâmica Industrial**. v.5, n.5, p. 38-46, 2000.

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. Avaliação da Secagem de Cerâmica Vermelha Através da Curva de Bigot. **Cerâmica Industrial**. v.1, n.1, p. 42-46, 2003.

VOLTOLINI, A. R. Produção Brasileira de Pisos e Revestimentos Cerâmicos na Última Década. **Cerâmica Industrial**, v.16, n.1, p. 12-14, 2011.

ZOGZAS, N. P., MAROULIS, Z. B. Effective Moisture Diffusivity Estimation From Drying Data: a Comparison Between Various Methods of Analysis. **Drying Technology**, v.14, n.7 e 8, p.1543-1573, 1996.



## **ANEXOS**

```

Remove["Global' *"]
(*PROGRAMA ESCRITO POR VOLUMES FINITOS*)
npy=20;
npx=1;
H=1.2;
L=73.0;
tmax=L/up;
t1max=tmax/3;
t2max=2*tmax/3;
(*dados de entrada do material*)
Mpo=0.14795;
Tpo=20.5;
rop=1985.8;
up=0.00088;
areap=0.3332298904;
volumep=0.0013107875235999998;
eps=0.8644012906620689;
a=(1-eps)*areap/volumep;
comp=0.19;
comp=0.0343069; (*diametro hidraulico*)
(*dados de entrada do ar*)
Tao1=60;
xao1=0.01697; (*dados da tese de joselito, umidade absoluta dada
pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
(*ur; umidade relativa_tese de joselito*)
wao1=20.0; (* Velocidade do ar *)
kao1=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao1)-1.790*10^(-8)*(Tao1)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao1)^3);
miao1=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao1)-3.187*10^(-
11)*(Tao1)^2+1.319*10^(-14)*(Tao1)^3);
(*kao1=0.030058;
miao1=21.47253*10^(-6);*)
(*
*)
Tao2=70;
xao2=0.0149; (*dados da tese de joselito, umidade absoluta dada
pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
(*ur; umidade relativa_tese de joselito*)
wao2=20.0;
kao2=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao2)-1.790*10^(-8)*(Tao2)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao2)^3);
miao2=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao2)-3.187*10^(-
11)*(Tao2)^2+1.319*10^(-14)*(Tao2)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao3=80;
xao3=0.01367; (*dados da tese de joselito, umidade absoluta dada
pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
(*ur; umidade relativa_tese de joselito*)

```

```

wao3=20.0;
kao3=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao3)-1.790*10^(-8)*(Tao3)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao3)^3);
miao3=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao3)-3.187*10^(-
11)*(Tao3)^2+1.319*10^(-14)*(Tao3)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
(*Tao4=92;
xao4=0.6805;
wao4=10.0;
kao4=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao4)-1.790*10^(-8)*(Tao4)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao4)^3);
miao4=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao4+273.15)-3.187*10^(-
11)*(Tao4+273.15)^2+1.319*10^(-14)*(Tao4+273.15)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao5=100;
xao5=1.452;
wao5=10.0;
kao5=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao5)-1.790*10^(-8)*(Tao5)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao5)^3);
miao5=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao5)-3.187*10^(-
11)*(Tao5)^2+1.319*10^(-14)*(Tao5)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao6=94;
xao6=0.801;
wao6=10.0;
kao6=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao6)-1.790*10^(-8)*(Tao6)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao6)^3);
miao6=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao6)-3.187*10^(-
11)*(Tao6)^2+1.319*10^(-14)*(Tao6)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao7=88;
xao7=0.5762;
wao7=10.0;
kao7=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao7)-1.790*10^(-8)*(Tao7)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao7)^3);
miao7=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao7)-3.187*10^(-
11)*(Tao7)^2+1.319*10^(-14)*(Tao7)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao8=82;

```

```

xao8=0.3814;
wao8=10.0;
kao8=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao8)-1.790*10^(-8)*(Tao8)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao8)^3);
miao8=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao8)-3.187*10^(-
11)*(Tao8)^2+1.319*10^(-14)*(Tao8)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
Tao9=80;
xao9=0.336;
wao9=10.0;
kao9=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Tao9)-1.790*10^(-8)*(Tao9)^2-
8.570*10^(-12)*(Tao9)^3);
miao9=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Tao9)-3.187*10^(-
11)*(Tao9)^2+1.319*10^(-14)*(Tao9)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(*
*)
*)
i=1;
auxR=22105649.25;
auxA=-27405.53;
auxB=97.5413;
auxC=-0.146244;
auxD=0.12558*10^(-3);
auxE=-0.48502*10^(-7);
auxF=4.34903;
auxG=0.39381*10^(-2);
Patm=101325;
MMa=28.96;
Runiv=8314.34;
auxroa=Patm*MMa/Runiv;
y=Array[0&,{npy}];
Mp=Array[Mpo&,{npy}];
Tp=Array[Tpo&,{npy}];
Mpold=Array[0&,{npy}];
Tpold=Array[0&,{npy}];
(*
*)
wa=wao1;
dy=H/(npy-1);
Do[
  y[[j]]=(j-1)*dy;
  ,{j,1,npy}];
dt=dy/wa;
dz=up*(npy-1)*dt;
(*
*)
Pvs=Array[0&,{npy}];
Ur=Array[0&,{npy}];

```

```

apmp=Array[0&,{npy}];
apomp=Array[0&,{npy}];
scmp=Array[0&,{npy}];
(* *)
aptp=Array[0&,{npy}];
apotp=Array[0&,{npy}];
sctp=Array[0&,{npy}];
(* *)
apta=Array[0&,{npy}];
apota=Array[0&,{npy}];
asta=Array[0&,{npy}];
scta=Array[0&,{npy}];
(* *)
apxa=Array[0&,{npy}];
apoxa=Array[0&,{npy}];
asxa=Array[0&,{npy}];
scxa=Array[0&,{npy}];
(* *)
xa=Array[xaol&,{npy}];
Ta=Array[Taol&,{npy}];
xaold=Array[0&,{npy}];
Taold=Array[0&,{npy}];
graf=Array[0&,{npy}];
(* *)
graf[[1]]={0,Mp[[1]],Tp[[1]],xa[[1]],Ta[[1]]};
imax=5000000; (*número máximo de iterações no tempo*)
z=0;
ii=0;

(* Local onde serão salvo os arquivos da simulação *)

pasta=$InitialDirectory <>"\Caso_08";
dir=CreateDirectory[pasta];

While[z<=L&&ii<=imax,

  z=z+dz;
  t=z/up;
  ii=ii+1;
  Do[
    Mpoldd[[j]]=Mp[[j]];
    Taold[[j]]=Ta[[j]];
    Tpoldd[[j]]=Tp[[j]];
    xaold[[j]]=xa[[j]];
    ,{j,1,npy}];
  If[z<24,
    Ta[[1]]=Taol ;
    xa[[1]]= xaol;
    wa=waol;

```

```

ka=kao1;
mia=miao1;
roa=auxroa/(Tao1+273.15);
qa=roa*wa;
,
];
If[24<=z<48,
Ta[[1]]=Tao2 ;
xa[[1]]= xao2;
wa=wao2;
ka=kao2;
mia=miao2;
roa=auxroa/(Tao2+273.15);
qa=roa*wa;
,
];
If[48<=z<73,
Ta[[1]]=Tao3 ;
xa[[1]]= xao3;
wa=wao3;
ka=kao3;
mia=miao3;
roa=auxroa/(Tao3+273.15);
qa=roa*wa;
,
];
(*
If[9.6<=z<14.8,
Ta[[1]]=Tao4 ;
xa[[1]]= xao4;
wa=wao4;
ka=kao4;
mia=miao4;
roa=auxroa/(Tao4+273.15);
qa=roa*wa;
,
];
If[14.8<=z<67.3,
Ta[[1]]=Tao5 ;
xa[[1]]= xao5;
wa=wao5;
ka=kao5;
mia=miao5;
roa=auxroa/(Tao5+273.15);
qa=roa*wa;
,
];
If[67.3<=z<70.2,
Ta[[1]]=Tao6 ;
xa[[1]]= xao6;
wa=wao6;
ka=kao6;
mia=miao6;
roa=auxroa/(Tao6+273.15);

```

```

qa=roa*wa;
    ,
];
If[70.2<=z<72.9,
Ta[[1]]=Tao7 ;
xa[[1]]= xao7;
wa=wao7;
ka=kao7;
mia=miao7;
roa=auxroa/(Tao7+273.15);
qa=roa*wa;
    ,
];
If[z>=72.9,
Ta[[1]]=Tao8 ;
xa[[1]]= xao8;
wa=wao8;
ka=kao8;
mia=miao8;
roa=auxroa/(Tao8+273.15);
qa=roa*wa;
    ,
];
*)

Do[
ca=(1.00926-4.04033*10^(-5)*Ta[[j]]+6.17596*10^(-7)*Ta[[j]]^2-
4.09723*10^(-10)*Ta[[j]]^3)*10^3;
cv=(1.8830-0.16737*10^(-3)*(Ta[[j]]+273.15)+0.84386*10^(-
6)*(Ta[[j]]+273.15)^2-0.26966*10^(-9)*(Ta[[j]]+273.15)^3)*10^3;
cw=(2.82232+1.18277*10^(-2)*(Ta[[j]]+273.15)-3.5047*10^(-
5)*(Ta[[j]]+273.15)^2+3.6010*10^(-8)*(Ta[[j]]+273.15)^3)*10^3;
ka=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Ta[[j]])-1.790*10^(-
8)*(Ta[[j]])^2-8.570*10^(-12)*(Ta[[j]])^3);
mia=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Ta[[j]])-3.187*10^(-
11)*(Ta[[j]])^2+1.319*10^(-14)*(Ta[[j]])^3);
cp=1.673*10^3;
roa=auxroa/(Ta[[j]]+273.15);
hfg=352.58*(374.14-Ta[[j]])^0.33052*10^3;
Rey=roa*wa*comp/mia;
pr=ca*mia/ka;
hc=(ka/comp)*(0.664*Rey^(1/2)*pr^(1/3));
hc=(ka/comp)*(0.023*Rey^(4/5)*pr^(1/3));

If[t<=t1max,(*PRIMEIRA SECÇÃO DO SECADOR*)
c1=0.547740;
c2=0.5133493;
k1=-0.0059453;
k2=-0.0059452;
mo=0.14795;
me=0.00268;

```

```

dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))])/3600;*)
, ];
If[t1max<t<t2max,(*SEGUNDA SECÇÃO DO SECADOR*)
c1=-1.083353*10^(-18);
c2=1.04505;
k1=0.0067809;
k2=-0.0070948;
mo=0.15414;
me=0.00076;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))])/3600;*)
, ];
If[t2max<t<tmax,(*TERCEIRA SECÇÃO DO SECADOR*)
c1=0.535201;
c2=0.527668;
k1=-0.0091904;
k2=-0.0091903;
mo=0.15248;
me=0.00039;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))])/3600;*)
, ];
apomp[[j]]=dz/((npy-1)*dt);
scmp[[j]]= dmdt*dz;
apmp[[j]]=apomp[[j]];
apotp[[j]]=dz/((npy-1)*dt);

sctp[[j]]=( a*hc*Ta[[j]]+(hfg+cv*Ta[[j]])*rop*dmdt
)/(rop*cp+rop*cw*Mp[[j]])*dz;
aptp[[j]]=apotp[[j]]+( a*hc+cv*rop*dmdt )/(rop*cp+rop*cw*Mp[[j-
1]])*dz;
asta[[j]]=wa/eps;
apota[[j]]=dy/dt;

apta[[j]]=apota[[j]]+asta[[j]]+a*hc*dy/(eps*(roa*ca+roa*xa[[j]]*cv
));
scta[[j]]=a*hc*dy/(eps*(roa*ca+roa*xa[[j-1]]*cv))*Tp[[j-1]];
asxa[[j]]=roa*wa/eps;
apoxa[[j]]=roa*dy/dt;
apxa[[j]]=asxa[[j]]+apoxa[[j]];
scxa[[j]]=-rop*dmdt*dy/eps;
Mp[[j]]=(apomp[[j]]*Mpold[[j]]+scmp[[j]])/apmp[[j]];

```



```

Tp[[j]]=(apotp[[j]]*Tpold[[j]]+sctp[[j]])/aptp[[j]];Ta[[j]]=(asta[
j]]*Ta[[j-
1]]+apota[[j]]*Taold[[j]]+scta[[j]])/apta[[j]];xa[[j]]=(asxa[[j]]*
xa[[j-1]]+apoxa[[j]]*xaold[[j]]+scxa[[j]])/apxa[[j]];

```

```

Pvs[[j]]=auxR*Exp[(auxA+auxB*(Ta[[j]]+273.16)+auxC*(Ta[[j]]+273.16
)^2+auxD*(Ta[[j]]+273.16)^3+auxE*(Ta[[j]]+273.16)^4)/(auxF*(Ta[[j]
]+273.16)-auxG*(Ta[[j]]+273.16)^2)];

```

```

Ur[[j]]=xa[[j]]*Patm/((xa[[j]]+0.622)*Pvs[[j]]);

```

```

If[Ur[[j]]>1,

```

```

  iterlin=0;

```

```

  iterlinmax=100000;

```

```

  Uraux=Ur[[j]];

```

```

  xalin=xa[[j]];

```

```

  dxalin=10^(-6);

```

```

  Mplin=Mp[[j]];

```

```

  Talin=Ta[[j]];

```

```

  While[Uraux>1&&iterlin<iterlinmax,

```

```

    iterlin=iterlin+1;

```

```

    ca=(1.00926-4.04033*10^(-5)*Talin+6.17596*10^(-7)*Talin^2-
4.09723*10^(-10)*Talin^3)*10^3;

```

```

    cv=(1.8830-0.16737*10^(-3)*(Talin+273.15)+0.84386*10^(-
6)*(Talin+273.15)^2-0.26966*10^(-9)*(Talin+273.15)^3)*10^3;

```

```

    cw=(2.82232+1.18277*10^(-2)*(Talin+273.15)-3.5047*10^(-
5)*(Talin+273.15)^2+3.6010*10^(-8)*(Talin+273.15)^3)*10^3;

```

```

    ka=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Talin)-1.790*10^(-
8)*(Talin)^2-8.570*10^(-12)*(Talin)^3);

```

```

    mia=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Talin)-3.187*10^(-
11)*(Talin)^2+1.319*10^(-14)*(Talin)^3);

```

```

    cp=1.673*10^3;

```

```

    roa=auxroa/(Ta[[j]]+273.15);

```

```

    hfg=352.58*(374.14-Ta[[j]])^0.33052*10^3;

```

```

    Rey=roa*wa*comp/mia;

```

```

    pr=ca*mia/ka;

```

```

    hc=(ka/comp)*(0.664*Rey^(1/2)*pr^(1/3));

```

```

    hc=(ka/comp)*(0.023*Rey^(4/5)*pr^(1/3));

```

```

    If[t<=t1max,

```

```

      c1=0.547740;

```

```

      c2=0.5133493;

```

```

      k1=-0.0059453;

```

```

      k2=-0.0059452;

```

```

      mo=0.14795;

```

```

      me=0.00268;

```

```

      dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;

```

```

(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))]/3600;*)
, ];
If[t1max<t<=t2max,
c1=-1.083353*10^(-18);
c2=1.04505;
k1=0.0067809;
k2=-0.0070948;
mo=0.15414;
me=0.00076;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))]/3600;*)
, ];
If[t2max<t<=tmax,
c1=0.535201;
c2=0.527668;
k1=-0.0091904;
k2=-0.0091903;
mo=0.15248;
me=0.00039;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me +
mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))]/3600;*)
, ];

apotp[[j]]=dz/((npy-1)*dt);
sctp[[j]]=( a*hc*Talin+(hfg+cv*Talin)*rop*dmdt
)/(rop*cp+rop*cw*Mplin)*dz;
aptp[[j]]=apotp[[j]]+( a*hc+cv*rop*dmdt
)/(rop*cp+rop*cw*Mp[[j-1]])*dz;

Tplin=(apotp[[j]]*Tpold[[j]]+sctp[[j]])/aptp[[j]];
Mplin=Mp[[j]]+(roa*wa*dz/(rop*up*dy))* (xa[[j]]-xalin);

Talin=(roa*wa*dz/up*(ca+cv*xa[[j]])*Ta[[j]]+rop*dy*(cp+cw*Mp[[j]])
*Tp[[j]]-rop*dy*(cp+cw*Mplin)*Tp[[j]]-roa*wa*(dz/up)*hfg*(xalin-
xa[[j]]))/(roa*wa*dz/up*(ca+cv*xalin));

Pvsaux=auxR*Exp[ (auxA+auxB*(Talin+273.16)+auxC*(Talin+273.16)^2+au
xD*(Talin+273.16)^3+auxE*(Talin+273.16)^4)/(auxF*(Talin+273.16)-
auxG*(Talin+273.16)^2) ];
Uraux=xalin*Patm/((xalin+0.622)*Pvsaux);
(*
Print[Talin," ",Uraux," ",iterlin," ",j," ",ii];
*)

```

```

xalin=xalin-dxalin;

];
Ur[[j]]=Uraux;
Ta[[j]]=Talin;
xa[[j]]=xalin;
Mp[[j]]=Mplin;
Tp[[j]]=Tplin;
Pvs[[j]]=Pvsaux;
]; (*Fim do If*)

,{j,2,npj}}];
caj1=(1.00926-4.04033*10^(-5)*Ta[[1]]+6.17596*10^(-7)*Ta[[1]]^2-
4.09723*10^(-10)*Ta[[1]]^3)*10^3;
cvj1=(1.8830-0.16737*10^(-3)*(Ta[[1]]+273.15)+0.84386*10^(-
6)*(Ta[[1]]+273.15)^2-0.26966*10^(-9)*(Ta[[1]]+273.15)^3)*10^3;
cwj1=(2.82232+1.18277*10^(-2)*(Ta[[1]]+273.15)-3.5047*10^(-
5)*(Ta[[1]]+273.15)^2+3.6010*10^(-8)*(Ta[[1]]+273.15)^3)*10^3;
kaj1=(2.425*10^(-2)+7.889*10^(-5)*(Ta[[1]])-1.790*10^(-
8)*(Ta[[1]])^2-8.570*10^(-12)*(Ta[[1]])^3);
miaj1=(1.691*10^(-5)+4.984*10^(-8)*(Ta[[1]])-3.187*10^(-
11)*(Ta[[1]])^2+1.319*10^(-14)*(Ta[[1]])^3);
roaj1=auxroa/(Ta[[1]]+273.15);
cpj1=1.673*10^3;
hfgj1=352.58*(374.14-Ta[[1]])^0.33052*10^3;
Rey=roaj1*wa*comp/mia;
pr=caj1*mia/ka;
hc=(ka/comp)*(0.664*Rey^(1/2)*pr^(1/3));
hc=(ka/comp)*(0.023*Rey^(4/5)*pr^(1/3));
If[t<=t1max,
c1=0.547740;
c2=0.5133493;
k1=-0.0059453;
k2=-0.0059452;
mo=0.14795;
me=0.00268;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me + mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))])/3600;*)
,];
If[t1max<t<=t2max,
c1=-1.083353*10^(-18);
c2=1.04505;
k1=0.0067809;
k2=-0.0070948;
mo=0.15414;
me=0.00076;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me + mo))/60;

```

```

(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))]/3600;*)
, ];
If[t2max<t<tmax,
c1=0.535201;
c2=0.527668;
k1=-0.0091904;
k2=-0.0091903;
mo=0.15248;
me=0.00039;
dmdt=((c1*Exp[k1*t/60]*k1 + c2*Exp[k2*t/60]*k2)*(-me + mo))/60;
(*dmdt=(-0.213029*Mpo*((t/3600)^0.72028)*Exp[(-
0.124865*((t/3600)^1.720286))]/3600;*)
, ];

```

```

apomp[[1]]=dz/((npy-1)*dt);(*o dt na direção z diferente do dt
da direção y*);

```

```

scmp[[1]]= dmdt*dz;
apmp[[1]]=apomp[[1]];
Mp[[1]]=(apomp[[1]]*Mpoldd[[1]]+scmp[[1]])/apmp[[1]];
apotp[[1]]=dz/((npy-1)*dt);
sctp[[1]]=( a*hc*Ta[[1]]+(hfgj1+cvj1*Ta[[1]])*rop*dmdt
)/(rop*cpj1+rop*cwj1*Mp[[1]])*dz;
aptp[[1]]=apotp[[1]]+( a*hc+cvj1*rop*dmdt
)/(rop*cpj1+rop*cwj1*Mp[[1]])*dz;
Tp[[1]]=(apotp[[1]]*Tpoldd[[1]]+sctp[[1]])/aptp[[1]];

```

```

Pvs[[1]]=auxR*Exp[(auxA+auxB*(Ta[[1]]+273.16)+auxC*(Ta[[1]]+273.16
)^2+auxD*(Ta[[1]]+273.16)^3+auxE*(Ta[[1]]+273.16)^4)/(auxF*(Ta[[1]]
)+273.16)-auxG*(Ta[[1]]+273.16)^2)];

```

```

Ur[[1]]=xa[[1]]*Patm/((xa[[1]]+0.622)*Pvs[[1]]);

```

```

If[ii==1||ii==2||ii==20||ii==40||ii==60||ii==80||ii==100||ii==200||ii==5
00||ii==1000||ii==1100||ii==1200||ii==1300||ii==1400||ii==1500||ii==160
0||ii==1700||ii==1800||ii==1900||ii==2000||ii==2100||ii==2200||ii==2300
||ii==2400||ii==2500||ii==2600||ii==2700||ii==2800||ii==2900||ii==3000|
|ii==3100||ii==3200||ii==3300||ii==3400||ii==3500||ii==3600||ii==3700|
|ii==3800||ii==3900||ii==4000||ii==5100||ii==5200||ii==5300||ii==5400||i
i==5500||ii==5600||ii==5700||ii==5800||ii==5900||ii==6000||ii==6100||ii
==6200||ii==6300||ii==6400||ii==6500||ii==6600||ii==6700||ii==6800||ii==
6900||ii==7000||ii==7100||ii==7200||ii==7300||ii==7400||ii==7500||ii==7
600||ii==7700||ii==7800||ii==7900||ii==8000||ii==8100||ii==8200||ii==83
00||ii==8400||ii==8500||ii==8600||ii==8700||ii==8800||ii==8900||ii==900
0||ii==9100||ii==9200||ii==9300||ii==9400||ii==9500||ii==9600||ii==9700
||ii==9800||ii==9900||ii==10000||ii==10100||ii==10200||ii==10300||ii==1
0400||ii==10500||ii==10600||ii==10700||ii==10800||ii==10900||ii==11000
||ii==11100||ii==11200||ii==11300||ii==11400||ii==11500||ii==11600||ii
==11700||ii==11800||ii==11900||ii==12000||ii==12100||ii==12200||ii==123

```

```

00||ii==12400||ii==12500||ii==12600||ii==12700||ii==12800||ii==12900||
ii==13000||ii==14000||ii==15000||ii==16000||ii==17000||ii==18000||ii==1
9000||ii==20000||ii==22000||ii==24000||ii==26000||ii==28000||ii==30000
||ii==32000||ii==34000||ii==36000||ii==38000||ii==40000||ii==42000||ii
==44000||ii==46000||ii==48000||ii==50000||ii==52000||ii==54000||ii==560
00||ii==58000||ii==60000||ii==62000||ii==64000||ii==66000||ii==68000||
ii==70000||ii==72000||ii==74000||ii==76000||ii==78000||ii==80000||ii==8
2000||ii==84000||ii==86000||ii==88000||ii==90000||ii==92000||ii==94000
||ii==96000||ii==98000||ii==100000||ii==102000||ii==104000||ii==104500
||ii==105000||ii==105500||ii==106000||ii==108000||ii==110000||ii==1120
00||ii==114000||ii==116000||ii==118000||ii==120000||ii==122000||ii==12
4000||ii==126000||ii==128000||ii==130000||ii==132000||ii==134000||ii==
136000||ii==138000||ii==140000||ii==142000||ii==144000||ii==146000||ii
==148000||ii==150000||ii==152000||ii==154000||ii==156000||ii==158000||
ii==160000||ii==162000||ii==164000||ii==166000||ii==168000||ii==170000
||ii==172000||ii==174000||ii==176000||ii==178000||ii==180000||ii==1820
00||ii==184000||ii==186000||ii==188000||ii==190000||ii==192000||ii==19
4000||ii==196000||ii==198000||ii==200000||ii==202000||ii==204000||ii==
206000||ii==208000||ii==210000||ii==210500||ii==211000||ii==211500||ii
==212000||ii==214000||ii==216000||ii==218000||ii==220000||ii==222000||
ii==224000||ii==226000||ii==228000||ii==230000ii==232000||ii==234000||
ii==236000||ii==238000||ii==240000||ii==242000||ii==244000||ii==246000
||ii==248000||ii==250000||ii==252000||ii==254000||ii==256000||ii==2580
00||ii==260000||ii==262000||ii==264000||ii==266000||ii==268000||ii==27
0000||ii==272000||ii==274000||ii==276000||ii==278000||ii==280000||ii==
282000ii==284000||ii==286000||ii==288000||ii==290000||ii==292000||ii==
294000||ii==296000||ii==298000||ii==300000||ii==302000||ii==304000||ii
==306000||ii==308000||ii==310000||ii==320000||ii==340000||ii==380000||
ii==420000||ii==440000||ii==460000||ii==480000||ii==500000||ii==550000
||ii==600000||ii==650000||ii==700000||ii==750000||ii==800000||ii==8500
00||ii==900000||ii==950000||ii==1000000||ii==1050000||ii==1100000||ii
==1150000||ii==1200000||ii==1250000||ii==1300000||ii==1350000||ii==140
0000||ii==1450000||ii==1500000||ii==1550000||ii==1600000||ii==1650000||
ii==1700000||ii==1750000||ii==1800000||ii==1850000||ii==1900000||ii==
2000000||ii==2050000||ii==2100000||ii==2150000||ii==2200000||ii==22500
00||ii==2300000||ii==2350000||ii==2400000||ii==2450000||ii==2500000||ii
i==2550000||ii==2600000||ii==2650000||ii==2700000||ii==2750000||ii==28
00000||ii==2850000||ii==2900000||ii==3000000||ii==4050000||ii==4100000
||ii==4150000||ii==4200000||ii==4250000||ii==4300000||ii==4350000||ii
==4400000||ii==4450000||ii==4500000||ii==4550000||ii==4600000||ii==465
0000||ii==4700000||ii==4750000||ii==4800000||ii==4850000||ii==4900000|
|ii==5000000,
    Print[" "];
    Print["          ", "t=", t, "s
", "z=", z, "m", "      ", "ii=", ii];
    Print[" "];
    Print["y (m) ", MatrixForm[y], " ", "M(kg/kg) ", MatrixForm[Mp], "
", "θ (oC) ", MatrixForm[Tp], "      ", "x (kg/kg) ", MatrixForm[xa], "

```

```

", "T(oC)", MatrixForm[Ta], " ", "Pvs (Pa)", MatrixForm[Pvs], "
", "UR", MatrixForm[Ur] ];

(* Gerando os resultados a ser salvo no formato *.xls *)

Um= Array[um, {npy+1, 7}]; (* Matriz solução 1° Coluna: y - 2°
Coluna: z - 3° Coluna: U (y, z, t) *)

Um[[1,1]]= "y(m)"; (* Eixo da abscissas *)
Um[[1,2]]= "UR"; (* Eixo da ordenadas *)
Um[[1,3]]= "T(oC)"; (* Distribuição de umidades *)
Um[[1,4]]= "x(kg/kg)"; (* Distribuição de umidades *)
Um[[1,5]]= "M(kg/kg)"; (* Distribuição de umidades *)
Um[[1,6]]= "Theta(oC)"; (* Distribuição de umidades *)
Um[[1,7]]= "Pvs(Pa)"; (* Distribuição de umidades *)

qq=2; (* Valor inicial do contador *)

Do[ (* 1° Loo da variavel espacial y *)
    Um[[qq,1]]= y[[j]]; (* Eixo da abscissas *)
    Um[[qq,2]]= Ur[[j]]; (* Eixo da ordenadas *)
    Um[[qq,3]]= Ta[[j]]; (* Distribuição de umidades *)
    Um[[qq,4]]= xa[[j]]; (* Distribuição de umidades *)
    Um[[qq,5]]= Mp[[j]]; (* Distribuição de umidades *)
    Um[[qq,6]]= Tp[[j]]; (* Distribuição de umidades *)
    Um[[qq,7]]= Pvs[[j]]; (* Distribuição de umidades *)

    qq = qq + 1; (* Contador *)
    , {j, npy}]

(*Export[ToFileName[dir, ToString["Temperatura_"]<>
ToString[ii]<>".xls"], {"Temperatura" -> Um}]*

Export[ToFileName[dir, ToString["Temperatura_"]<>
ToString[ii]<>".dat"], Um, "Table"]

```

(\* Fim da salvação \*)

, l;  
l;

t= 0.06 s

z= 0.0000528 m

ii= 1

	0		0.147949		20.5004		0.01697		60		19917.8		0.135107
	0.0631579		0.147949		20.5004		0.0170185		59.8399		19770.6		0.136491
	0.126316		0.147949		20.5004		0.0170445		59.7544		19692.4		0.137237
	0.189474		0.147949		20.5004		0.0170585		59.7087		19650.7		0.137638
	0.252632		0.147949		20.5004		0.0170659		59.6843		19628.5		0.137852
	0.315789		0.147949		20.5004		0.01707		59.6712		19616.6		0.137967
	0.378947		0.147949		20.5004		0.0170721		59.6642		19610.3		0.138029
	0.442105		0.147949		20.5004		0.0170733		59.6605		19606.9		0.138062
	0.505263		0.147949		20.5004		0.0170739		59.6585		19605.1		0.13808
	0.568421	M', kg' kg	0.147949	t', oC	20.5004	x', kg' kg	0.0170742	T', oC	59.6575	Pvs', Pa	19604.1	UR	0.138089
y', m	0.631579		0.147949		20.5004		0.0170744		59.6569		19603.6		0.138094
	0.694737		0.147949		20.5004		0.0170745		59.6566		19603.3		0.138097
	0.757895		0.147949		20.5004		0.0170745		59.6564		19603.2		0.138098
	0.821053		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6564		19603.1		0.138099
	0.884211		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.138099
	0.947368		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.1381
	1.01053		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.1381
	1.07368		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.1381
	1.13684		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.1381
	1.2		0.147949		20.5004		0.0170746		59.6563		19603.		0.1381