

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

**Otimização e Controle de Secadores
Convectivos Tipo Túnel. Estudo de Caso:
Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados**

FRANCISCA VALDEIZA DE SOUZA TAVARES

Campina Grande - PB

2018

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

Otimização e Controle de Secadores Convectivos Tipo Túnel. Estudo de Caso: Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados

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

Curso: Engenharia de Processos
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Engenharia de Processos, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

Campina Grande - PB

2018

T231o Tavares, Francisca Valdeiza de Souza.
Otimização e controle de secadores convectivos tipo túnel.
Estudo de caso : secagem de tijolos cerâmicos vazados / Francisca
Valdeiza de Souza Tavares. – Campina Grande, 2018.
180 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade
Federal de Campina Grande, Centro de Ciência e Tecnologia,
2018.

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

1. Secagem. 2. Fluxos cruzados. 3. Controle de processos. 4.
Volumes finitos. 5. Controlador PID. I. Lima, Antonio Gilson
Barbosa de. II. Título.

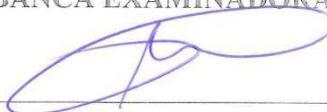
CDU 66.047:62-478(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

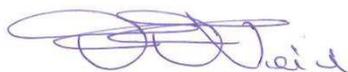
MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE FRANCISCA VALDEIZA DE SOUZA TAVARES APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

Tese de Doutorado **aprovada** em 27 de fevereiro de 2018.

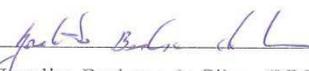
BANCA EXAMINADORA



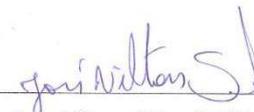
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFPG/CCT/UAEM)
Orientador



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira (UEPB/DESA)
Examinador externo



Prof. Dr. Joselito Barbosa da Silva (UNINASSAU)
Examinador externo



Prof. Dr. Jose Nilton Silva (UFPG/CCT/UAEQ)
Examinador Externo



Prof.^a. Dr.^a. Célia Maria Rufino Franco (UFPG/CDSA)
Examinadora externa

Campina Grande, Fevereiro de 2018.

DEDICATÓRIA

Primeiro e especialmente a minha querida e amada mãe, Alaide 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, que sempre me apoiou e até em situações adversas sempre acreditou em mim. Aos meus irmãos queridos, Valterdan e Valdiram pelo incentivo, amizade e tudo que me fizeram ser ao longo da vida. Ao meu tão amado avô Francisco – “Véi Chico” (*in memoriam*) e as minhas avós Altina e Sebastiana (*in memoriam*). As minhas sobrinhas, Bianca e Beatriz, que eu amo incondicionalmente e que me proporcionam uma alegria inexplicável. Enfim, dedico a toda a minha família. Vocês são minha base, sólida e invariável.

Ao meu amor e companheiro, Wesder que desde o início me apoiou e nunca mediu esforços ao longo da realização deste. E que apesar da distância em muitos momentos dessa trajetória, sempre se fez compreensivo, presente e incondicional. Que sempre me ouviu e me aconselhou nos momentos turbulentos e sempre vibrou comigo nos momentos de alegria. Obrigada por tudo!

Valdeiza Tavares

AGRADECIMENTOS

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

À 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 mim ao longo de quase sete anos, o que me motiva constantemente. Meus mais sinceros agradecimentos, sem o senhor este sonho certamente estaria mais distante.

Ao professor Dr. José Nilton Silva pela paciência, disponibilidade e valiosa contribuição, imprescindíveis à realização deste.

Aos professores que prontamente deram suas valiosas contribuições, Dr. Fernando Fernandes Vieira, Dr. Joselito Barbosa da Silva e Dra. Célia Rufino Franco.

Aos professores e funcionários do programa de pós-graduação em Engenharia de Processos desta instituição (UFCG).

Aos meus amigos e colegas nesta jornada, Samuell, Wanessa, Daniella, Gicélia, Edna, Veralúcia, Tony, Enivaldo, Cidronia, Alysson, Raquel, Dayanna Kelly, Wanderson, Robson, Mirenia, Brasileiro, Antonildo, João Paulo, Evaldo, Vieira, Fernando, pela orientação imediata durante discussões e pelos momentos de descontração.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica desta instituição (UFCG).

À Wanda, então secretária do programa de pós graduação em Engenharia Mecânica, pela cordialidade, incentivo, conselhos, amizade e energia positiva.

Aos meus alunos pela troca de experiências e ensinamentos que fazem com que eu cresça tanto pessoal quanto profissionalmente.

Aos meus pais (Vicente e Alaide), aos meus irmãos (Valterdan e Valdiram), bem como 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.

Finalmente, meus mais sinceros agradecimentos a todos que contribuíram de alguma forma ao longo desta trajetória.

*“Meu estado de espírito sintetiza estes dois sentimentos [otimismo e pessimismo] e os supera:
sou pessimista com a inteligência, mas otimista com a vontade.
Em cada circunstância, penso na hipótese pior, para pôr em movimento todas as reservas de
vontade e ser capaz de abater o obstáculo.”*

Antonio Gramsci

SUMÁRIO

1	Introdução	1
2	Revisão da Literatura	6
2.1	Cerâmica	6
2.1.1	Conceito de cerâmica	6
2.1.2	Histórico	6
2.1.3	Classificação do setor cerâmico	9
2.2	Argila	11
2.2.1	Argila para a produção de cerâmica estrutural ou vermelha	12
2.3	Tijolos	15
2.3.1	Etapas do processo produtivo de cerâmica vermelha	16
2.4	O processo de secagem	25
2.4.1	Métodos de secagem	26
2.4.2	Secadores	29
2.4.2.1	Secadores com funcionamento estático ou intermitentes	31
2.4.2.2	Secadores com funcionamento contínuo	33
2.4.2.3	Secadores contínuos tipo túnel de fluxo cruzado	35
2.4.3	Secagem de materiais cerâmicos	36
2.4.3.1	Fases do processo de secagem	38
2.4.3.2	Retração	40
2.4.3.3	Fissuras e descoloração	43
2.4.4	Teoria e modelos do processo de secagem	44
2.4.4.1	Modelos matemáticos	45
2.4.4.1.1	Camada fina	46
2.4.4.1.2	Camada espessa	50

2.5 Teoria de controle de processo	58
2.5.1 Fundamentos	58
2.5.2 Controle de processo	63
2.5.2.1 Sistemas de controle em malha aberta (SCMA)	64
2.5.2.2 Sistemas de controle em malha fechada (SCMF)	66
2.5.3 Controladores PID	67
2.5.3.1 Controlador Proporcional	70
2.5.3.2 Ação Integral no controlador Proporcional - Integral	72
2.5.3.3 Ação Derivativa no controlador Proporcional - Derivativo	74
2.5.4 Dinâmica de processos	76
2.5.4.1 Sintonia de controladores PID	76
2.5.4.1.1 Método Heurístico de Ziegler Nichols	77
2.5.4.1.2 Método CHR	80
3 Modelagem Teórica	82
3.1 Caracterização do problema	82
3.2 Caracterização do secador	84
3.3 Modelagem Matemática	89
3.3.1 Modelagem matemática dos balanços de massa e energia entre o ar e o produto	89
3.4 Solução numérica do modelo proposto para as transferências de calor e massa entre o ar e o produto	97
3.5 Malha numérica	101
3.5.1 Procedimentos Elípticos, Parabólicos e Hiperbólicos para EDPs	102
3.6 Simulação da condensação da água	104
3.7 Modelagem matemática do controlador no processo de secagem	106
3.8 Casos estudados	111
4 Resultados e Discussões	112
4.1 Obtenção dos valores de umidade com o modelo desenvolvido	112
5 Conclusões e Sugestões	128
5.1 Conclusões	128
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	130
Referências Bibliográficas	133
Anexo	145

RESUMO

TAVARES, Francisca Valdeiza de Souza, *Otimização e Controle de Secadores Convectivos Tipo Túnel. Estudo de Caso: Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2018. 180 p. Tese (Doutorado).

Controlar e otimizar o processo de secagem de tijolos cerâmicos é imprescindível para garantir a qualidade do produto, evitar refugos e desperdícios energéticos, promovendo um menor impacto ambiental, bem como proporcionar menores custos de produção e mais segurança no processo. O presente trabalho tem por objetivo estudar teoricamente o controle do processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em secador de fluxos-cruzados tipo túnel utilizando o controlador do tipo PID. Foi proposto uma modelagem matemática para o fenômeno de secagem baseando-se nos balanços de massa e energia, escritos para um volume diferencial localizado numa posição arbitrária da camada de sólido. A modelagem do controlador PID foi proposta a partir das leis clássicas de controle. Para obter a solução numérica das equações governantes do fenômeno de secagem, utilizou-se o método dos volumes finitos numa formulação explícita e o esquema “*upwind*” como função de interpolação para os termos convectivos. A sintonia dos parâmetros do controlador foi feito pelo método de tentativa e erro, uma vez que o problema numérico é do tipo parabólico e a solução acontece em marcha no espaço. A metodologia foi usada para descrever tanto o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados com dimensões industriais, quanto o controle do secador com dimensões reais em diferentes condições operacionais, bem como a sintonia dos parâmetros de controle. Resultados da influência dos parâmetros no processo e tempo de secagem, bem como 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 apresentadas, analisadas e discutidas. Verificou-se que a secagem controlada de tijolos cerâmicos vazados gera produto de boa qualidade pós-secagem. Já a sintonia dos parâmetros do controlador do tipo PID pelo método de tentativa e erro se mostrou eficaz para este estudo.

Palavras chaves:

Secagem, Fluxos cruzados, Controle de processos, Volumes finitos, Controlador PID.

ABSTRACT

TAVARES, Francisca Valdeiza de Souza, *Optimization and Control of Tunnel-Type Convective Dryers. Case Study: Drying Holed Ceramic Bricks*. Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2018. 180 p. Tese (Doutorado).

Controlling and optimizing the drying process of ceramic bricks is essential to guarantee the quality of the product, avoid waste and energy waste, promoting a lower environmental impact, as well as lower production costs and more safety in the process. The present work aims to study the control of the drying process of ceramic brick cast in a cross-flow dryer using the PID controller. It was proposed a mathematical modeling for the drying phenomenon based on the mass and energy balances written for a differential volume located in an arbitrary position of the solid layer. The PID controller modeling was proposed from the classical control laws. To obtain the numerical solution of the governing equations of the drying phenomenon, the finite volume method was used in an explicit formulation and the "upwind" scheme was used as a function of interpolation for the convective terms. The tuning of the controller parameters was done by trial and error. The methodology was used to describe both the drying process of hollow ceramic bricks with industrial dimensions and the control of the dryer with real dimensions in different operating conditions, as well as the tuning of control parameters. Results of the influence of the parameters on the drying process and time, as well as the moisture content and temperature of the product, absolute humidity, relative humidity and air temperature throughout the bed, are presented, analyzed and discussed at different times. It has been found that drying at moderate relative humidity and temperatures generates good post-drying product. As for the parameters, it was verified that the parameter related to the term of the derivative is very sensitive, since for small variations the dynamic response varies greatly.

Keywords:

Drying, Cross flow, Process control, Finite volumes, PID controller.

LISTA DE FIGURA

Figura 2.1	Maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos	8
Figura 2.2	Produtos cerâmicos dos mais variados setores	9
Figura 2.3	Classificação do tipo de cerâmica segundo sua composição	10
Figura 2.4	Amostras de argilas	12
Figura 2.5	Aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, conforme diagrama de Winkler	13
Figura 2.6	Argila de várzea	14
Figura 2.7	Argila de morro	15
Figura 2.8	Tijolo cerâmico vazado	16
Figura 2.9	Fluxograma do processo produtivo com entradas e saídas de insumos	17
Figura 2.10	Extração da argila	17
Figura 2.11	Processo de mistura da massa cerâmica	19
Figura 2.12	Esquema de um laminador	20
Figura 2.13	Vista de um bocal para fabricação de blocos	20
Figura 2.14	Prensagem uniaxial	23
Figura 2.15	Variação da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde provocada pela fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde	23
Figura 2.16	Secador de leito de fluido (estático)	32
Figura 2.17	Secador contínuo	33
Figura 2.18	Tipos de secadores contínuos básicos: (1) fluxo concorrente; (2) fluxo contracorrente; (3) fluxo cruzado	34
Figura 2.19	Secador contínuo tipo túnel	35
Figura 2.20	Evaporação de água de uma massa argilosa úmida. (a) evaporação de água na película líquida superficial. (b) evaporação na boca dos	38

	poros. (c) evaporação no interior dos poros e transporte de vapor de água até a superfície	
Figura 2.21	Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood	40
Figura 2.22	Visão esquemática de uma massa de argila - água em diferentes estágios da secagem	41
Figura 2.23	Variação da retração em função da água de conformação	42
Figura 2.24	Volume elementar de uma camada do produto	51
Figura 2.25	Sistema de controle manual dos elevadores primitivos	61
Figura 2.26	Descrição simplificada de um sistema de controle	62
Figura 2.27	Exemplo de um controle em malha aberta	65
Figura 2.28	Diagrama de um sistema de controle em malha fechada	67
Figura 2.29	Controle por PID no domínio de Laplace	68
Figura 2.30	Efeito da redução da Banda Proporcional no comportamento de PV	71
Figura 2.31	Efeito da inclusão do controlador integral ao proporcional	72
Figura 2.32	Comparação de um controle Proporcional com um controle Proporcional Derivativo	74
Figura 2.33	Resposta do Sistema em Malha Aberta	77
Figura 2.34	Comparação entre as sintonias propostas por Chien, Hrones e Reswick (CHR) com a de Ziegler e Nichols (Z&N)	81
Figura 3.1	Vagonetas usadas para o transporte dos tijolos ao longo do secador	85
Figura 3.2	Vista externa do secador industrial	85
Figura 3.3	Vista esquemática do secador industrial. Fonte: Almeida	86
Figura 3.4	Representação da vista angular da vagoneta	87
Figura 3.5	Representação da vista superior e frontal das vagonetas e dos ventiladores dentro do secador	87
Figura 3.6	Representação das vistas frontal e lateral de uma vagoneta	88
Figura 3.7	Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado	90
Figura 3.8	Volume infinitesimal de sólido na camada	90
Figura 3.9	Esquema do tijolo utilizado nos experimentos	94
Figura 3.10	Esquema das condições iniciais e de contorno no secador	96
Figura 3.11	Esquema numérico e o volume de controle utilizado	98
Figura 3.12	Malha numérica com 20 pontos nodais	102

Figura 3.13	Caracterização das coordenadas	104
Figura 3.14	Esquema da ação do controle no processo de secagem de tijolos	107
Figura 3.15	Fluxograma do processo de secagem de tijolos na simulação	108
Figura 3.16	Demonstração do comportamento do erro em função do tempo	109
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 a) Caso 1, b) Caso2, c) Caso 3, d) Caso 4	115
Figura 4.2	Cinética de secagem do tijolo cerâmico vazado na saída do secador ($z=73\text{m}$) em função do tempo a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4	116
Figura 4.3	Teor de umidade do produto na saída do secador ($z=73\text{ m}$) em função da velocidade das vagonetas a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4	118
Figura 4.4	Correlação da velocidade das vagonetas em função do tempo de processo ao final do secador ($z=73\text{ m}$) a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4	120
Figura 4.5	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 4)	123
Figura 4.6	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 4)	124
Figura 4.7	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 4)	124
Figura 4.8	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 4)	125
Figura 4.9	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 4)	126

Figura 4.10 Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito em diferentes 126
tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados
em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4)

LISTA DE TABELA

Tabela 2.1	Tipos e caracterização da cerâmica vermelha	11
Tabela 2.2	Parâmetros do Controlador PID - Método de Ziegler e Nichols	78
Tabela 2.3	Regras de ajuste dos parâmetros de controlador PID através do método CHR	80
Tabela 3.1	Condições do ar de secagem na entrada do secador para o caso em estudo	111
Tabela 4.1	Condições do ar de secagem na entrada do secador	112
Tabela 4.2	Chutes iniciais dos parâmetros do PID	113
Tabela 4.3	Parâmetros da Equação (3.52) obtidos por tentativa e erro	127

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_{∞}	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]
K_c	Ganho proporcional	[-]
m_p	Massa do produto	[g]
M	Teor de umidade do produto	[kg/kg]
M_{∞}	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]
\bar{M}_{set}	Teor de umidade desejado	[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 ²]
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 _∞	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 ³]
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

α	Coeficiente de condutividade hidráulica	[-]
μ	Viscosidade dinâmica da água	[-]
ε	Porosidade do produto	[-]
ϵ	Desvio entre a umidade medida e o <i>set point</i>	
$\bar{\theta}_a$	Temperatura média do ar	[°C]
$\bar{\theta}_o$	Temperatura inicial do produto	[°C]
ρ	Densidade do sólido homogêneo	[kg/m ³]
ρ_a	Densidade do ar	[kg/m ³]
ρ_p	Densidade do produto	[kg/m ³]
ρ_s	Densidade relativa da substância seca	[kg/m ³]
θ	Temperatura do produto	[°C]
∇	Divergente	[-]
Δ_{up}	Ganho de velocidade das vagonetas	[m/s]
τ_i	Ganho integral	[-]
τ_d	Ganho derivativo	[-]

Superescrito

* Adimensional

Subscrito

ant Anterior
a Ar
c Calor

conv	Convecção
e	Equilíbrio
f	Final
M	Massa
o	Inicial
p	Produto
rad	Radiação
1, 2, 3	Respectivas secções do secador
ent	Entrada
w	Água
v	Vapor
i	Integral
d	derivativo
set	<i>Set point</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O setor de construção civil vem se destacando pelo seu crescimento em ritmo considerável no Brasil ao longo dos últimos anos. Em 2010, houve um crescimento de 15,2% e em 2013 algo em torno de 4% segundo o Sindicato da Indústria de Construção Civil do estado de São Paulo, SindusCon-SP (LUDERS, 2013).

Alguns fatores justificam explicitamente o destaque que a indústria da construção civil tem no Brasil. Os incentivos do governo tais como Minha Casa Minha Vida e Programa de Aceleração do Crescimento, além disso, dois grandes eventos sediados no Brasil como a Copa do Mundo em 2014 e as Olimpíadas em 2016 movimentaram consideravelmente este setor, apesar da relevante desaceleração sofrida advinda da crise econômica vivenciada no momento.

As indústrias que fornecem matérias primas para construção civil tiveram que ampliar o quadro de funcionários, agregar novas tecnologias e algumas ainda inauguraram novas plantas industriais para atender a demanda crescente reflexo destes eventos.

O setor industrial de cerâmica vermelha, também chamada de cerâmica estrutural, é de singular importância para a economia do Brasil e apesar desta ter desacelerado, ainda assim ele tem lugar de destaque. A explicação para o destaque deste setor está, dentre outros fatores, na

abundância de matéria prima na natureza e as fontes de energia alternativa e no desenvolvimento crescente de novas tecnologias.

A distribuição de indústrias no país ainda é muito heterogênea, sendo a região sul e sudeste as que mais concentram essas atividades, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infra-estrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Entretanto outras regiões do país têm ganhado certo destaque, especialmente o Nordeste, que possui uma grande quantidade de recursos minerais, abundância de gás natural, mercado em expansão e grande potencial para exportação (SILVA, 2009; ABECERAM, 2018).

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 apud TAVARES, 2013).

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 nesta área tem sido objeto constante de estudos, pois apesar dos avanços nas últimas décadas, ainda existe muito a se fazer no tocante ao desenvolvimento de tecnologias baseadas na economia energética com baixo impacto ambiental e a consequente otimização da produção do setor cerâmico no Brasil. Assim, a otimização e o controle do processo de fabricação de tijolos cerâmicos em escala industrial é de suma importância para garantir peças de qualidade e consequentemente diminuir refugos e retrabalhos, menores custos de produção, ganho de produtividade, mais segurança na planta industrial. Um processo bem controlado também oferece um menor impacto ambiental, tanto por gerar menos resíduos como por utilizar apenas a energia necessária.

Os tijolos cerâmicos são peças muito utilizadas pela indústria de construção civil e seu processo de produção compreende as diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio

das matérias primas, homogeneização, secagem e queima. Dentro destas etapas, a secagem vem adquirir um papel extremamente importante, uma vez que neste processo ocorre a eliminação da maior parte da água presente na mistura e, conseqüentemente, faz com que haja uma maior retração das peças (LEHMKUHL, 2004). A criteriosa programação dos parâmetros do ar de secagem, bem como as propriedades químicas e mineralógicas terão relação direta com a qualidade do produto final.

A otimização do processo de secagem está diretamente ligada ao equipamento de secagem, devendo este ser projetado e selecionado de modo que uma combinação favorável de custo e qualidade final do produto seja atendida. Os secadores são basicamente câmaras onde a umidade e a temperatura interna são controladas. Estas câmaras são dotadas de dispositivos que proporcionam atuação e medição das variáveis temperatura e umidade do ar simultaneamente. Um secador bem controlado proporciona uma secagem eficiente e econômica, refletindo além de uma boa qualidade do produto uma redução nos custos de fabricação como um todo.

Alguns estudiosos, em seus trabalhos, vêm mostrando interesse no sentido de melhorar a eficiência energética de secadores. Porém, a maioria dos trabalhos, restringe-se a análise de dados baseados na 1ª Lei da Termodinâmica, sem levar em consideração que se pode melhorar a eficiência do processo pela redução de suas irreversibilidades, a qual é baseada na análise de processos regidos pela 2ª Lei da Termodinâmica (KOTAS, 1985 apud SILVA, 2009).

Segundo Campos e Teixeira (2010) no atual mercado competitivo, as empresas são obrigadas a melhorar continuamente a produtividade das suas plantas industriais. Uma das áreas tecnológicas fundamentais para se aumentar a rentabilidade das unidades é a de controle, automação e otimização de processos.

Diversas técnicas de controle podem ser empregadas num sistema, mas a mais usada é a do controle proporcional, integral e derivativo (PID). Esta é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*SingleInput Single Output - SISO*). Sua popularidade se deve ao fato de ser simples de ajustar e ter, no mercado, uma grande variedade de ferramentas que possibilitam sua implementação de maneira fácil e prática. Um exemplo é que todo Controlador Lógico Programável (CLP), por mais simples que seja, possui

o algoritmo PID pronto para ser usado. Existe até aqueles que possuem ferramentas de auto-ajuste do PID reduzindo ainda mais a necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo.

Durante o processo de secagem, sem o devido controle, elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido podem causar defeitos irreversíveis no mesmo, como aparecimento de trincas, deformações e empenamentos. Isto gera perda da qualidade do produto final, ou até mesmo sua perda total, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais. Neste contexto, é fundamental conhecer o mecanismo do movimento de umidade e, os efeitos da secagem e o seu controle, uma vez que estes alteram as propriedades físicas e químicas do produto, e tais alterações afetam sensivelmente o processo de transferência de calor e massa (STRASSBURGER, 2011)

No processo de produção de cerâmica vermelha, as peças com excesso de umidade residual da secagem, quando colocadas nos fornos, perdem rapidamente água, podendo desenvolver trincas superficiais ou até mesmo explodirem. Isto ocorre devido a fenômenos físicos envolvidos na dinâmica de transferência de calor e massa, os quais serão discutidos detalhadamente ainda neste trabalho. É essencial garantir uma secagem controlada e satisfatória para assim, também assegurar uma queima adequada.

O controle dos parâmetros, tanto do ar quanto do produto, envolvidos na etapa de secagem, é imprescindível. Uma alternativa para controlar a secagem e garantir um processo mais sustentável, mais qualidade e confiabilidade do produto, menores custos de produção e até mesmo mais segurança aos trabalhadores é a utilização de técnicas de controle e automação.

Os ganhos na aplicação de tecnologias voltadas ao controle e automação dos processos industriais são enormes. Dentre as vantagens destacam-se:

- Aumento do nível de qualidade dos produtos.
- Minimização da necessidade de reprocessamento. Isto é, com um sistema de controle ruim os produtos podem não atingir as especificações desejadas, o que leva muitas vezes à necessidade de se recircular e fazer com que os produtos passem novamente pelas unidades de processamento, com todos os custos de energia envolvidos.

- Aumento da confiabilidade dos sistemas, pois os controles bem projetados evitam que os equipamentos operem em regiões indesejadas, onde ocorre uma deterioração mais rápida dos mesmos, e possíveis paradas não programadas para manutenção.
- Aumento do nível de segurança da unidade, pois os controles podem atuar para evitar um aumento brusco e perigoso de pressão ou temperatura.
- Liberação do operador de uma série de atividades manuais e repetitivas. Por exemplo, em sistemas com um controle deficiente o operador pode ser obrigado muitas vezes a ficar atuando constantemente em válvulas para manter um nível ou uma temperatura nos seus respectivos valores desejados, deixando de executar uma tarefa de supervisão e otimização da planta.

Frente ao exposto, visando contribuir com o avanço no âmbito tecnológico, este trabalho tem como objetivo geral estudar numericamente o controle e otimização da secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais em um secador tipo túnel de fluxo cruzado. Assim sendo, os objetivos específicos da pesquisa são:

- Propor uma modelagem matemática para descrever o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador de fluxos cruzados tipo túnel e apresentar a solução numérica das equações governantes via método dos volumes finitos;
- Modelar matematicamente o controle do teor de umidade na saída do secador, frente a importância desta no processo de secagem;
- Avaliar na plataforma Mathematica, o controle automático do teor de umidade, bem como o efeito das condições do ar de secagem sobre a qualidade do produto;
- Estimar os parâmetros ótimos do controlador PID de acordo com as condições de secagem;
- Avaliar a secagem de tijolos cerâmicos industriais em diversas condições operacionais;
- 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 Conceito de cerâmica

A palavra cerâmica vem do grego κέραμος, ou *keramikos* que quer dizer matéria-prima queimada. A cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Todos os materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno se enquadram como cerâmica vermelha (ABCERAM, 2018).

2.1.2 Histórico

A cerâmica parece de fato ser o material artificial mais antigo produzido pelo homem. O aparecimento dos primeiros utensílios cerâmicos ocorreu a partir do período Pré- Neolítico, nos anos 25000 a.C., quando se percebeu que o barro, quando deixado sob o sol escaldante, endurecia. Os primeiros objetos cerâmicos tinham a utilidade de armazenar água e alimentos, o que antes era feito usando-se cascas de árvores e crânios de pessoas ou animais. No entanto, pode-se dizer que a cerâmica feita de maneira mais sistemática veio no Neolítico, quando o

homem passou a ser agricultor, pastor e ceramista (RESENDE, 1998 apud BELLINGIERI, 2003).

Existem indícios de atividade cerâmica em quase todos os povos da Antiguidade. Os gregos, por muitos séculos, produziram as melhores peças de cerâmica do mundo Mediterrâneo, como, por exemplo, o *céramo* ou *keramos*, um vaso de barro cozido usado para servir à mesa. 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)

Quando saiu das cavernas e se tornou um agricultor, o homem encontrou a necessidade de buscar abrigo, mas também notou que precisaria de vasilhas para armazenar água, alimentos colhidos e sementes para a próxima safra. Tais vasilhas deveriam ser resistentes, impermeáveis e de fácil fabricação. Estas facilidades foram encontradas na argila, deixando pistas sobre civilizações e culturas que existiram milhares de anos antes da Era Cristã.

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.

De acordo com Tapia et al. (2000), o setor industrial de produção em cerâmica vermelha, no Brasil, 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.

Objetos cerâmicos, tais como vasos, potes, telhas e tijolos, já eram produzidos no Brasil pelos indígenas e pelos colonizadores europeus, durante os períodos 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).

A cerâmica é uma das várias indústrias surgidas a partir do desenvolvimento do mercado interno em São Paulo, que estimulou uma demanda por bens de consumo. A origem da cerâmica como atividade industrial deu-se entre fins do século XIX e início do XX, tendo como marco inicial as olarias, que já se faziam presentes em quase todas as cidades e núcleos urbanos de São Paulo, desde as últimas décadas do século XIX. Em geral, as olarias eram pequenos estabelecimentos que produziam, por processos manuais, inúmeros artigos, como tijolos, telhas, manilhas, vasos, potes e moringas. Foi a imigração italiana, no último quartel do século XIX, que trouxe ao Brasil pedreiros e oleiros detentores de técnicas construtivas que deram início à história da habitação em alvenaria de tijolos em São Paulo (BELLINGIERI, 2005).

A aplicabilidade da cerâmica vai muito além dos tijolos refratários e dos demais segmentos 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 tantas outras aplicações (MILLER, 2008)

De acordo com Prado e Bressiani (2013), o Brasil já era 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 um vigoroso crescimento ultrapassando produtores mundiais tradicionais como Itália e Espanha, conforme mostra a Figura 2.1.

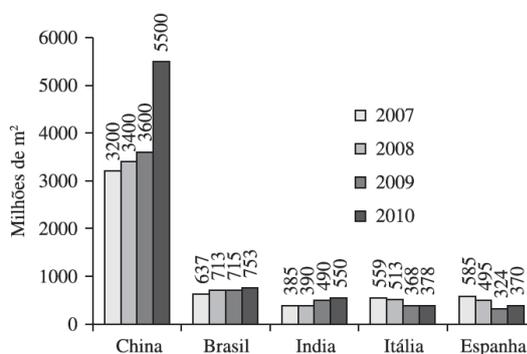


Figura 2.1-Maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos em 2013. Fonte: Prado e Bressiani (2013).

2.1.3 Classificação do setor cerâmico

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 seguir são mostrados alguns exemplo de produtos cerâmicos dos mais variados sub setores (Figura 2.2)



Figura 2.2 – Produtos cerâmicos dos mais variados setores. Fonte: <http://www.metallum.com.br/61cbc/us/index.php>.

De acordo com a ABCERAM (2017), para classificar um produto cerâmico deve-se levar em consideração o emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características texturais do biscoito (massa base), além de outras características cerâmicas, técnicas e econômicas.

Bustamante e Bressiani (2000) afirmam que o setor industrial de cerâmica vermelha ou estrutural é caracterizado por produzir tijolos furados, tijolos maciços, travelas ou lajes, blocos

de vedação e estruturais, telhas, manilhas e pisos rústicos. Distribui-se por todo o país, basicamente em micro e pequenas empresas, geralmente organizações simples e familiares.

A Figura 2.3 relaciona os setores cerâmicos, bem como seus produtos e as respectivas matérias-primas utilizada e processo de fabricação. Nesse sentido, a partir da matéria-prima utilizada identificam-se as cerâmicas tradicionais (ou silicáticas) de base argilosa, tais como: cerâmica estrutural ou vermelha, cerâmica branca e de revestimentos.

Classificação		Produto	Matéria-prima								Processo de		Temperatura de Queima (C)												
Tipo de	Grupo**/ Setor		Argila	Argila	Caulim	Não -Plástica					Moagem via úmida	Moagem via seca	Extrusão	Tornearia	Prensagem	Colagem	800	900	1.000	1.100	1.200	> 1.200			
						Feldspato	Filito	Talco	Calcário	Quartzo													Outros		
Cerâmica silicática de base argilosa (ou tradicional)	1	Cerâmica Vermelha	Blocos, lajes	P									P												
		Telha	P				O						P	P											
		Agregado leve	P								O		P												
	2	Cerâmica Branca	Grês Sanitário		P	S	P	O		S	O	P													
			Porcelana Mesa		P	P				P	P	P	S	S	O										
			Porcelana Eletr.		P	P				P	P	P	S	S	O										
			Faiança		P	O	S	S	S	P	S	P			P										
	3	Revestimentos	Pisos Rústicos	P							O		P												
			Pisos via Seca	P								P		P											
			Azulejo		P	P			O	S	S	P		P											
			Piso Gresificado	O	P	S	S	P	O		S	P	O	P											
			Grês Porcelânico		P	S	P		O		S	O	P		P										
Outros	4	Refratários			O					O	P														
	5	Isolantes				O				O	P														
	6	Especiais								O	P														
	7	Cimento	S						P	S	O	P													
	8	Vidro							S	P	P														

P = Processo ou composição principal (> 20 %) S = Processo ou composição secundária (< 10%) O = Processo ou composição ocasional

Figura 2.3 – Classificação do tipo de cerâmica segundo sua composição. Fonte: Mota et al. (2001).

A Tabela 2.1 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 (ílita). 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 é muito variável de acordo com as áreas de estudo, função, formação técnica ou científica. Na literatura podemos verificar as diversas definições de argila. 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).

Macedo et.al. (2008) afirma que em geral, as argilas são materiais muito heterogêneos, cujas características dependem da sua formação geológica e da localização da extração. Enquanto Santos (1989), comenta que a definição clássica designa argila como um material natural, terroso, de granulação fina que quando umedecido com água apresenta plasticidade;

quimicamente, são materiais formados essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, denominados argilominerais.

Almeida (2009) afirma que 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.

Dependendo do local de extração, do tipo de solo, da composição granulométrica e dos próprios componentes, as argilas podem apresentar muitas variações em suas propriedades bem como coloração, plasticidade e até mesmo resistência. Na Figura 2.4 são mostradas três amostras de argila. Como pode-se observar com coloração diferentes.



Figura 2.4 - Amostras de argilas. Fonte: <http://www.ceramicanorio.com/beaba.html>.

2.2.1 Argila para a produção de cerâmica estrutural ou vermelha

No processo produtivo de cerâmica vermelha a argila comum é a matéria prima básica, já que a massa é tipo monocomponente, ou seja só argila, e pode ser denominada de simples ou natural (EMILIANI E CORBARA, 1999).

Os produtos da cerâmica vermelha caracterizam-se, como o próprio nome sugere, pela cor avermelhada representadas por tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajotas, vasos ornamentais, agregados leve de argila expandida entre outros (SEBRAE, 2008).

Essa formulação de massa busca, em geral de forma empírica, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para propiciar trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. A preparação da massa é feita geralmente através da mistura de uma argila “gorda“, que é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais; com uma argila “magra“, esta rica em quartzo e menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade (MOTTA, 2001).

O diagrama de Winkler prevê a composição granulométrica das massas e seus respectivos campos de aplicação. (Figura 2.5)

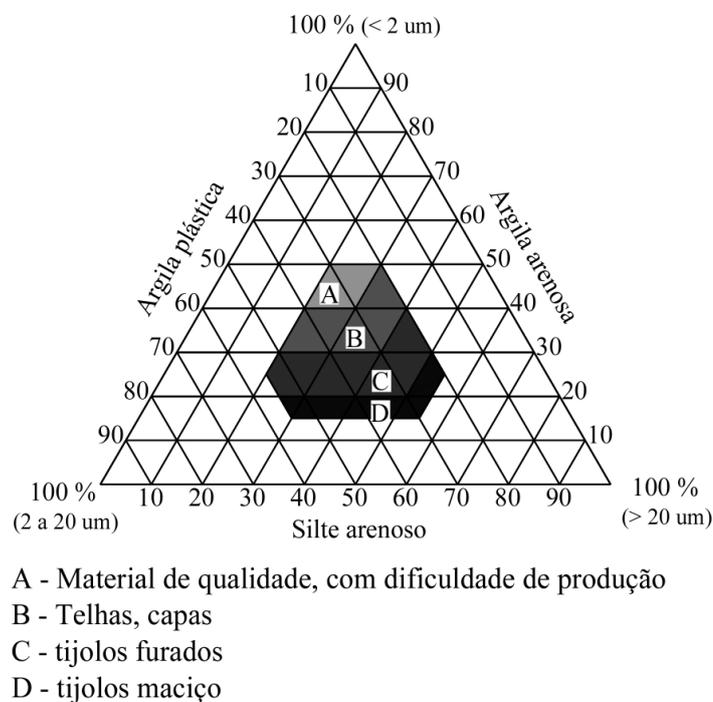


Figura 2.5 - Aptidão das massas de cerâmica vermelha segundo a composição granulométrica, conforme diagrama de Winkler. Fonte: Pracidelli e Melchiades (1997).

Motta (2001) observa ainda que, na prática ceramista, a utilização da classificação granulométrica da massa é empírica, baseada na experiência do cerâmico prático, o que dificulta a padronização e a transferência do saber cerâmico. Outra observação é que os limites entre as classes de argila não é rígido, notadamente entre as classes C e D, pois vários ceramistas usam a mesma massa para a confecção de telhas e blocos cerâmicos (tijolos furados). Adicionalmente à composição granulométrica, que reflete o conteúdo de argilominerais e quartzo, as argilas

contêm também proporções variadas de matéria orgânica, material que contribui para maior plasticidade e resistência mecânica a cru das peças.

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).

Ainda 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 2.6): 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 2.6 - Argila de várzea. Fonte: <http://g1.globo.com>.

- Argilas de morro (Figura 2.7): 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 2.7 - Argila de morro. Fonte: www.museum.in.ufrgs.br.

2.3 Tijolos

Investigações arqueológicas realizadas até o momento, indicam que os primeiros tijolos empregados na construção foram fabricados na Mesopotâmia e datam de 4000 a.C.. Neste período, os tijolos eram utilizados no estado seco e não queimados. Os primeiros tijolos queimados datam de 3000 a.C. e eram empregados para revestimentos externos e mais frequentemente como muros de proteção (OLIVEIRA et al., 2000).

No Brasil, a fabricação de tijolos e outros produtos afins ocorreram no início do século passado. Entretanto, somente na década de 1930 é que foram fabricados os primeiros tijolos furados através de processos mecanizados (BATISTA et al., 2009).

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.



Figura 2.8 - Tijolo cerâmico vazado. Fonte: <http://www.ceramicasalema.com.br/blocos-de-vedacao/>.

2.3.1 Etapas do processo produtivo de cerâmica vermelha

De modo geral a matéria prima para produção de produtos cerâmicos estruturais passam por diversas etapas até serem convertidos em produtos finais. De acordo com o prévio estudo das características da matéria prima, esta é coletada e transportada das jazidas para os galpões de estocagem, onde passam por uma segunda análise e são dosados de acordo com as características e propriedades a que se deseja o produto final.

As etapas produtivas da indústria de cerâmica vermelha são ilustrados no fluxograma a seguir (Figura 2.9). Neste fluxograma são contempladas as entrada e saídas de insumos. Vale ressaltar que todos os resíduos sólidos (saídas) podem ser reintroduzidos no processo interno ou externo (FIEMG, 2013). Entretanto, é interessante frisar que após a queima os resíduos e refugos não são reintroduzidos no processo de fabricação. As transformações físico-químicas ocorridas no processo de queima conferem outras características ao material “cozido”. Portanto até o final do processo de secagem, caso ocorra algum defeito o material pode ser reintroduzido no processo desde que se tome os cuidados cabíveis.

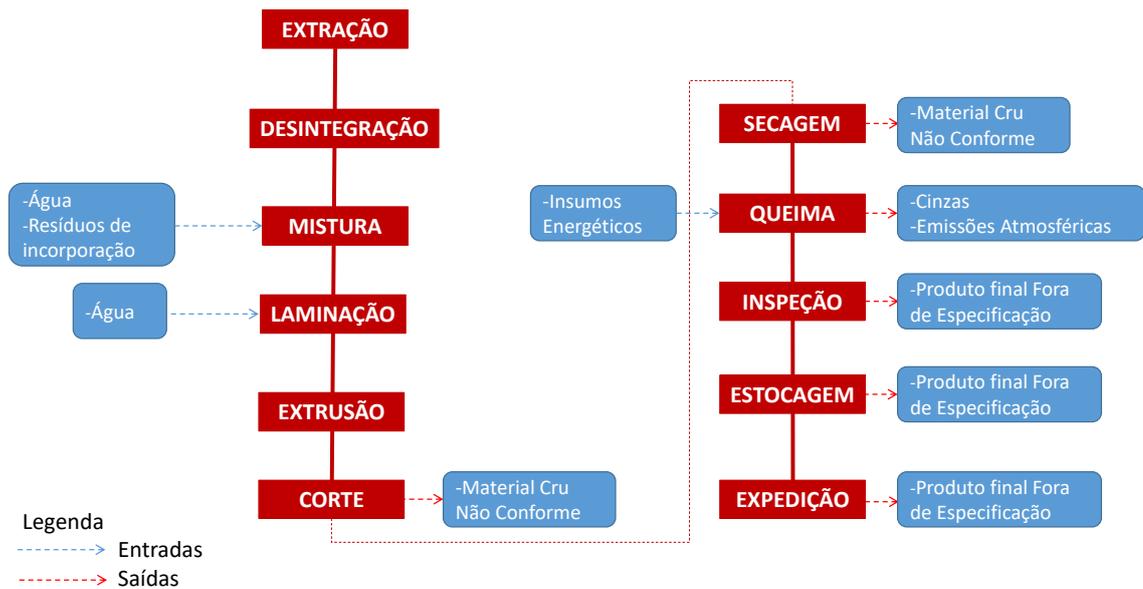


Figura 2.9 – Fluxograma do processo produtivo com entradas e saídas de insumos.

Fonte: FIEMG (2013).

Extração - A extração de argila ocorre a céu aberto, de preferência nos meses de menor precipitação, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada, com auxílio de escavadeiras, pás carregadeiras, trator de esteira com lâmina, entre outros equipamentos.



Figura 2.10 - Extração da argila. Fonte: ANICER (2013).

Após a coleta a argila é entregue aos depósitos para posterior preparação. Ao receber a argila, o profissional responsável deve coletar uma pequena amostra para ensaio, onde serão avaliados a composição e características, sendo recomendada esta operação na primeira e na última carga para verificar se houve alguma mudança significativa na extração. Uma vez que é

muito menos oneroso identificar um problema nas etapas mais iniciais do que após a secagem ou queima, quando se é muito maior o custo agregado ao processo.

No recebimento a argila deve ser armazenada em pequenos lotes cobertos com uma lona plástica para acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica e sais solúveis. A matéria-prima deve ser armazenada em camadas para facilitar a mistura no momento de sua retirada das pilhas de estocagem.

É importante que a argila passe por um período de descanso para melhorar os resultados na conformação do produto acabado.

Desintegrador – as matérias-primas são colocadas numa correia transportadora, que as descarrega num desintegrador e que por sua vez, tritura os torrões de argila e elimina os pedregulhos. O desintegrador compõe-se de dois cilindros. O cilindro maior gira em baixa velocidade e tem a função de manter uma alimentação constante de material. O cilindro menor, com facas, girando em alta velocidade, quebra os torrões mais duros de argilas secas, proporcionando um material uniforme e facilitando o trabalho das demais máquinas usadas na fase de preparação para a extrusão (ALMEIDA, 2009).

Misturador - A preparação da massa consiste na mistura dos diversos tipos de argila, água e resíduos, quando aplicáveis. Depois da etapa do desintegrador, as matérias-primas são alimentadas num moedor/misturador (Figura 2.11), onde é adicionada água, até que a massa cerâmica formada tenha a umidade e a plasticidade necessárias à extrusão. Durante a permanência da argila no moedor, uma dupla fila de facas helicoidais, colocadas longitudinalmente, efetua uma intensa mistura. A argila se encaminha, gradativamente homogeneizada, até sua saída, para o estágio seguinte de preparação.



Figura 2.11 - Processo de mistura da massa cerâmica.

Fonte: ANICER (2013).

A produção de uma boa massa cerâmica é um passo essencial para obtenção de um produto de alta qualidade, redução de perdas e conseqüentemente melhoria do desempenho ambiental do processo. Para tal, recomenda-se que sejam adotadas as seguintes práticas:

- Boa homogeneização da argila (argila/argila e argila/água). A adição de água na mistura deve ser centralizada e nunca nas laterais, de modo a facilitar a mistura. A utilização de água quente na mistura acelera o processo de absorção de água pelo centro do grão argiloso, podendo ser reutilizada da bomba de vácuo, ou outros processos viáveis disponíveis na empresa.
- Redução dos grãos;
- Descanso da massa cerâmica por um período de 24 a 48 horas.

Segundo a FIEMG (2013), uma massa bem preparada pode gerar grandes benefícios como mais de 35% de economia do consumo de energia; aumento de 25% na produtividade; Redução de cerca de 40% dos índices de deformação.

Laminador - após ser misturada, a massa cerâmica passa nos laminadores (Figura 2.12), onde recebe um adensamento, eliminando as bolhas de ar e direcionando as partículas de argila, sendo fundamental sua regulagem periódica.

A qualidade da laminação é fundamentalmente importante para a qualidade do acabamento dos produtos, evitando perdas e conseqüentemente levando a uma redução no consumo de energia na queima, visto que a granulometria do material diminui.

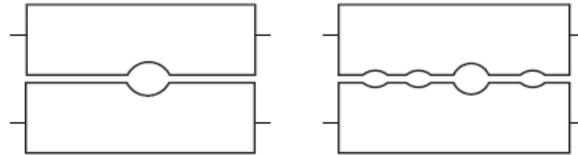


Figura 2.12 - Esquema de um laminador.

Fonte: FIEMG (2013).

Extrusão - A extrusão consiste em forçar, por pressão, a massa a passar através de um bocal apropriado ao tipo de peça a ser produzida. A extrusora, também conhecida como maromba, recebe a massa preparada para ser compactada e forçada por meio de um pistão ou eixo helicoidal através de bocal. Como resultado obtém-se uma coluna extrusada para confecção de blocos (Figura 2.13) ou em tarugos para fabricação de telhas. Esta etapa representa aproximadamente 15% dos custos de fabricação, devido ao alto consumo energético bem como ao desgaste dos componentes (FIEMG, 2009).



Figura 2.13 – Vista de um bocal para fabricação de blocos. Fonte: FIEMG (2013)

A extrusão é usada para o processamento de produtos cerâmicos há mais de 150 anos, tendo a tecnologia sofrido pequenas alterações a partir da década de 50 do século passado. No entanto, este processo de conformação industrial tem se revelado essencial nas indústrias cerâmicas de barro vermelho (telhas e tijolos). É uma técnica de produção associada a uma

elevada produtividade, principalmente para produtos de seção transversal constante (tijolo) e muito importante em termos de homogeneização e retirada do ar da massa (ALMEIDA, 2009).

Segundo a Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (2013), é importante seguir algumas recomendações para melhor aproveitar os recursos destinados ao processo de extrusão, são eles:

- ✓ Utilizar motores de alta eficiência, com selo do Procel/Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e componentes de alta resistência à abrasão;
- ✓ Utilizar boquilhas cerâmicas, confeccionadas com material de alta resistência, proporcionando aumento da durabilidade dos componentes internos;
- ✓ Verificar o nivelamento entre boquilha e cortadeira;
- ✓ Perfilar o conjunto de ferragens atrás da boquilha, de tal modo que a velocidade e a pressão de extrusão estejam equilibradas, tanto na periferia quanto no centro;
- ✓ Realizar o balanceamento correto da hélice quando for necessária sua recuperação;
- ✓ Tomar cuidados na recuperação da ponteira, pois ela é responsável por mais de 90% dos defeitos de extrusão;
- ✓ Utilizar bomba a vácuo, pois auxilia na redução da quantidade de ar incorporada na massa, garantindo maior resistência;
- ✓ Reaproveitar a água que sai da bomba a vácuo na produção ou enviá-la para um sistema de resfriamento antes de retornar à bomba;
- ✓ Para melhorar o processo de secagem, procurar trabalhar com a umidade de extrusão mais baixa possível;
- ✓ Controlar a amperagem em função da umidade da massa.

Corte - Pode ser realizado com cortadores manuais ou automáticos, sendo usado para dar a dimensão desejada ao produto. As peças cortadas podem ser retiradas manualmente ou automaticamente. Depois de cortadas, por inspeção visual, as peças são selecionadas e encaminhadas para o setor de secagem. Já as peças defeituosas são reintroduzidas na etapa de preparação de massa.

Prensagem - A prensagem tem por objetivo conformar a peça, atribuindo-lhe resistência mecânica suficiente para suportar as diversas solicitações ao longo do processo produtivo, além de facilitar a uniformidade das peças, de acordo com as dimensões e a geometria pré-estabelecidas. Permite que o produto final apresente as características microestruturais desejadas (porosidade, distribuição de tamanho de poros, tamanho de partículas, etc.), que irão determinar as características técnicas da peça (resistência mecânica, absorção de água, etc.).

A prensagem é a operação de conformação baseada na compactação de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível, através da aplicação de pressão. A operação compreende três etapas ou fases: a) preenchimento da cavidade do molde, b) compactação da massa e c) extração da peça (ALBERO, 2000).

Existem diversos processos para dar forma às peças cerâmicas, e a seleção de um deles depende fundamentalmente de fatores econômicos, da geometria e das características do produto. Porém a conformação é o procedimento mais utilizado pela indústria cerâmica devido à sua elevada produtividade, facilidade de automação e capacidade de produzir peças de tamanhos e formas variadas, sem contração de secagem e com baixa tolerância dimensional.

Ainda de acordo com Albero (2000), distinguem-se duas grandes modalidades de prensagem: a prensagem uniaxial e a prensagem isostática. Na primeira, a compactação do pó se realiza em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de punções rígidas. É utilizada para conformar peças que não apresentam relevo superficial na direção de prensagem. Se a espessura da peça que se deseja obter é pequena e sua geometria é simples, a carga pode ser aplicada em apenas um sentido (ação simples).

Por outro lado, para conseguir peças de grande espessura e geometria complexa, com uniformidade de compactação, é indispensável que a prensagem seja feita nos dois sentidos (dupla ação), ou então que se empregue um molde complexo com múltiplas punções (Figura 2.14) (ALBERO, 2000).

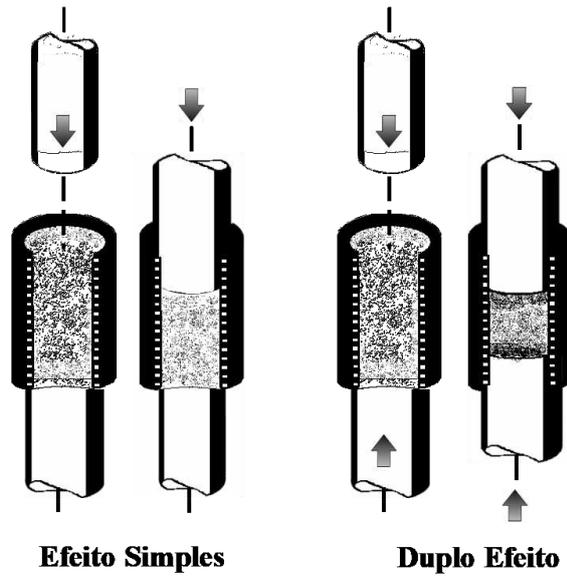


Figura 2.14 – Prensagem uniaxial. Fonte: Albero (2000).

A fricção entre as próprias partículas do pó e também a fricção entre as partículas e a superfície do molde impedem que a pressão aplicada a uma ou mais superfícies da peça, seja integralmente transmitida e uniformemente distribuída a todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade e pressão nos corpos conformados (Figura 2.15). Entre os produtos prensados, destaca-se telhas, pisos e azulejos.

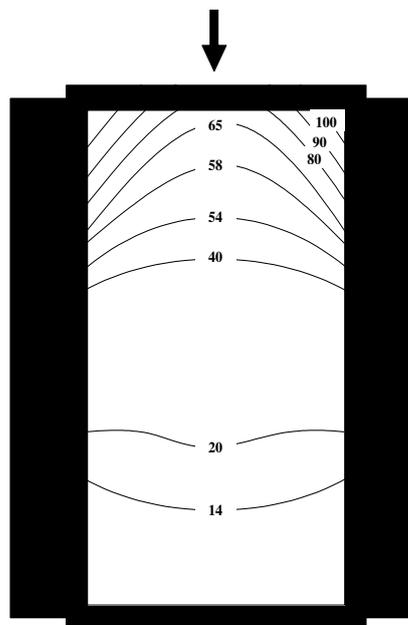


Figura 2.15 – Variação da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde provocada pela fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde. Fonte: Albero (2000).

Deve-se garantir uma boa qualidade no processo de prensagem, uma vez que as propriedades da peça queimada assim como as propriedades do produto acabado tem forte influência da prensagem. Entre os defeitos mais comuns que os revestimentos apresentam devido às deficiências oriundas na etapa de prensagem, pode-se citar: baixa compactação, excesso de compactação provocando elevada retração na peça, falta de esquadros, curvaturas, trincas, defeito em cunha, sujeira no molde, rebarbas, furos e baixa resistência mecânica (compactação abaixo do normal).

Secagem – Depois que a massa cerâmica é extrudada ou prensada adquire o formato desejado e os as peças são encaminhadas para a secagem. A etapa de secagem objetiva a redução do teor de umidade dos produtos de 18 a 20% após a extrusão ou prensagem, para 6 a 10% após a secagem. Existem dois métodos de secagem de peças cerâmicas, o natural ou o artificial. É importante destacar que a argila, de acordo com suas características, necessita de uma quantidade ideal de água para adquirir plasticidade suficiente e proporcionar uma boa moldagem. Pouca água irá dificultar a moldagem, enquanto que, água em excesso dificulta a secagem e a queima, e provoca fissuras e refugos exagerados. Posteriormente será apresentado um item específico e mais detalhado sobre o tema.

Queima - Nessa operação as peças adquirem suas propriedades finais. Esse tratamento térmico é responsável por uma série de transformações físico-químicas das peças como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem (sinterização) dos grãos. Os produtos são submetidos a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800° C a 1.000° C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases:

- aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
- patamar durante certo tempo na máxima temperatura da curva de queima;
- resfriamento até temperaturas inferiores a 200° C.

O ciclo de queima compreendendo as três fases, dependendo do tipo de produto e da tecnologia empregada, pode variar de algumas horas até vários dias.

Resfriamento – Após a queima o produto permanece no interior do forno para que possa resfriar. O tempo de resfriamento depende entre outras coisas do tipo de produto que foi queimado.

Controle de qualidade – É feito na saída do forno, rejeitando-se o material quebrado, trincado, lascado e/ou queimado em excesso

O controle de qualidade é feito somente através da inspeção visual. Porém, algumas empresas retiram amostras dos produtos para análise e teste em laboratórios, afim de detectar possíveis problemas e falhas que acontecem e não são perceptíveis a olho nu. O armazenamento dos produtos acabados é feito, geralmente, em área coberta, para posteriormente serem comercializados.

Algumas empresas já estão adotando o sistema de embalagem em plásticos e colocação em pallets, o que facilita o carregamento e transporte dos produtos. Bem como evita alguns inconvenientes que podem surgir após a estocagem.

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).

O processo de secagem envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, “*momentum*” e variações dimensionais, exigindo a necessidade de se gerar modelos matemáticos que consigam prever o mais real possível o fenômeno físico. Para que isso ocorra, é importante inserir no modelo matemático de secagem, o máximo de informações, tais como: mecanismo de transporte de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, encolhimento, transferência de calor e massa acoplados, condições ambientes externas próximo

do sólido, entre outros, tornando possível relacionar corretamente o modelo com a situação física.

A secagem é um processo termodinâmico, por meio do qual ocorre a redução da umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. O transporte de umidade, do interior para a superfície do material pode ocorrer na forma de líquido e/ou vapor, dependendo do tipo do produto e do percentual de umidade presente. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento do mecanismo do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (ALMEIDA, 2003).

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. No caso dos grãos, por exemplo, suas características alimentícias podem ser afetadas, e no caso das sementes, sua característica germinativa. Já no caso de materiais cerâmicos podem ocorrer trincas, deformação entre outros efeitos (OLIVEIRA, 2006).

2.4.1 Métodos de secagem

Dos métodos de secagem existentes pode-se citar a secagem por absorção, secagem por separação mecânica e a secagem por evaporação, principais métodos de secagem para o setor cerâmico, segundo Bristot (1996).

Secagem por absorção – Absorção é a fixação de uma substância (líquida ou gasosa) no interior da massa de outra substância (sólida). Trata-se de um processo químico que consiste no contato do ar com o elemento secador (cloreto de cálcio, cloreto de lítio). A água ou vapor, em contato com esse elemento, mistura-se quimicamente com ele, formando um resíduo que deverá ser removido periodicamente do absorvedor. Portanto, este fenômeno ocorre quando um corpo poroso com composição química que se altera frente à água, devido à absorção da mesma, entra em contato direto com massas que tenham elevado teor de água (barbotina principalmente); é o caso dos moldes de gesso (colado).

Secagem por separação mecânica – Pode ser realizada por filtração, compressão e centrifugação; entretanto, constitui na realidade uma etapa de pré-secagem, como é o caso também da absorção. É usada para certos tipos de massas cerâmicas, recuperação de esmalte, etc; é o caso do filtro-prensa.

Secagem por evaporação – É o método universal de secagem de sólidos e líquidos não voláteis, acompanhado da absorção de calor. Sendo este o método usado universalmente para secagem de argila e corpos cerâmicos em geral, é o método que será estudado.

A técnica de secagem convectiva ou evaporativa 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 para fora, e conseqüentemente a retirada das moléculas de água do mesmo. O ar quente transporta calor para o produto a ser desidratado, promovendo a evaporação da água nele contido.

A passagem de estado da água líquida para vapor, em qualquer condição que ocorra, é um fenômeno físico que é acompanhado de uma forte absorção de calor. Cada 1 kg de água evaporada nas temperaturas médias dos secadores industriais, necessita de 2.420 a 2.500 kJ (580 a 600 kcal) (LEHMKUHL, 2004).

Em linhas gerais, os meios adotados para a secagem por evaporação, são (LEHMKUHL, 2004):

- a) **Aquecimento direto** do material e do líquido contido, mediante sistemas particulares:
- **Raios infravermelhos**, os quais, por irradiação direta e em ambiente protegido, transmitem calor para a superfície externa do produto e desta, por condução, para o seu interior;
 - **Microondas**, mediante ondas eletromagnéticas curtíssimas que induzem o aquecimento do produto com temperaturas maiores no seu interior;

- **Autoclave**, ou ambiente fechado, onde seja possível um aquecimento de todo o produto, argila e líquido, à temperatura superior àquela de ebulição do líquido. A diferença em relação ao sistema com raios infravermelhos reside no fato de que durante o aquecimento, a evaporação permanece freada pela pressão que se forma no interior do ambiente fechado. Isto torna possível atingir-se a temperatura de ebulição. A abertura controlada de uma válvula de comunicação com exterior, provoca na autoclave uma diminuição de pressão que aciona uma secagem muito rápida.
- b) **Aquecimento indireto** por meio de ar que ventila o produto, aproveitando o fenômeno físico da transmissão de calor por convecção bem como a capacidade do ar em absorver o vapor. Neste processo, o ar enquanto cede calor para a evaporação e o aquecimento do produto, se esfria ao mesmo tempo. O processo atinge um limite quando o ar atinge a temperatura de saturação (umidade relativa de 100%), abaixo da qual não pode mais absorver o vapor. A secagem com ar pode ocorrer de dois modos (LEHMKUHL, 2004):
- **No ambiente atmosférico (secagem natural)** pelo aproveitamento da ventilação e da temperatura ambiente, em que o calor necessário para secagem é fornecido pelo ar. Na secagem natural o produto úmido é deixado ao ar livre. Pode-se também colocar o produto a ser secado sobre fornos para aproveitar o calor perdido para o meio ambiente.

Sem a remoção do ar circulante, os produtos cerâmicos são secos entre 7 e 15 dias, conforme a umidade do material e a umidade relativa do ar ambiente dos locais de secagem. Deve-se ressaltar que quando o ar está demasiadamente seco, ele acarreta uma diferença de velocidade de secagem entre a superfície e o interior da peça, provocando defeitos tais como rupturas (trincas e quebras), empenamento, etc. (TELLJOHANN, 2003).

Este sistema de secagem ainda é utilizado em olarias, fábricas de telhas, fábricas de tijolos em geral e, muitas vezes, para secagem de esmalte. A secagem natural apresenta os seguintes inconvenientes:

- O tempo de secagem é muito longo, chegando às vezes, até quinze dias nos dias chuvosos;

- Excessivos manuseios das peças, acarretando elevados índices de perda e, conseqüentemente maiores custos de produção;
 - Ocupação de grandes áreas cobertas, para colocação das peças tendo em vista a demora para secar;
 - Não se tem uma precisão na estimativa do tempo de secagem;
 - Sofre forte influência das condições climáticas;
- **Em ambiente fechado**, com temperaturas controladas mediante alimentação de ar pré-aquecido no exterior ou com aquecimento em parte obtido no interior. O calor de secagem fornecido pelo ar neste caso, deve não somente considerar a energia necessária para a transformação do líquido em vapor e das quantidades posteriores de calor já discutidas, mas também para os seguintes conjuntos de perdas:
 - Fugas de ar quente
 - Energia acumulada no ar, quando este sai do secador com temperatura mais alta do que aquela do ambiente (perdas na chaminé).

Na avaliação comparativa entre um sistema e outro, são computados também os ônus derivados das despesas de instalações de todo o conjunto, bem como as possibilidades ou não de se usufruir de todo o calor fornecido pelo forno (recuperação do resfriamento do material queimado e por troca térmica com gases de exaustão). A secagem por ar desfruta facilmente todas as possibilidades de cessão de calor por parte do forno (LEHMKUHL, 2004).

2.4.2 Secadores

A secagem pode acontecer naturalmente, artificialmente ou ambos. Na secagem natural, conforme já discutido, o processo depende diretamente das condições do ar ambiente. De tal forma, que não se tem um controle preciso ao longo do processo e não se consegue estimar um tempo ideal de processamento. Variações nas condições climáticas podem interferir bruscamente no processo e conseqüentemente não há controle do processo como um todo.

Tendo o sol como a principal fonte energética utilizada para o aquecimento do produto, a secagem de forma natural é um método muito demorado e consiste em expor o produto por

longos períodos à radiação solar ou a sombra, mas em ambiente relativamente seco e sob condições climáticas consideradas ideais, ou seja, temperaturas relativamente altas, ventos com intensidade moderada e baixas umidades relativas, a fim, de que a água seja parcialmente removida do produto por evaporação. A secagem natural apresenta algumas desvantagens quando comparado à secagem artificial, dentre elas pode-se citar: é um método que requer muito tempo de processo para a retirada da água e por isso pode favorecer a ocorrência de perdas de produto devido às contaminações através de insetos e micro-organismos, principalmente em produtos com alto teor de umidade (SZULMAYER, 1971; BASUNIA et al., 2001; ERTEKIN et al., 2004; JAIN et al., 2007 apud SILVA, 2016).

Uma maneira para se controlar as variáveis de processo é estabelecer um ambiente propício onde se possa ter domínio sobre as mesmas. Isso é possível quando se utiliza a técnica de secagem artificial.

A secagem artificial se dá através da utilização de secadores e do condicionamento do ar de secagem, onde a remoção da umidade ocorre sob controle dos parâmetros do processo tais como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem. As condições do ar de secagem são pré-estabelecidas de acordo com as características do produto a ser seco. Devendo se ter um criterioso cuidado para não comprometer as características pós secagem, inclusive para manter a qualidade adequada na etapa de queima no caso de tijolos cerâmicos, em especial.

A secagem artificial apresenta várias vantagens, dentre elas, pode-se destacar que, as condições do ar de secagem nos equipamentos não dependem das condições climáticas, favorecendo a obtenção de um produto de qualidade com um menor tempo de processamento. Bem como a capacidade de produção, uma vez que é possível remover com relativa rapidez grandes quantidades de umidade do produto, justificando assim sua larga utilização em escala industrial.

A secagem mista consiste em utilizar dois ou mais métodos (natural e artificial ou artificial e artificial) de forma combinada durante o processo de secagem. A utilização de sistemas mistos de aquecimento com energia solar favorece a economia de energia, pois fornece algumas alternativas economicamente viáveis e podem ser adaptados à instalações de pequeno porte e tornam o processo mais eficientes e ecológico.

A secagem mista também se mostra como alternativa quando as peças cerâmicas apresentam teor de umidade elevado, geometria complexa e grandes dimensões. Neste caso é aconselhável que se faça inicialmente uma secagem natural e, em seguida, a secagem forçada em secadores.

Os secadores são, portanto equipamentos utilizados para acelerar o processo de secagem de produtos em geral. Ou seja, a secagem acontece de maneira forçada.

De acordo com Bristot (1996), secadores são equipamentos nos quais, por meio de calor (normalmente), é efetuada a secagem de materiais. Podem ser classificados de diversas maneiras e entre elas prefere-se a seguinte.

a) baseado no sistema de alimentação do material a secar:

- funcionamento estático ou intermitente;
- funcionamento contínuo;

b) baseado no sistema de aquecimento:

- Aquecimento por convecção;
- Aquecimento por condução;
- Aquecimento por irradiação;
- Aquecimento misto.

2.4.2.1 Secadores de funcionamento estático ou intermitente

Esse tipo de secador carrega e descarrega o material em intervalos de tempo regular (bateladas). São constituídos por dois grupos de áreas separadas, normalmente chamadas de câmaras ou celas.

Durante as horas de trabalho das máquinas de produção, as câmaras são preenchidas uma após a outra de acordo com a produção. Quando é preenchida, cada câmara se fecha e pode iniciar seu processo de secagem. O produto permanece parado e somente o ar se movimenta.

As condições termohigrométricas internas é que variam com o tempo à medida que o ar aquece o produto e o produto cede umidade para o ar.

É possível a realização de um processo particular de secagem para cada câmara, já que estas são independentes uma da outra. O fato de se poder efetuar regulagens diferentes para cada tipo de produto, é considerado como um ponto vantajoso dos secadores estáticos. Porém, a etapa de carga e descarga dos secadores estáticos encontram-se intimamente ligadas ao horário de produção. Na Figura 2.16 um secador estático de leito fluidizado.



Figura 2.16 - Secador de leito de fluido (estático). Fonte:

<http://www.gea.com/pt/products/fluid-bed-dryer.jsp>

Lehmkuhl (2004) ressalta as vantagens e desvantagem dos secadores estáticos ou intermitentes.

➤ Vantagens:

- ✓ Baixo custo de produção.
- ✓ Facilidade de operação nas várias condições de ambientes das necessidades exigidas.
- ✓ Para experiências e trabalhos especiais que exijam o máximo de flexibilidade e escalas de operações intermitentes de tempo.

➤ Desvantagens:

- ✓ A não utilização em operações contínuas, pois sua eficiência térmica é muito baixa sendo difícil obter a mesma temperatura em todos os seus pontos.
- ✓ Não é recomendável para grandes produções.

2.4.2.2 Secadores com funcionamento contínuo

Nesse tipo de secador a carga e a descarga do material ocorre de forma contínua e automática. Em um extremo o produto a ser seco é introduzido e percorre o secador sob as condições especificadas. No outro extremo o produto sai seco. A secagem ocorre de forma contínua no material, e quando corretamente utilizados este tipo de secadores tornam-se eficientes e econômicos.

Do ponto de vista de funcionamento interno os secadores contínuos (Figura 2.17), são caracterizados por uma distribuição fixa, no tempo e no espaço, das condições termohigrométricas e do próprio produto, no seu percurso entre uma e outra extremidade, que pode encontrar variações graduais de condições de secagem.



Figura 2.17 - Secador contínuo. Fonte:

<http://secadorindustrial.com.br/secadores/secador-contínuo/>

Lehmkuhl (2004) explana as principais vantagens e desvantagens dos secadores contínuos.

- Vantagens
 - ✓ todo o material que passa por ele tem o mesmo ciclo de secagem;
 - ✓ maior eficiência energética.

- Desvantagens
 - ✓ alto custo;
 - ✓ carência de flexibilidade.

Os secadores contínuos podem ser classificados, ainda, segundo o movimento relativo entre o fluxo do ar e o fluxo do material a ser seco. A Figura 2.18 ilustra três tipos básicos de secadores contínuos.

Os secadores onde o fluxo de material e de ar são paralelos e tem o mesmo sentido (Figura 2.18 (a)) são ditos concorrentes. Já os que possuem fluxo de material e de ar paralelos, porém com sentidos opostos são chamados de secadores de fluxo contracorrentes (Figura 2.18 (b)). Por outro lado, aqueles cujo os fluxos de material e de ar são perpendiculares classificam-se como secadores de fluxo cruzado (Figura 2.18 (c)).

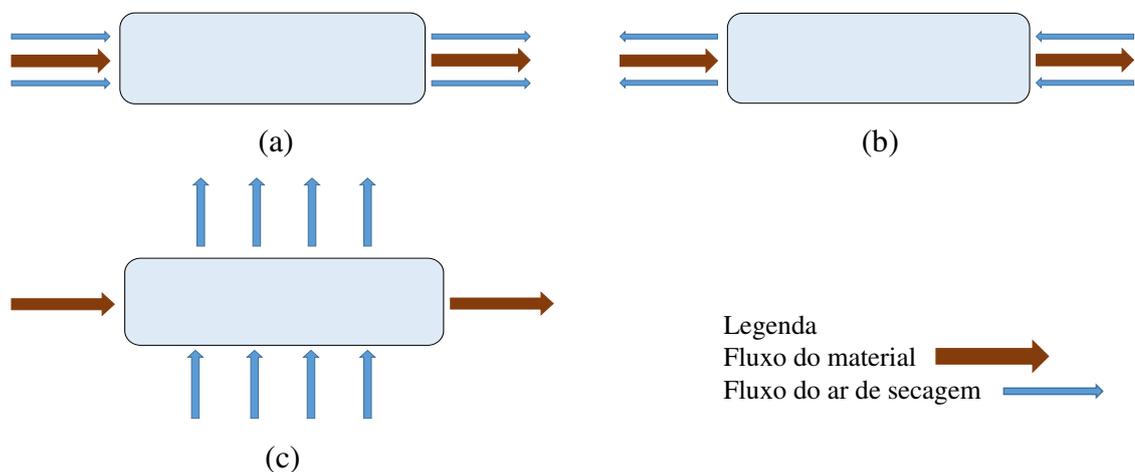


Figura 2.18 - Tipos de secadores contínuos básicos: (a) fluxo concorrente; (b) fluxo contracorrente; (c) fluxo cruzado.

Os secadores contínuos podem ser usados para qualquer tipo de produto cerâmico, entretanto são usados preferencialmente para pisos, azulejos, telhas e manilhas, certos tipos de produtos domésticos (louças e sanitários), refratários, tijolos, etc.

2.4.2.3 Secadores contínuo tipo túnel de fluxo cruzado

Dentre os vários tipos de secadores, o considerado neste trabalho foi o contínuo tipo túnel com sistema de aquecimento por convecção e de fluxo cruzado. Bristot (1996) ressalta a importância do secador tipo túnel para a indústria cerâmica. Sendo este constituído de um túnel propriamente dito, metálico ou de tijolos e um trilho no qual se move uma série de carrinhos que transportam o material a ser secado. Eles percorrem o túnel desde o extremo mais frio e úmido até o mais quente e seco, proporcionando as trocas de calor e umidade entre o produto e o ar.

Este túnel pode ser equipado com elementos próprios de aquecimento, ventiladores, controladores de umidade, controladores de temperatura e pressão entre outros elementos. Os carrinhos existentes avançam uma medida que corresponde ao comprimento dos mesmos, a intervalos pré-estabelecidos de tempo; enquanto um novo carrinho com material úmido é introduzido, um outro com material seco é retirado do lado oposto do túnel. Além dos carrinhos outros sistemas podem ser empregados para transportar o material a ser secado pelo túnel deste tipo de secador (LEHMKUHL, 2004).



Figura 2.19 - Secador contínuo tipo túnel. Fonte:

<http://secadorindustrial.com.br/secadores/secador-continuo/>

Ainda segundo Lehmkuhl (2004), um secador túnel pode ser dividido em três zonas, a saber:

- Zona úmida: entrada de vagonetas, com comprimento de aproximadamente 1/3 do total;

- Zona neutra: parte central do secador, com comprimento de aproximadamente 1/3 do total;
- Zona seca: corresponde à saída das vagonetas, possui comprimento de aproximadamente 1/3 do total.

Na primeira zona o ar tem cerca de 90% de umidade relativa, contribuindo para formação de um ambiente úmido em torno das peças ou material a secar, dificultando a sua ruptura. Na zona central ou neutra, a umidade relativa do ar é de aproximadamente 60%, na qual as peças e/ou materiais já têm perdido boa parte de sua umidade, atingindo a sua maior retração. O secador túnel é manipulado segundo o tipo de massa, a forma do material a secar e as características gerais do secador. Geralmente estes secadores iniciam a secagem do material com temperaturas em torno de 25° C, aumentada gradativamente até 120°C, para um secador de 80 a 100 metros.

2.4.3 Secagem de materiais cerâmicos

A secagem é uma etapa bastante delicada, complexa e extremamente importante no processo de fabricação de cerâmica. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças, que são perceptíveis somente após queima. Ou ainda, defeitos imperceptíveis a olho nu, mas que comprometem as propriedades físicas e mecânicas do produto.

Quando se mistura uma argila com certa quantidade de água, obtém-se uma massa coesiva que pode ser moldada com facilidade. Esta propriedade é chamada de plasticidade e é característica dos minerais argilosos. Esta água adicionada é chamada de água de conformação e pode se dividir em dois tipos de acordo com a localização dentro da massa argilosa.

O primeiro tipo é denominado de água intersticial. Esta é a água necessária para preencher os poros das partículas. O segundo tipo, é a água livre ou de plasticidade. A água de plasticidade localiza-se entre as partículas argilosas, separando-as e facilitando a trabalhabilidade no processo de conformação (VIEIRA et al., 2003).

Portanto, objetivo da secagem é o de eliminar a água, utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica. A eliminação de água ocorre por evaporação através do aporte de calor, efetuado mediante uma corrente de ar (VIEIRA et al., 2003).

A qualidade das peças cerâmicas tem íntima relação com os parâmetros que envolvem o processo de secagem. A compreensão dos mecanismos envolvidos nesta etapa permite por exemplo, um melhor entendimento entre a influência das condições de secagem e os possíveis defeitos que podem se apresentar explicitamente ou de maneira latente na etapa pós secagem ou na etapa de queima. Sendo assim essa compreensão permite o uso de estratégias de forma a evitar tais defeitos. Posteriormente esse ponto será discutido ainda neste trabalho.

A secagem demanda uma grande quantidade de energia térmica para evaporar a água adicionada a massa durante o processo de extrusão das peças. As relações entre as etapas de extrusão, secagem e queima são complexas e mudanças, ainda que pequenas, em pelo menos uma destas etapas afetam toda a sequência da produção. Entretanto, esses cuidados em boa parte, são negligenciados.

Ter conhecimento acerca do ar é extremamente importante para a compreensão do fenômeno de secagem, especialmente em materiais cerâmicos. O ar tem a função de transferir calor às peças por convecção e uma vez que este está relativamente seco, irá remover a umidade do produto.

Para a água evaporar, ela necessita de calor para só então passar do estado líquido para o estado de vapor. Essa energia consumida para vaporizar a água faz com que a temperatura na superfície do corpo cerâmico diminua. Isto se dá porque o ar na camada limite fica saturado de vapor de água, fazendo com que o processo de secagem, por um certo tempo, seja interrompido. Porém, o ar quente continua circulando em torno da peça e continua fornecendo calor para a mesma e a umidade que envolve a peça vai sendo removida dando continuidade ao processo de secagem (Figura 2.20). Temperaturas mais elevadas e umidades relativas mais baixas do ar de secagem promovem uma secagem mais rápida. Porém deve-se ter um minucioso cuidado para não comprometer a integridade da peça.

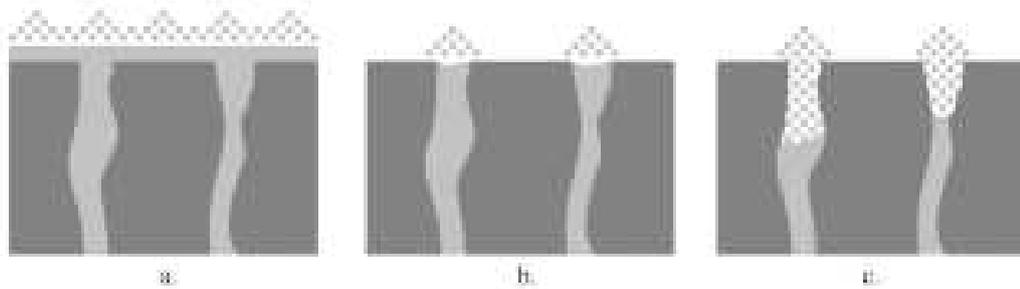


Figura 2.20 - Evaporação de água de uma massa argilosa úmida. (a) evaporação de água na película líquida superficial. (b) evaporação na boca dos poros. (c) evaporação no interior dos poros e transporte de vapor de água até a superfície. Fonte: Verduch e Solana (2000).

Hartke (2004) justifica que a velocidade de secagem da peça cerâmica é limitada pelo comportamento de meio poroso da argila. Como a umidade de 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 conforme já discutido. 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. Percebe-se assim a intrínseca e complexa relação entre o processo de extrusão, com sua influência nas propriedades do meio poroso, e o processo secagem.

Ou seja, caso a peça seja submetida a condições severas do ar (ar muito quente e muito seco), a difusão de umidade dentro do material não acontecerá de forma gradativa. O que acontece é que, se o ar está muito seco e quente ele vai retirar muito rapidamente a água da superfície da peça cerâmica. Enquanto que a velocidade com que a água migra do interior para a superfície não será suficientemente elevada. Desta forma, a parte externa seca, os poros se conformam e a umidade interna fica presa.

2.4.3.1 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, sendo elas:

- adaptação do produto ao ambiente;
- 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.

Na etapa seguinte evapora-se 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 2.21, Brosnan e Robinson (2003) apresentam um gráfico mostrando as curvas das fases da secagem. Nela pode-se observar o comportamento da secagem no tempo, bem como as etapas distintas do processo de secagem.

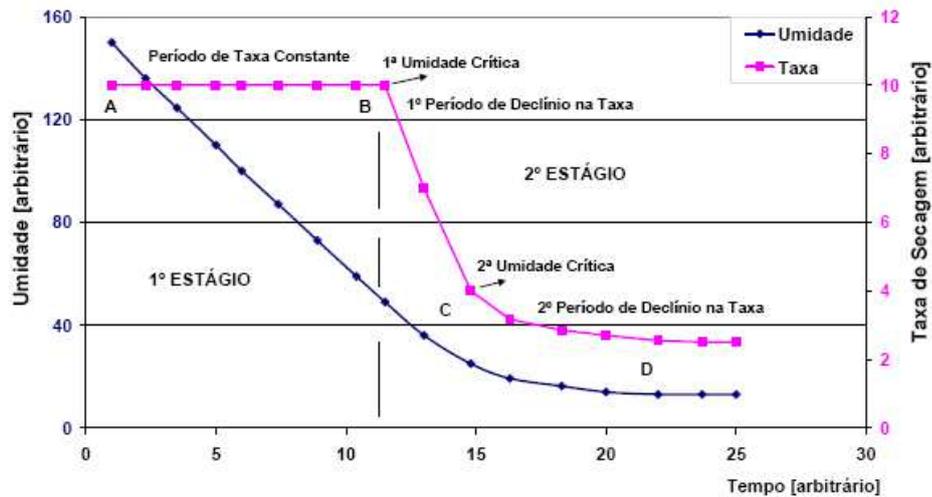


Figura 2.21 - Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood. Fonte: Brosnan e Robinson (2003).

2.4.3.2 Retração

Uma das características dos produtos cerâmicos obtidos através da compactação de pós e que está diretamente relacionada com a secagem é a porosidade do material.

A porosidade pode ser caracterizada pela sua fração volumétrica e seu tamanho, forma e distribuição comparada com outras fases. A porosidade pode variar de zero até 90% do volume total. Muitas propriedades variam bastante com a forma e distribuição dos poros, como por exemplo, a condutividade elétrica e térmica (ALMEIDA, 2009).

Santos (2001) afirma que a secagem de alguns materiais, dos quais a argila é um bom exemplo, é acompanhada por uma contração do volume, devido à remoção da água. Por isso, é necessário que não ocorra altos gradientes de umidade no interior do material, durante a secagem, e conseqüentemente, zonas de retração diferenciada, tais que induzam tensões perigosas à integridade do próprio material.

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 homogênea 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).

Na Figura 2.22 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).

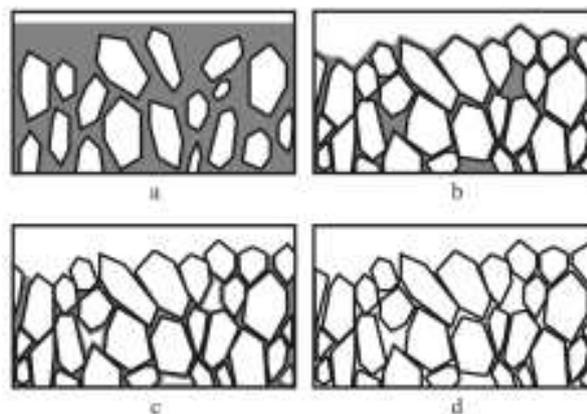


Figura 2.22 – Visão esquemática de uma massa de argila - água em diferentes estágios da secagem. Fonte: Verduch e Solana (2000).

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

Frente a isto, fica claro que a retração que as peças de cerâmica vermelha sofrem durante a etapa de secagem é um parâmetro de grande importância tecnológica. A evolução da retração linear de secagem em função da perda de água de conformação é representada através da chamada curva de Bigot. Esta curva é uma representação gráfica da percentagem de água de

conformação em função da retração de secagem. O conhecimento desta curva auxilia no estabelecimento de um ciclo de secagem. Isto permite otimizar o tempo de forma que as peças não apresentem defeitos e, por outro lado, não permaneçam secando por tempos demasiadamente longos o que implicaria em aumento de custo. (VIEIRA, et al., 2003).

A Figura 2.23 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).

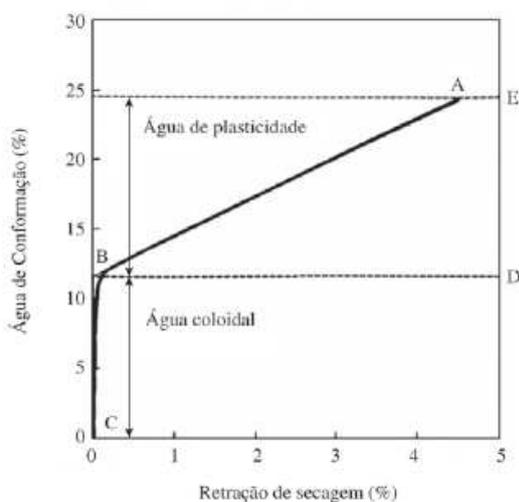


Figura 2.23 – Variação da retração em função da água de conformação. Fonte: Vieira et al. (2003).

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) (VIEIRA et al., 2003).

2.4.3.3 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:

$$S_s = \frac{\text{Contração durante a secagem (\%)}}{\text{Tempo de aparecimento da primeira fissura (min)}} \quad (2.1)$$

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.

2.4.4 Teoria e modelos do processo de secagem

Frente à 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).

Várias teorias de secagem que foram propostas para descrever o transporte de massa e calor em meios capilares porosos. A seguir, exemplos de algumas teorias:

- 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 mais detalhada sobre as teorias de secagem pode ser encontradas em Fortes e Okos (1980), Alvarenga et al. (1980), Keey (1982), Lima (1995), Mariz (1986), apud 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.

Para um melhor detalhamento destes mecanismos recomenda-se a consulta na bibliografia citada.

2.4.4.1 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 de forma 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, modelos a nível de partícula) e em camada espessa (modelos que se referenciam à altura do secador).

Do ponto de vista prático a secagem em camada fina é muito limitada, pois em geral os materiais são secos em camadas espessas estacionárias ou em movimento. Entretanto, para se ter 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, dando assim suporte para implementação de um processo de secagem em camada espessa mais confiável (SILVA, 2002; FARIAS, 2003).

Os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termofísicas, cinéticas de secagem e balanço de massa e energia no secador, ratificando assim a necessidade de se dispor de uma equação para a cinética de secagem do material em camada fina em determinadas condições operacionais pré-estabelecidas (SILVA, 2002).

2.4.4.1.1 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.

a) 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:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = -K_1(\bar{M} - \bar{M}_e) \quad . \quad (2.2)$$

Definindo $M^* = (M - M_e)/(M_o - M_e)$ e integrando a Eq. 2.2 ao longo do tempo, tem-se:

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

O modelo acima é conhecido como “lei exponencial”. Vale ressaltar que quando se determinar a taxa de umidade pela Eq. 2.2, 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 influência na constante de secagem (BARRE et al., 1971).

O modelo a seguir (Equação 2.4), 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 2.3) 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:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp(-K_1 t^{K_2}) \quad (2.4)$$

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 equação:

$$\bar{M}^* = f(T_a, UR_a, v_a, \bar{M}_o, t, \text{encolhimento e outros}) \quad (2.5)$$

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.

b) 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).

$$\vec{J} = -D\rho_s \frac{dM}{dy} \quad (2.6)$$

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:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla M) \quad (2.7)$$

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)

2.4.4.1.2 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. Aqui será dado ênfase a um dos modelos matemáticos de secagem em camada espessa mais utilizados: o 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;

$$\frac{\partial T}{\partial t} \ll \frac{\partial T}{\partial y} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} \ll \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \quad (2.8)$$

- 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).

a) 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 2.24. 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 (FARIAS, 2003).

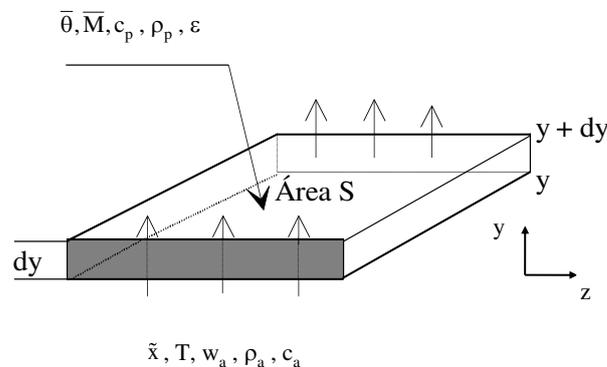


Figura 2.24 - Volume elementar de uma camada do produto

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

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

Em símbolos:

$$\begin{aligned}
 & (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x} c_v) S T dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a \tilde{x} c_v) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} dy \right) S dt = \\
 & = A^* h_c (T - \bar{\theta}) S dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v) \varepsilon S dy \frac{\partial T}{\partial t} dt
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

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

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

-balanço de energia para o produto

$$\begin{aligned}
 & \text{[Energia transferida por convecção, do ar ao produto]} \\
 & \quad = \\
 & \text{[Energia necessária para aquecer o produto]} \\
 & \quad +
 \end{aligned}$$

+
 [Energia necessária para evaporar a água do produto]
 +
 [Energia necessária para aquecer o vapor de água evaporada]

Em símbolos, tem-se:

$$\begin{aligned}
 A^* h_c S (T - \bar{\theta}) dy dt = & (\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}) S dy \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} dt - \\
 - h_{fg}^* \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} dy S dt - & c_v (T - \bar{\theta}) \rho_a w_a \frac{\partial x}{\partial y} dy S dt
 \end{aligned} \tag{2.11}$$

Reagrupando os termos obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{h_c A^*}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) + \left[\frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \right] \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \tag{2.12}$$

-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]

Em símbolos tem-se:

$$\rho_a w_a S \tilde{x} dt - \rho_a w_a S \left(\tilde{x} + \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} dy \right) dt + \varepsilon S \rho_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial t} dy dt = \rho_p S \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy dt \tag{2.13}$$

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

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (2.14)$$

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:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_1 \quad (2.15)$$

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:

$$T(y = 0, t) = T_{ent} \quad (2.16a)$$

$$\bar{\theta}(y, t=0) = \bar{\theta}_o \quad (2.16b)$$

$$\bar{M}(y, t = 0) = \bar{M}_0 \quad (2.16c)$$

$$\tilde{x}(y = 0, t) = \tilde{x}_{ent} \quad (2.16d)$$

b) 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:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v X} (T - \bar{\theta}) \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) - \left(\frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_2 \quad (2.20)$$

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

$$T(y = 0, t) = T_{ent} \quad (2.21a)$$

$$\bar{\theta}(y, t = 0) = \bar{\theta}_0 \quad (2.21b)$$

$$\bar{M}(y = 0, t) = \bar{M}_0 \quad (2.21c)$$

$$\tilde{x}(y=0, t) = \tilde{x}_{\text{ent}} \quad (2.21d)$$

c) 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:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v \tilde{x}} (T - \bar{\theta}) \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial y} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left(\frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial y} \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_3 \quad (2.25)$$

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

$$T(y=L, t) = T_{\text{ent}} \quad (2.26a)$$

$$\bar{\theta}(y=0, t) = \bar{\theta}_o \quad (2.26b)$$

$$\bar{M}(y=0, t) = \bar{M}_o \quad (2.26c)$$

$$\tilde{x}(y = L, t) = \tilde{x}_{\text{ent}} \quad (2.26d)$$

d) Secagem em fluxo cruzado

Secadores de fluxos cruzados caracterizam-se pela passagem do ar perpendicularmente a uma camada do produto, onde o ar escoia 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:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{-h_c A^*}{\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a c_v \tilde{x}} (T - \bar{\theta}) \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} = \left(\frac{h_c A^*}{\rho_p u_p c_p + \rho_p u_p c_w \bar{M}} (T - \bar{\theta}) \right) + \left(\frac{h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})}{\rho_p u_p c_p + c_w \bar{M} \rho_p u_p} \rho_a w_a \frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} \right) \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial \tilde{x}}{\partial y} = - \frac{\rho_p u_p}{\rho_a w_a} \frac{\partial \bar{M}}{\partial z} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = f_4 \quad (2.30)$$

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

$$T(y=0, t) = T_{\text{ent}} \quad (2.31a)$$

$$\bar{\theta}(y, t=0) = \bar{\theta}_o \quad (2.31b)$$

$$\bar{M}(y, t=0) = \bar{M}_o \quad (2.31c)$$

$$\tilde{x}(y=0, t) = \tilde{x}_{\text{ent}} \quad (2.31d)$$

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.

2.5 Teoria de controle de processos

2.5.1 Fundamentos

A etimologia da palavra controle vem do latim *contra* (exprime a ideia de oposição) mais *rotulus*, “rolo, escrito, registro”. Significa a ação de verificar escritos ou as contas dos rolos. A palavra controle dá idéia de domínio, poder, ato de exercer controle sobre algo, supervisionar. Esta palavra é utilizada nos mais variados contextos tais como, controle de dados, controle de qualidade, controle de finanças, controle de demográfico, controle de produção, entre tantos outros presentes no dia a dia.

Em todos os contextos a palavra controle faz referência à existência de um sistema, cujo comportamento se queira influenciar e na liberdade de tomar ações, as quais irão forçar o sistema a agir de maneira desejada (BISSELL, 1993 apud FACCIN, 2004).

O termo sistema é usado para descrever uma série de componentes que interagem em torno de uma condição limite imaginária, e somente a entrada e a saída são de interesse, ou seja não há necessidade de explorar as interações detalhadas entre os componentes. Portanto, pode-se dizer que o aspecto importante de um sistema é a relação entre as entradas e as saídas. Um sistema pode tanto ser uma usina inteira como somente um motor elétrico (BOLTON, 1995).

Maya e Leonardi (2010), afirmam que em sentido amplo, define-se sistema como sendo um conjunto de elementos que se relacionam e que de alguma forma interagem uns com os outros. Eventualmente, também interagem com elementos do meio exterior, isto é, com elementos não pertencentes ao sistema. Como por exemplo, o sistema solar, cujos elementos são os astros que exercem ações entre si e com o resto do universo, de acordo com as leis da física em geral e da mecânica celeste em particular.

Ainda segundo Maya e Leonardi (2010), em ciência e em outras atividades, como engenharia, economia, administração etc., costuma-se estabelecer um conceito de sistema de forma mais restrita, como sendo um conjunto de elementos selecionados e organizados que interagem no sentido de alcançar um ou mais objetivos determinados. Em qualquer caso a definição é sempre muito ampla, pois se refere a um conjunto de elementos que podem ser realizados das formas mais diversas. Podem ser tanto objetos físicos como abstrações matemáticas, leis jurídicas, moeda, princípios de economia, células vivas, pessoas etc.

O homem ao longo de sua evolução sempre procurou desenvolver técnicas e meios que o viesse a facilitar o desenvolvimento das suas tarefas e simplificar seu trabalho, substituindo o trabalho braçal por outros meios e mecanismos, sendo que o seu tempo disponível para outros afazeres fosse mais bem empregado e valorizado nas atividades do intelecto, das artes, lazer, pesquisa ou simplesmente no gozo de novas formas de entretenimento (SILVEIRA e SANTOS, 1992).

Com o advento dos computadores e a rápida expansão da capacidade de processamento dos mesmos, cada vez mais, as tarefas desempenhadas por um sistema de controle estão sendo executadas de forma automática, com mais facilidade, simplicidade e segurança. Este fato permitiu tanto a ampla difusão da utilização do controle automático, como o desenvolvimento de tecnologia para tal (BALCHEN, 1999).

Atualmente os sistemas de controle automático são amplamente encontrados em todos os setores da indústria, tais como controle de qualidade de produtos manufaturados, linha de montagem automática, controle de máquinas operatrizes, tecnologia espacial, sistemas de armamento e defesa, sistemas de transporte, sistemas de potência, robótica e muitos outros. Assim, os sistemas de controle automático tem assumido um papel progressivamente importante no desenvolvimento da moderna civilização e tecnologia. Praticamente todo aspecto de nossas atividades diárias é afetado por algum tipo de sistema de controle (FACCIN, 2004).

O primeiro controlador automático industrial de que há notícia é o regulador centrífugo inventado em 1775, por James Watts, para o controle de velocidade das máquinas à vapor. Esta invenção foi puramente empírica. Nada mais aconteceu no campo de controle até 1868, quando

Clerk Maxwell, utilizando o cálculo diferencial, estabeleceu a primeira análise matemática do comportamento de um sistema máquina-regulador (OLIVEIRA, 1999).

Por volta de 1900 aparecem outros reguladores e servomecanismos aplicados à máquina a vapor, a turbinas e a alguns processos. Durante a primeira guerra mundial, N. Minorsky cria o servocontrole, também baseado na realimentação, para a manutenção automática da rota dos navios e escreve um artigo intitulado “Directional Stability of Automatically Steered Bodies”. O trabalho pioneiro de Norbert Wiener (1948) sobre fenômenos neurológicos e os sistemas de controle no corpo humano abreviou o caminho para o desenvolvimento de sistemas complexos de automação. A partir daqui o progresso do controle automático foi muito rápido (OLIVEIRA, 1999).

Atualmente existe uma enorme variedade de equipamentos de medidas primárias, transmissão das medidas (transmissores), de regulação (controles pneumáticos, elétricos e eletrônicos), de controle final (válvulas pneumáticas, válvulas solenóide, servomotores etc.), de registro (registradores), de indicação (indicadores analógicos e digitais), de computação (relés analógicos, relés digitais com microprocessador), PLC’s, SDCD’s etc. Estes equipamentos podem ser combinados de modo a constituírem cadeias de controle simples ou múltiplas, adaptadas aos inúmeros problemas de controle e a um grande número de tipos de processos. Em 1932, H. Nyquist, da Bell Telephone, cria a primeira teoria geral de controle automático com sua “Regeneration Theory”, na qual se estabelece um critério para o estudo da estabilidade (OLIVEIRA, 1999).

Os elevadores primitivos eram controlados por cabos manuais ou por um operador de elevador. Na Figura 2.25 (a), uma corda é cortada para demonstrar o freio de segurança, uma inovação nos elevadores primitivos; Na Figura 2.25 (b). os modernos elevadores de transporte duplo fazem sua subida no Grande *Arche* em Paris, conduzido por um motor, com cada carro contrabalançando o outro. Hoje, os elevadores são completamente automáticos, usando sistemas de controle para regular posição e velocidade (NISE, 2002).

Elevadores

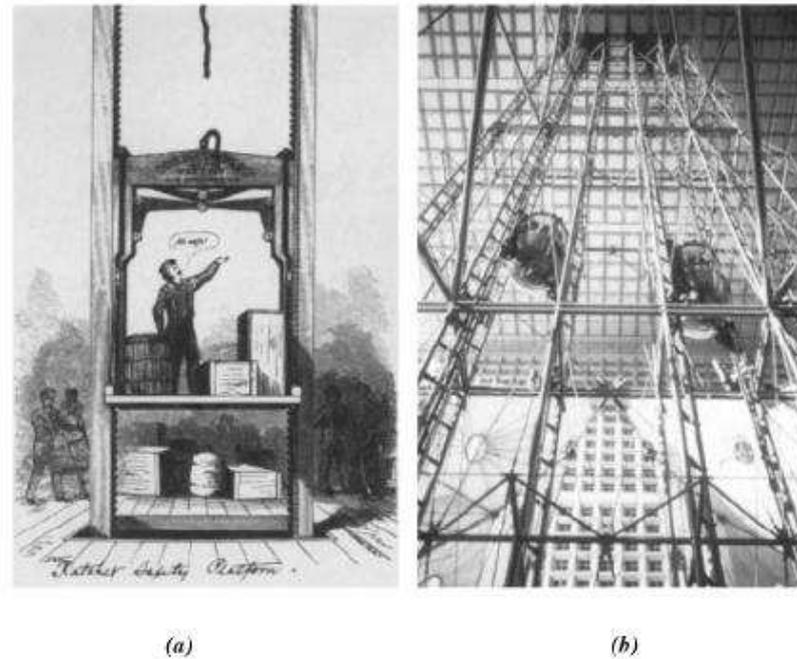


Figura 2.25 – Sistema de controle manual dos elevadores primitivos. Fonte: NISE (2002).

A necessidade de se controlar sistemas e processos físicos existe desde tempos remotos. O controle manual, primeira forma de controle utilizada pelo homem, e ainda presente em muitos processos, apresenta a necessidade de um operador humano que deve conhecer o sistema e ter razoável experiência e habilidade. Com o crescente aumento no grau de sofisticação das atividades humanas surgiu o interesse e a necessidade de automatizar ou semi-automatizar determinados processos, isso foi possível a partir do desenvolvimento científico e tecnológico, que dentre os diversos conhecimentos nos trouxe as teorias clássicas de controle (JÚNIOR, et al., 2005).

A essência da teoria de controle está na sua vasta aplicação, representando papel vital na engenharia. Além de fazer parte de sistemas complexos como sistemas de pilotagem de avião, mísseis guiados, veículos espaciais, o controle é uma parte integrante e muito importante de processos relativamente simples, como processos industriais e de fabricação. Como exemplo, em processos industriais, o controle é essencial a fim de manter entre determinados níveis, pressão, temperatura, umidade, viscosidade, fluxo e diversas outras variáveis (OGATA, 1987).

A engenharia de controle baseia-se no princípio de realimentação e objetiva o controle de determinadas variáveis de um sistema. Embora esteja tradicionalmente ligada à engenharia elétrica, a engenharia de controle é interdisciplinar e encontra aplicações em engenharia química, mecânica, aeronáutica, biomédica, entre tantas outras áreas.

Os processos existentes em indústrias químicas, petroquímicas, de papel e celulose e cerâmicas, dentre tantas outras, constituem um campo vasto para aplicações de técnicas de controle automático. Anteriormente, antes aos anos 40 a maioria das plantas industriais eram operadas essencialmente em modo manual, o que exigia a utilização de muitos operadores. Nos dias de hoje, em razão da extensão, da complexidade e da interação entre os processos, passando também pelas exigências de qualidade dos produtos e de redução do custo de produção, é essencial a utilização de controle automático na operação dos processos (BRISTOT, 2002).

Em suma, pode-se dizer que Sistema de Controle é um sistema que tende a manter uma relação pré-estabelecida entre duas variáveis do sistema através da comparação de funções destas variáveis e utilizando a diferença como meio de controle. Ou ainda, pode-se dizer que um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) reunidos com o propósito de controlar as saídas dos processos. A Figura 2.26 mostra esquematicamente esta relação.

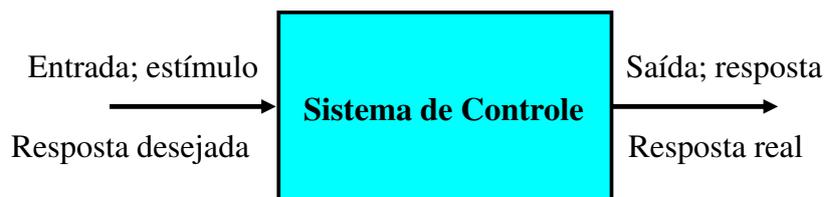


Figura 2.26 – Descrição simplificada de um sistema de controle. Fonte: Adaptado de NISE (2002).

É indiscutível que implantação de sistemas de automação em uma planta industrial tenha se tornado cada vez mais necessária para garantir a sobrevivência das empresas nos dias de hoje. Um sistema de controle bem elaborado certamente trará inúmeros benefícios tanto para empresa quanto para o cliente, bem como para o meio ambiente. Desde a garantia de um processo uniforme, com qualidade e precisão, à redução dos custos de produção, de refugos, até mesmo a garantia de um processo mais sustentável e ecológico.

A ciência do controle evoluiu de forma gigantesca nas últimas décadas e hoje é uma realidade corriqueira em boa parte das indústrias de grande médio e até de pequeno porte.

Em geral, o objetivo da automação em um processo é fabricar o mesmo insumo com maior eficiência. O resultado é a diminuição do desperdício, do consumo de energia e, em alguns casos, do impacto ambiental. Automação objetivando a segurança dos colaboradores também é comum, resultando em diminuição de custos para a empresa tanto de insumos tangíveis quanto intangíveis e promovendo a segurança dos trabalhadores.

Existem diferentes graus de automação e diversos tipos de sistema de controle. Pode-se ter desde um controle simples de posicionamento e enchimento de um refil como uma garrafa de refrigerante a um controle sofisticado de temperatura e vazão de uma coluna de destilação multifásica (OGATA, 2003).

Para diferentes tipos e perfis de processos, diferentes controladores são requeridos, dependendo dos requisitos de performance do sistema. Processos mais complexos requerem controladores também mais complexos que necessitam de mais informações sobre o sistema a fim de garantir a performance desejada. Porém, para muitos processos industriais, cujos requisitos de performance não são muito rígidos, o controle pode também ser realizado por controladores mais simples, que necessitam de poucas informações sobre o processo para serem sintonizados adequadamente.

É importante que, um projeto de sistema de controle seja elaborado de tal forma que nem seja menos nem mais que o necessário. Todas as relevâncias do processo devem ser consideradas em concordância com o que se objetiva nesta etapa de automação. Projetos mal elaborados podem resultar em gastos desnecessário e custos mais elevados, bem como no não atendimento dos requisitos do processo. Podendo inclusive gerar problemas na planta e se tornar obsoleto.

2.5.2 Controle de processos

O termo “controle de processos” costuma ser utilizado para se referir a sistemas que têm por objetivo manter certas variáveis de uma planta industrial entre os seus limites operacionais

desejáveis. Estes sistemas de controle podem necessitar constantemente da intervenção humana, ou serem automáticos, como, por exemplo, o controle de temperatura de um forno (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010).

Para Dunn (2013), controle de processo é o controle automático de uma variável de saída por meio da medição da amplitude do parâmetro de saída a partir do processo, comparando-a com um valor desejado ou estabelecido e realimentando um sinal de erro no intuito de controlar uma variável de entrada.

Os sistemas de controle podem ser em malha aberta ou em malha fechada e a escolha por uma dessas opções depende da viabilidade de aplicação. Para Kuo (1985) citado por Faccin (2004) sistemas retroalimentados torna o controle mais rápido, preciso e menos sensível a distúrbios e discrepâncias entre o modelo e o processo real, por isso é a estratégia mais utilizada em sistemas industriais. O controle em malha aberta, apesar da simplicidade, somente é aconselhado em sistemas nos quais as entradas são conhecidas antecipadamente no tempo e nos quais não há distúrbios, e o seu desempenho é fortemente influenciado pela qualidade do modelo utilizado. A principal desvantagem do uso da retroalimentação, é a diminuição da estabilidade do sistema (capacidade do sistema de seguir os comandos de entrada), podendo inclusive tornar instável, um sistema estável. Desta forma, é imprescindível a correta escolha do tipo de controlador a ser usado, bem como a realização de um projeto adequado para cada sistema específico.

2.5.2.1 Sistema de controle em malha aberta (SCMA)

No controle em malha aberta, um operador atua sobre o sistema de acordo com a leitura de dados do processo. Um sistema de controle em malha aberta utiliza um controlador conectado em série com o processo a ser controlado, de modo que a entrada do processo deve ser tal que sua saída se comportará como desejado. A característica importante é que a ação de controle independe da saída.

Observe-se que um sistema de controle deste tipo fornecerá a saída desejada se não ocorrerem perturbações externas que alterem o valor da saída ou alterações paramétricas

internas do sistema. Se alguma destas ocorrer, a saída muda, mas a ação de controle continua exatamente a mesma.

Os sistemas de controle em malha aberta são simples e baratos, mas não compensam as possíveis variações internas de uma planta, nem as perturbações externas inerentes a um processo industrial. Outra desvantagem do controle em malha aberta é a sobrecarga de trabalho repetitivo e sem interesse para o operador. Este tipo de controle estimula o operador a ser conservativo e operar em uma região mais segura e menos econômica (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010).

Para um sistema em malha aberta, a entrada é escolhida com base na experiência, de tal forma que o sistema dê o valor de saída desejado. Essa saída, entretanto, não é modificada de forma a seguir as alterações nas condições de operação (BOLTON, 1995)

Um condicionador de ar, é um bom exemplo de controle em malha aberta (Figura 2.27). A entrada do sistema é um sinal determinado pela chave seletora. A temperatura obtida no ambiente é determinada pela seleção da potência do equipamento. Se houver mudanças nas condições ambientais, uma janela for aberta, por exemplo, a temperatura variará porque não é possível compensar a saída. Não há realimentação para ajustar e manter a temperatura a um valor constante (BOLTON, 1995).

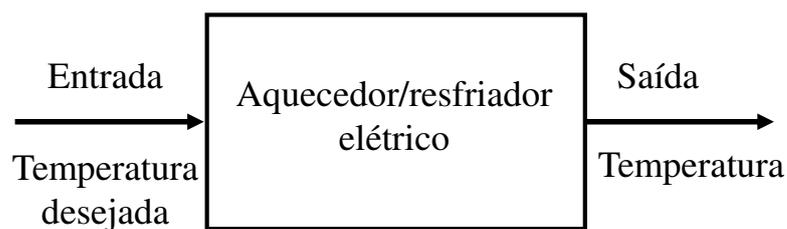


Figura 2.27 – Exemplo de um controle em malha aberta. Fonte: Adaptado de Bolton (1995).

Com a implementação de um controle em malha fechada estes problemas são eliminados.

2.5.2.2 Sistemas de controle em malha fechada (SCMF)

O controle em malha fechada dispensa a intervenção humana. No controle em malha fechada há uma programação para que o próprio sistema ajuste o processo automaticamente de acordo com os valores pretendidos.

Um Sistema de Controle em Malha Fechada (SCMF) utiliza uma medida adicional da saída (resposta) real a fim de compará-la com a resposta desejada do sistema. O SCMF também é chamado servomecanismo. O termo servomecanismo era originalmente empregado para denotar uma classe de sistemas de controle para os quais a referência era constante. Atualmente o termo servomecanismo é usado em sentido amplo, significando Sistema de Controle em Malha Fechada (SCMF).

No entanto, usa-se ainda a expressão problema de servomecanismo em conexão com o objetivo de seguir uma referência constante e problema de rastreamento, em conexão com o objetivo de seguir uma referência que varia com o tempo. Embora o conceito de sistema de controle em malha aberta seja usado, sistemas de controle reais são essencialmente de malha fechada. Isto leva à definição geral de sistemas de controle.

Com esse sistema o “controlador”, compara o valor desejado com o valor medido, caso haja um desvio entre estes valores, a saída é manipulada de forma a eliminar este desvio ou erro. Assim, o controle em malha fechada mantém a variável do processo no seu valor desejado, compensando as perturbações externas e as possíveis não linearidades do sistema. A variável manipulada pelo controlador pode ser a abertura de uma válvula, ou a rotação de uma bomba, ou a rotação de um compressor, a velocidade de uma esteira etc.

Na Figura 2.28 é apresentado com detalhes o diagrama funcional de um Sistema de Controle em Malha Fechada (SCMF). Neste diagrama são mostrados os principais componentes do sistema de controle.

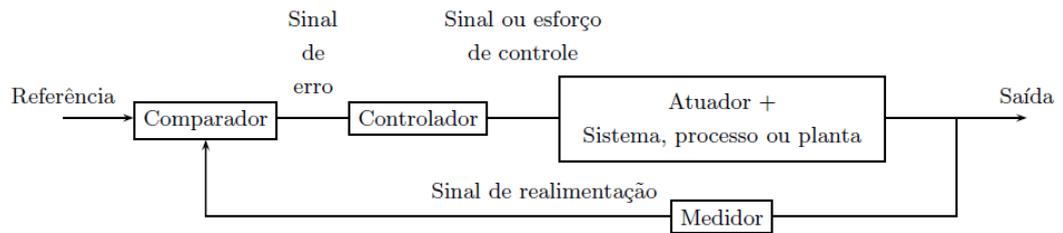


Figura 2.28 - Diagrama de um sistema de controle em malha fechada. Fonte: Fundamentos de Controle Clássico.

2.5.3 Controladores PID

Diversas técnicas de controle podem ser empregadas num sistema, mas a mais usada e amplamente difundida é a do controle proporcional, integral e derivativo (PID). Esta é uma técnica de controle clássica que se aplica apenas a sistemas com uma entrada e uma saída (*Single Input Single Output*- SISO) ou a sistemas com mais de uma entrada e saída desde que este possa ser dividido em subsistemas SISO (GUERRA, 2009).

O controlador do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo) vem sendo utilizado nos processos industriais há mais de 60 anos com bons resultados. Apesar deste controlador já ser conhecido no período entre as duas guerras mundiais, continua, nos dias de hoje, a ser o controlador industrial mais utilizado. Hoje, estes controladores são implementados em hardware (analógico ou digital) ou software (controle micro processado).

A popularidade dos controladores PID reside no fato de ser simples de ajustar e de ter, no mercado, uma grande variedade de ferramentas que possibilitam sua implementação de maneira fácil e prática. Um exemplo é que todo Controlador Lógico Programável (CLP), por mais simples que seja, possui o algoritmo PID pronto para ser usado. Existem até aqueles que possuem ferramentas de auto ajuste reduzindo ainda mais a necessidade de ter uma pessoa qualificada para ajustá-lo.

Controladores PID são facilmente implementáveis, de baixo custo, robustos e versáteis, com a capacidade de fornecer comportamentos transitórios e de regime permanente satisfatórios para uma grande variedade de processos encontrados na indústria (CAMPESTRINI, 2006 apud SANTOS, 2009).

Uma das particularidades desse controlador é que quando não há a possibilidade de uma abordagem analítica para a sua aplicação (situações em que o modelo matemático da planta não é conhecido), é possível a adoção de abordagens experimentais para atingir sua sintonia (OGATA, 2003). A sintonia do controlador consiste em obter as constantes/parâmetros que melhor ajustem a resposta de acordo com o que se espera do sistema a ser controlado. Esta é uma etapa importante e delicada, pois pequenas variações nestes parâmetros podem desestabilizar o processo como um todo.

Sob uma outra ótica, Philips e Harbor (1996) apresentam o controlador PID como uma função do passado, do presente e que prevê o futuro. A composição do controlador pode ser analisada com base nas funções e respostas dadas por seus componentes. O termo proporcional dá à saída do controlador um componente que é função do estado presente do sistema. Como a saída do integrador depende da entrada para todos os instantes anteriores, este componente da saída do compensador é determinado pelo estado passado do sistema. Esta saída não varia instantaneamente e confere uma inércia ao sistema. A saída do diferenciador é uma função da inclinação de sua entrada e assim pode ser considerada com uma previsão do estado futuro do sistema. Portanto, a parte derivativa do compensador pode acelerar a resposta do sistema pela antecipação do estado futuro. Evidentemente, se a informação da entrada estiver incorreta (ruído), podem ocorrer resultados insatisfatórios nesta previsão.

O controlador do tipo PID consiste em um método empírico e de fácil implementação, razão do seu grande sucesso. A utilização e a sobrevivência junto às técnicas modernas, deve-se não somente ao seu bom desempenho mas, principalmente, à sua fácil implementação, que gera um eficiente custo benefício. O controle por PID pode ser visualizado na Figura 2.29.

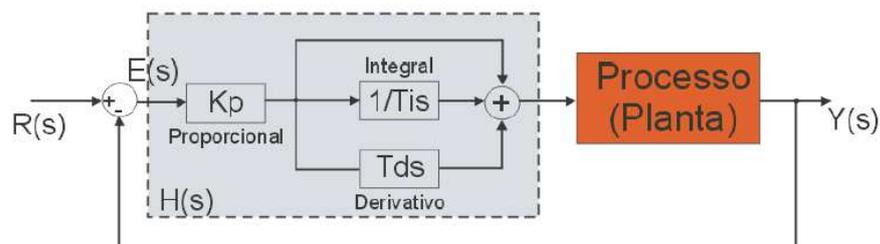


Figura 2.29 - Controle por PID no domínio de Laplace. Fonte: Costa (2010).

A Figura 2.29 mostra uma das muitas estruturas do controlador PID (diagrama no domínio de Laplace), aplicado no controle em MF (malha fechada) de um processo. O bloco tracejado na Figura 2.29 mostra o controlador com entrada $e(t)$ e saída $u(t)$.

É importante definir algumas siglas e termos aqui utilizados:

- PV - *Process Variable* ou variável de processo. Trata-se da variável que é controlada no processo, como temperatura, pressão, umidade, etc. Neste trabalho, o teor de umidade do tijolo.
- MV - *Manipulated Variable* ou variável manipulada. É aquela sobre a qual o controlador atua para controlar o processo, como posição de uma válvula, tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, etc. No presente, temos a velocidade de deslocamento das vagonetas.
- SP – *Setpoint*. Valor desejado para a variável de processo.
- Ação de controle: pode ser reversa ou direta. Essa ação define genericamente a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.
- Ação Reversa: Se PV aumenta, MV diminui. É uma ação tipicamente usada em controles de aquecimento.
- Ação Direta: Se PV aumenta, MV aumenta. Tipicamente utilizada em controles de refrigeração.
- Erro ou desvio. Diferença entre SP e PV. SP-PV para ação reversa e PV-SP para ação direta.

A relação entre os sinais de entrada e saída é dada pela equação integro-diferencial do controlador PID contínuo:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad 2.32$$

onde,

$u(t)$ é o sinal de controle na saída do controlador, no domínio contínuo ou analógico;

$e(t)$ é o sinal de erro na entrada do controlador, no domínio contínuo ou analógico;

$u[k]$ é o sinal de controle na saída do controlador, no domínio discreto ou digital, no instante $t=k$;

$e(k)$ é o sinal de erro na entrada do controlador, no domínio discreto ou digital, no instante $t=k$;

K_p é a constante de proporcionalidade associada ao termo proporcional;

$K_i = \frac{K_p}{T_i}$ é a constante de proporcionalidade associada ao termo integral;

$K_d = K_p T_d$ é a constante de proporcionalidade associada ao termo derivativo;

A Equação (2.32) mostra as três parcelas constantes envolvidas, que caracterizam o nome do método. O objetivo é fazer a sintonia do controlador, escolhendo e ajustando as constantes K_p , T_d e T_i , para que o conjunto, em malha fechada, seja estável e apresente um desempenho dentro do que está especificado pelo projetista. Portanto encontrar os parâmetros proporcional, derivativo e integrativo de modo que estes, em conjunto, garantam a resposta física esperada, consiste em um dos pontos mais relevantes de projeto.

Aplicando a Transformada de Laplace, obtém-se a Função de Transferência:

$$H(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad 2.33$$

Vários algoritmos, numéricos ou não, são utilizados para obter esta sintonia, a exemplo do método de Ziegler e Nichols. Em função da não utilização de uma ou mais das ações de controle básicas pode-se ter as seguintes derivações do controlador PID:

- a) Controlador Proporcional
- b) Controlador Proporcional e Integral
- c) Controlador Proporcional e Derivativo

2.5.3.1 Controlador proporcional

A ação de controle proporcional foi a primeira ação de controle a ser implementada no que seria posteriormente chamado de controlador PID. De fato, observou-se um melhora nas

características transitória e estáticas de sistemas quando o ganho de malha era aumentado. Na ação proporcional a relação matemática entre o sinal de erro e de controle é dada por:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2.34)$$

No controle Proporcional, o valor de MV é proporcional ao valor do desvio ($SP - PV$, para ação reversa de controle), ou seja para desvio zero ($SP = PV$), $MV = 0$. À medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. O valor de desvio que provoca $MV = 100\%$ define a Banda Proporcional (*Proportional band* - P_b). Com P_b alta, a saída MV só irá assumir um valor alto para corrigir o processo se o desvio for alto. Com P_b baixa, a saída MV assume valores altos de correção para o processo mesmo para pequenos desvios. Ou seja, quanto menor o valor da Banda Proporcional, mais forte é a ação proporcional do controle.

A Figura 2.30 ilustra o efeito da variação de P_b no controle de um processo.

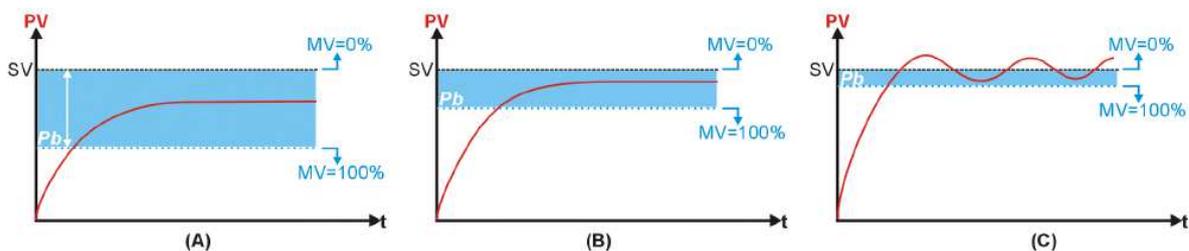


Figura 2.30 – Efeito da redução da Banda Proporcional no comportamento de PV.

Para uma saída menor que o valor de referência o valor de controle será positivo ($e(t) > 0$) e para uma saída maior que o valor de referência o valor de saída será negativo ($e(t) < 0$). Este erro pode diminuir com o aumento do ganho, entretanto nunca é completamente zerado. Por outro lado, quanto maior o ganho, mais oscilatório tende a ficar o comportamento transitório do sistema em malha fechada. Geralmente, o aumento excessivo do ganho proporcional pode levar o sistema a instabilidade. Além disto, uma mudança abrupta na variável de processo pode causar um pico na saída do controlados muito acima do valor de operação desejado.

Uma dos principais contratempos da ação proporcional do controlador é a geração do erro em regime permanente, o chamado *off-set*, impedindo o rastreamento do sinal de referência.

Muitos controladores que operam apenas no modo Proporcional, adicionam um valor constante à saída de MV para garantir que na condição $PV = SP$ alguma energia seja entregue ao sistema, tipicamente 50%. Este valor constante denomina-se Bias (polarização), e quando ajustável permite que se obtenha uma estabilização de PV mais próxima de SP.

2.5.3.2 Ação integral no controlador proporcional - integral

A ação de controle integral foi implementada visando introduzir uma “memória” ou armazenamento de energia no sistema, permitindo que, mesmo com um sinal de erro zero na entrada do controlador, seja gerado um sinal de controle diferente de zero. Ou seja, a ação integral age proporcionalmente à integral do erro do sistema. Ela é a responsável por garantir após algum tempo que o erro em regime permanente tende a zero. Matematicamente, a adição de um integrador na malha de controle faz com que o tipo do sistema seja incrementado, permitindo erros menores, ou mesmo nulos, para diferentes entradas do sistema.

A parte de controle integral não é, isoladamente, uma técnica de controle, pois não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação integral consiste em uma resposta na saída do controlados (MV) que é proporcional à amplitude e duração do desvio. Portanto, o objetivo é fazer com que a ação integral tenha o efeito de eliminar o desvio característico de um controle puramente proporcional.

A Figura 2.31 ilustra um processo estabilizado com controle proporcional.

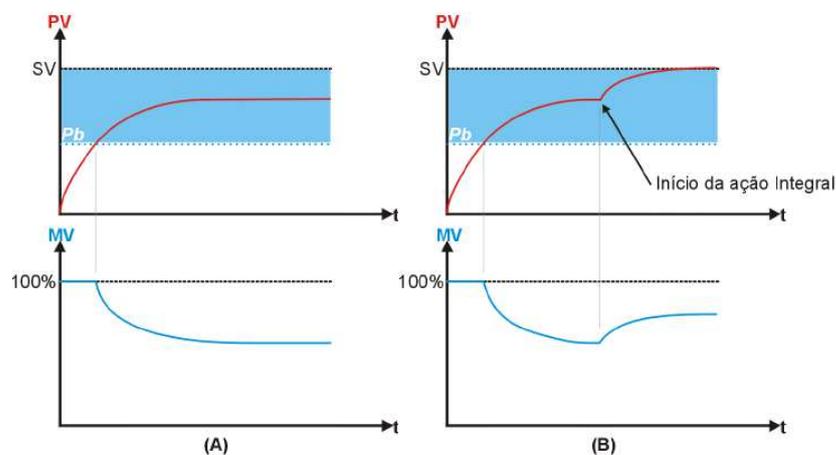


Figura 2.31 – Efeito da inclusão do controlador integral ao proporcional – PI.

Na Figura 2.31 (a), a variável de processo (PV) e a variável manipulada (MV) atingem uma condição de equilíbrio em que a quantidade de energia entregue ao sistema (variável manipulada), é a necessária para manter a variável de processo no valor em que ela está. O processo irá permanecer estável nesta condição se nenhuma perturbação ocorrer. Apesar de estável, o processo não atingiu o *setpoint* (SP), existindo o chamado erro em regime permanente.

Observando agora, a Figura 2.31 (b), onde no instante destacado foi incluída a ação integral. Pode observar-se a gradual elevação do valor da variável manipulada (MV) e a consequente eliminação do erro em regime permanente. Com a inclusão da ação integral, o valor da variável manipulada é alterado progressivamente no sentido de eliminar o erro da variável de processo, até que esta e a variável manipulada alcancem um novo equilíbrio, mas agora com a variável de processo igual ao *setpoint* (PV = SP)

A ação integral corrige, em intervalos regulares, o valor da variável manipulada, somando a esta o valor do desvio entre o *setpoint* e a variável de processo (SP – PV). Este intervalo de atuação se chama tempo integral.

Na ação integral a relação matemática entre o sinal de erro e de controle é dada por:

$$\frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (2.35)$$

Apesar da ação integrativa ter a grande vantagem de eliminar o problema do erro em regime permanente, com ela dois problemas são introduzidos. Primeiro a estabilidade do sistema diminui devido ao acréscimo do pólo. Segundo o sistema passa a ter uma resposta transitória mais lenta (Twido Programmable Controllers, 2005).

Estes problemas podem, no entanto, ser eliminados com a correta sintonia do controlador, o qual será discutido posteriormente ainda neste trabalho.

2.5.3.3 Ação derivativa no controlador proporcional - derivativo

A ação derivativa foi introduzida visando adicionar um caráter antecipativo ou preditivo ao sistema. Com isto, o sistema responde de forma mais rápida às excitações de entrada. O termo derivativo não é, assim como o integrativo, isoladamente, uma técnica de controle, uma vez que não pode ser empregado separado de uma ação proporcional. A ação derivativa consiste em uma resposta na saída do controlador (variável manipulada) que é proporcional à velocidade de variação do desvio. A ação derivativa tem o efeito de reduzir a velocidade das variações da variável de processo, evitando que esta se eleve ou reduza muito rapidamente.

Portanto o termo derivativo só atua quando há variação no erro. Se o processo está estável, seu efeito é nulo. Na ocorrência de perturbações ou na partida do processo, quando o erro está variando, a ação derivativa sempre atua no sentido de atenuar essas variações, sendo desta forma sua principal função melhorar o desempenho do processo durante etapas transitórias.

A Figura 2.32 compara respostas hipotéticas de um processo com controle Proporcional (a) e acrescido da ação derivativa, Proporcional Derivativo (b).

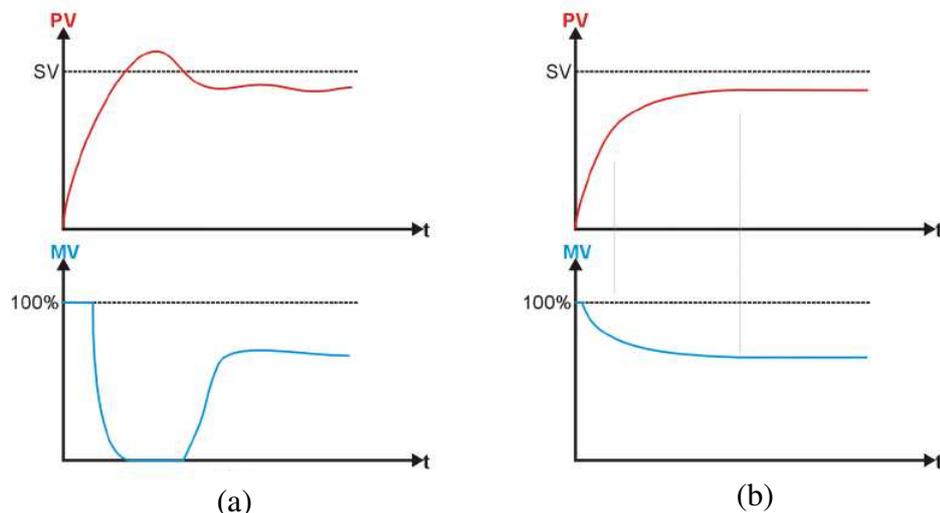


Figura 2.32 – Comparação de um controle Proporcional com um controle Proporcional Derivativo. Fonte: Novus (2003).

No controle Proporcional (Figura 2.32(a)), se a banda proporcional é pequena, é muito provável que ocorra *overshoot*, onde a variável de processo ultrapassa o *setpoint* antes de

estabilizar. Isto ocorre pelo longo tempo em que a variável manipulada esteve no seu valor máximo e por ter sua redução iniciada já muito próximo do *setpoint*, quando já é tarde para impedir o *overshoot*.

Uma possível solução seria incluir o controle derivativo (Figura 2.32(b)), que reduz o valor da variável manipulada se a variável de processo estiver crescendo muito rapidamente. Ao antecipar a variação da variável de processo, a ação derivativa reduz ou elimina o *overshoot* e as oscilações no período transitório do processo.

Em intervalos regulares, o controlador calcula a variação do desvio do processo, somando à variável manipulada o valor desta variação. Se a variável de processo estiver aumentando, o desvio estará reduzindo, resultando em uma variação negativa, que reduz o valor da variável manipulada e conseqüentemente retarda a elevação da variável de processo. A intensidade da ação derivativa é ajustada variando-se o intervalo de cálculo da diferença.

Um grande problema neste tipo de controle é a existência de *offset* ou erro em regime permanente quando o sistema estabiliza (ver Figura 2.31). Este erro depende do sistema e da constante de proporcionalidade e se deve ao fato de que quando o desvio se torna nulo a saída do controlador também se anula. Assim o sistema tende a se equilibrar num ponto em torno do *setpoint* e não no *setpoint*.

Na ação derivativa a relação matemática entre o sinal de erro e de controle é dada por:

$$K_c T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.36)$$

Pode-se então perceber que cada termo do controlador PID tem uma função distinta. O termo proporcional como responsável pelo estado presente do sistema, o integrador como responsável por todos os instantes anteriores (passado) e o derivativo como previsão do estado futuro do sistema.

2.5.4 Dinâmica de processos

O passo mais importante para o projeto de um sistema de controle é a obtenção da dinâmica do processo. O comportamento dinâmico do processo tem forte influência na sintonia do mesmo. A sintonia dos controladores é baseada em algum conhecimento do processo. Quanto mais conhecimento e informações coerentes acerca do processo, melhor será a sintonia do controlador.

Alguns métodos de sintonia necessitam de um modelo, sendo que existem duas maneiras de se obter este modelo. Uma é a modelagem do processo através das leis físico-químicas e correlações. A outra é a identificação do sistema, que é o ajuste estatístico de um modelo do processo a partir de dados experimentais (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010).

Em muitos casos um desempenho satisfatório pode ser obtido a partir de poucas informações sobre o comportamento do processo. Essas informações podem ser apresentadas através de um modelo matemático simplificado ou simplesmente através de um número reduzido de características fundamentais do processo (BAZANELLA e GOMES DA SILVA, 2006).

Há diferentes fórmulas para a sintonia dos parâmetros dos controladores, com diferentes faixas de aplicação. Estas fórmulas não garantem uma performance específica do sistema nem mesmo estabilidade em malha fechada. Porém, para uma grande quantidade de processos, proporcionam um bom ajuste (CAMPESTRINI, 2006).

2.5.4.1 Sintonia de controladores PID

No projeto de um controlador, é desejável que existam alguns parâmetros que possam influenciar a performance do sistema. Estes parâmetros são normalmente definidos a partir de certas especificações. Um bom método de ajuste de parâmetros leva em conta várias destas especificações de forma equilibrada. Apesar da existência de vários métodos de ajuste, em muitos casos, o ajuste manual ainda é utilizado, onde os parâmetros são ajustados independentemente por tentativa e erro, ou com um procedimento básico para cada caso específico. Com este procedimento, a ação derivativa normalmente não é utilizada, e a sua

performance só é adequada para sistemas simples ou que não requeiram controle rigoroso. (FACCIN, 2004)

Na bibliografia de controle são listadas diversas técnicas para a sintonia dos controladores PID. Tanto operando em malha aberta (manual) quanto em malha fechada (automático).

Existem diversos métodos de sintonia de controladores PID e cada vez mais surgem na literatura propostas diversas tendo em vista sua versatilidade e aplicabilidade. Entre tais métodos destacam-se:

- Método de Ziegler Nichols;
- Método CHR;
- Método de Cohen e Coon (CC);
- Método da Integral do Erro;

No presente trabalho serão destacadas o método de Ziegler Nichols e o CHR. Para mais detalhes sobre o de Cohen e Coon e o da Integral do Erro ver Campos e Teixeira (2010).

2.5.4.1.1 Método Heurístico de Ziegler Nichols

Ziegler Nichols propuseram uma metodologia objetiva e simples para a sintonia de controladores PID. Este método baseia-se na resposta de um sistema em malha aberta a uma entrada em degrau. O objetivo é ajustar um controlador PID de forma que o transitório dominante decaia a um quarto de seu valor após um período de oscilação. Uma limitação deste método é que somente será possível de se aplica-lo caso seja possível realizar ensaios com a planta. Sendo assim, aplica-se um degrau na entrada da planta em malha aberta (Figura 2.33).

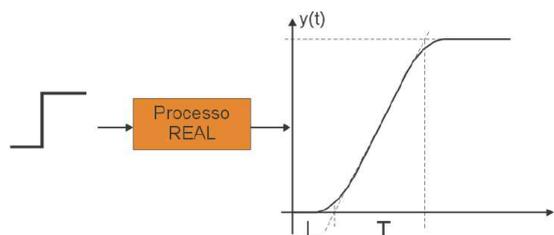


Figura 2.33 - Resposta do Sistema em Malha Aberta. Fonte: Costa (2010).

De acordo com a Figura 2.33 os comprimentos de L e T são medidos sobre o sinal de saída da planta. A partir dos valores numéricos dos comprimentos L e T, aplicam-se as regras previstas na Tabela 2.2, para obter os parâmetros do compensador (COSTA, 2010)

Tabela 2.2 - Parâmetros do Controlador PID - Método de Ziegler e Nichols. Fonte: Costa (2010).

Tipo de Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	2L	0,5L

Os pesquisadores Ziegler e Nichols desenvolveram este método de forma empírica, mas apresenta bons resultados. Os valores das constantes, mostrados na tabela, são usados como uma sintonia "grossa". Servem como ponto de partida para uma sintonia "fina", obtida ajustando-se os parâmetros diretamente na planta, de forma a obter o desempenho desejado (OGATA, 1987).

Campos e Teixeira (2010) ressaltam que algumas considerações gerais a respeito da sintonia de controladores PID podem ser feitas a partir dos resultados de Ziegler e Nichols. São elas:

- ✓ O ganho proporcional do controlador é inversamente proporcional ao ganho do processo.
- ✓ O ganho proporcional do controlador também é inversamente proporcional à razão entre o tempo morto e a constante de tempo do processo. Esta razão também é conhecida como fator de incontrolabilidade do processo (CORRIPIO, 1990). Quanto maior a razão, mais difícil de controlar o processo e menor deve ser o ganho do controlador. Portanto, quanto maior for o tempo morto comparativamente à constante de tempo do processo, mais difícil controlar esta planta.
- ✓ O tempo integral do controlador está relacionado com a dinâmica do processo. Quanto mais lento o processo (maior o tempo morto) maior deve ser o tempo

integral. Isto é, o controlador deve esperar mais, antes de “repetir” a ação proporcional.

- ✓ O tempo derivativo do controlador também está relacionado com a dinâmica do processo. Quanto mais lento o processo (maior tempo morto), maior deve ser o tempo derivativo. Ziegler e Nichols utilizaram sempre uma razão de $\frac{1}{4}$ entre T_D/T_I , logo $T_I = 4T_D$.

Ainda segundo Campos e Teixeira (2010) a utilização da Tabela 2.2 requer alguns cuidados, entre os quais o fator de incontrolabilidade. Corripio (1990), considera as equações de sintonia de Ziegler e Nichols boas para processos com fator de incontrolabilidade entre 0,1 e 0,3. Ou seja para processos com tempo morto pouco significativo. Já para Rivera et al. (1986) considera que o desempenho é razoável para fator de incontrolabilidade ente 0,2 e 1,4.

A tabela foi desenvolvida para os controladores PID existentes na época. Não existe um consenso na literatura se o controlador era do tipo série ou paralelo, mas com certeza o termo P afetava os termos I e D. Entretanto, um detalhado estudo reportado por Hellen (2001), apud Faccin (2004), mostra que foram realizadas diversas simulações reproduzindo as condições especificadas no artigo original para diversos algoritmos PID. Os resultados obtidos mostraram que a forma paralela mostrou-se mais compatível com os ajustes propostos por Ziegler e Nichols.

Skogestad (2004) apud Campos e Teixeira (2010) também acredita que Ziegler e Nichols utilizaram simulações computacionais com o PID paralelo clássico para obter o método, apesar de na época as implementações industriais serem do PID série.

A sintonia pelo método de Ziegler e Nichols serve como referência inicial, mas pode instabilizar algumas malhas por razões tais como, erros de modelagem, interação entre malhas de controle devido ao fato de os processos industriais serem geralmente MIMO (Multiple Input Multiple Output – múltiplas entradas e múltiplas saídas) e não SISO. Outra razão é o fato de o PID utilizado atualmente ser geralmente digital e não analógico. E também devido ao critério utilizado da razão de declínio igual a $\frac{1}{4}$ ser muitas vezes pouco robusto, isto é, com uma folga pequena do limite de estabilidade, podendo levar o sistema para a instabilidade em função de qualquer não linearidade do processo. (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010)

A sugestão é que na prática diminua-se inicialmente os ganhos propostos no trabalho de Ziegler e Nichols (1942) e ir aumentando posteriormente estes ganhos em função da observação do comportamento do processo. Campos e Teixeira (2010) ressalta que estas fórmulas não garantem nenhum desempenho específico, nem a estabilidade em malha fechada e, portanto, devem ser utilizadas com cautela.

2.5.4.1.2 Método CHR

Este método é baseado no trabalho desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology*, por K. L. Chien, J. A. Hrones e J. B. Reswick e leva as iniciais dos nomes de seus criadores. Segundo Chien et al. (1952) este foi o primeiro trabalho a utilizar um modelo aproximado de primeira ordem com tempo morto, representativo do comportamento de sistemas de alta ordem. Este trabalho, foi também o pioneiro na determinação de regras de ajuste diferenciadas para características servo e regulatórias.

O trabalho tem bases bem fundamentadas e apresenta regras de ajuste do parâmetros de controladores tipo PID para três parametrizações, uma na forma série e duas na forma paralela. Estas parametrizações foram obtidas através de simulações realizadas em um computador eletrônico analógico, para variadas condições, porém segundo dois critérios. Um dos critérios é a resposta mais rápida sem sobrevalor, e o outro seria a resposta mais rápida com máximo sobrevalor de 20%.

A Tabela 2.3 mostra as regras de ajuste considerando os dois critérios.

Tabela 2.3 – Regras de ajuste dos parâmetros de controlador PID através do método CHR. Fonte: Adaptado de Faccin (2004)

Método CHR	K_c	T_i	T_d
0% (sem sobrevalor)	$\frac{0,6}{K} \cdot \frac{\tau}{\theta}$	τ	$0,5 \cdot \theta$
Sobrevalor de 20%	$\frac{0,95}{K} \cdot \frac{\tau}{\theta}$	$1,357\tau$	$0,474 \cdot \theta$

A Figura 2.34 (CAMPOS e TEIXEIRA, 2010) mostra a relação entre o ganho proporcional do controlador (K_p) multiplicado pelo ganho do processo (K) em função da razão “ r ” entre a constante de tempo do processo e o tempo morto (τ/θ) para as diversas sintonias.



Figura 2.34 - Comparação entre as sintonias propostas por Chien, Hrones e Reswick (CHR) com a de Ziegler e Nichols (Z&N). Fonte: Campos e Teixeira (2010).

CAPÍTULO 3

MODELAGEM TEÓRICA

3.1 Caracterização do problema

Nesta pesquisa, o problema abordado está direcionado a modelagem matemática e simulação numérica da secagem de tijolos cerâmicos em um secador de fluxos cruzados, bem como da implementação de um sistema de controle automático do secador, segundo um controlador do tipo PID (Proporcional – Integrativo – Derivativo).

Para a modelagem matemática do processo de secagem dos tijolos, 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. Farias (2003), aplicou este modelo para secagem de grãos de milho e verificou uma excelente concordância com dados experimentais reportados na literatura. Tavares (2013), estudou a secagem de tijolos cerâmicos em secador tipo túnel de fluxo cruzado e comprovou a eficácia do modelo melhorado da Universidade Estadual de

Michigan validado os resultados numéricos com dados experimentais e também obteve ótima concordância.

Já para a modelagem matemática do processo de controle do secador tipo túnel de fluxo cruzado, utilizou-se o modelo que contempla as três parcelas referentes aos termos Proporcional, Integral e Derivativo, do controlador PID, descritos na literatura (conforme será mostrado). O objetivo é fazer com que o teor de umidade do tijolo obedeça um limite que garante a qualidade do produto na etapa de secagem. Para isso a velocidade das vagonetas dentro do secador devem ser controladas. Portanto neste modelo tem-se as seguintes terminologias referentes ao processo:

- ✓ Teor de umidade do tijolo a ser seco é a variável de processo (*Process Variable* - PV).
- ✓ Velocidade das vagonetas que percorrem o secador é a variável manipulada (*Manipulated Variable* - MV).
- ✓ Ação de controle reversa: se o teor de umidade (PV) estiver acima do *setpoint* (SP), a velocidade das vagonetas (MV) diminui.

O fenômeno de secagem de tijolos é complicado, pois está intimamente relacionado tanto aos aspectos relativos à composição da argila quanto às condições do ambiente de secagem. As propriedades da argila tem forte influência no comportamento das peças durante todo o processo de fabricação, bem como nas propriedades mecânicas da peça pronta. Aliado a isso, o tipo de secagem e as condições do ar de secagem levarão a pontos cruciais na qualidade do produto.

Nota-se, portanto, o grau de complexidade do fenômeno real e para garantir a “computacionabilidade” do problema e consistência na solução, torna-se necessário que se admita algumas hipóteses simplificadoras. Neste modelo as seguintes considerações referentes à dinâmica de secagem de tijolos foram adotadas:

- A redução do volume durante o processo de secagem é desprezível;

- O gradiente de temperatura dentro dos tijolos individualmente é desprezível;
- A condução de calor de tijolo para tijolo é desprezível;
- A distribuição do ar na massa é uniforme;
- As paredes do secador são adiabáticas, com capacidade calorífica desprezível;
- As capacidades caloríficas do ar e do produto são variáveis durante todo o processo de secagem;
- O efeito da porosidade do leito é considerado;

Além do fenômeno de secagem, o principal objetivo desta pesquisa é a modelagem do controle automático do secador de fluxo cruzado tipo túnel da Cerâmica Cincera, através das equação de controle em malha fechada do controlador tipo PID.

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 m x 3,30 m x 5,10 m, 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, na saída do secador.

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, numa sequência contínua.

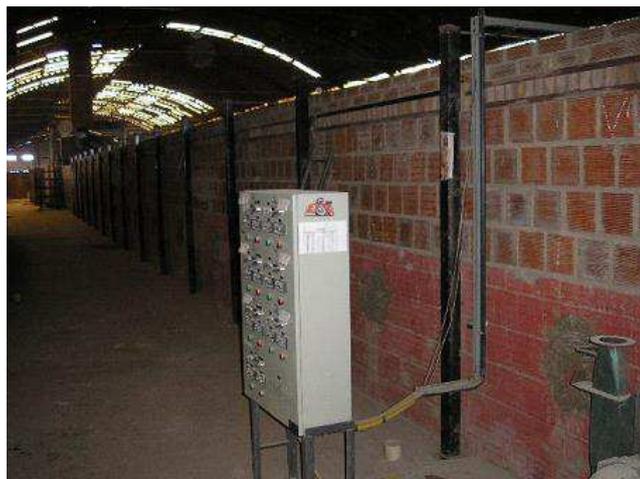


Figura 3.1 – Vista externa do secador industrial.

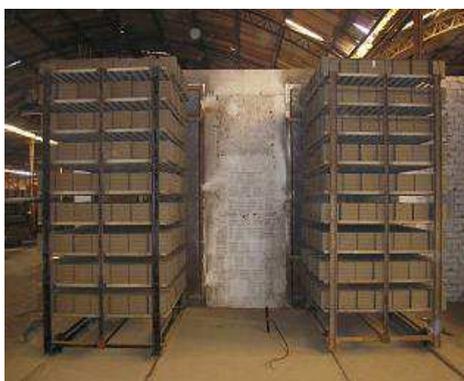


Figura 3.2 – Vagonetas usadas para o transporte dos tijolos ao longo do secador.

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

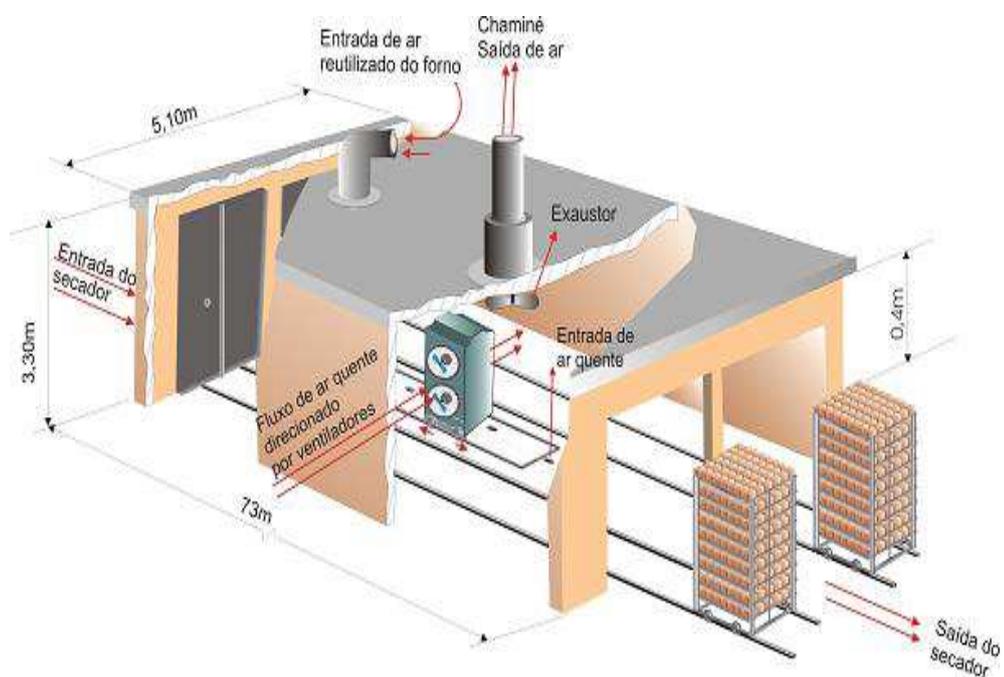


Figura 3.3 – Vista esquemática do secador industrial. Fonte: Almeida (2009).

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. Na prática 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. Logo, não há um controle preciso que possa garantir que as condições do ar de secagem, do tempo de permanência no secador, que depende da velocidade das vagonetas, garanta uma secagem adequada e eficiente.

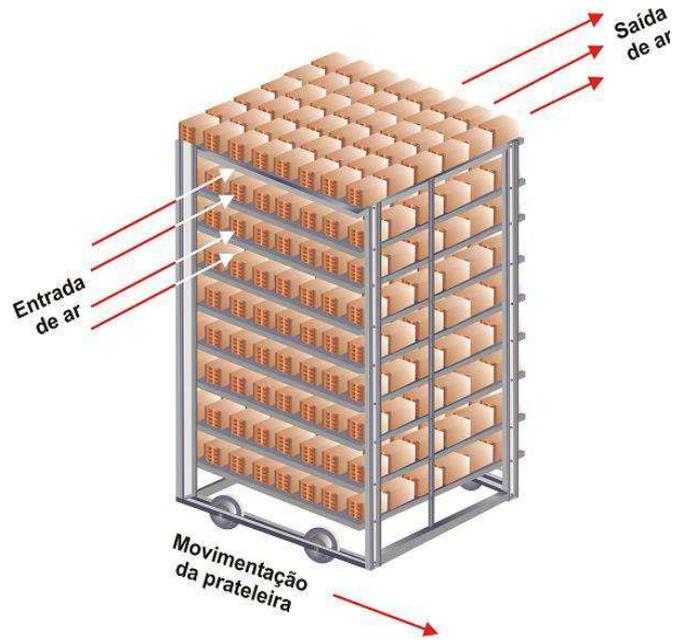


Figura 3.4 – Representação da vista angular da vagoneta. Fonte: Almeida (2009).

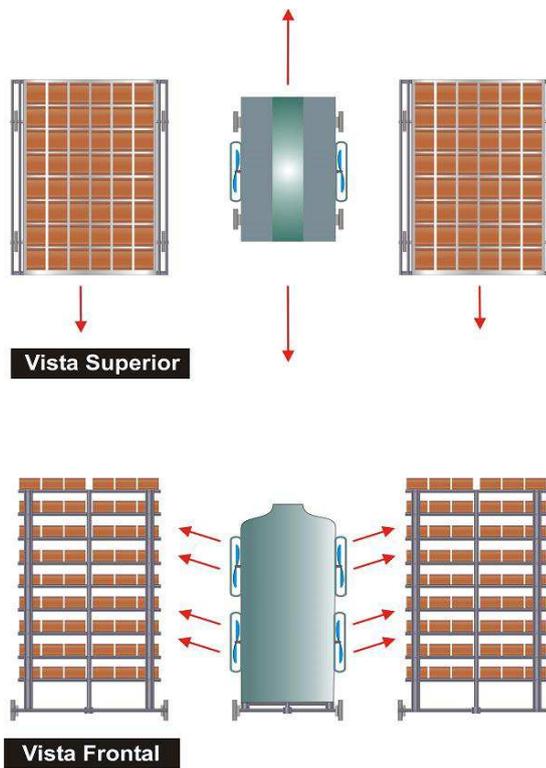


Figura 3.5 – Representação da vista superior e frontal das vagonetas e dos ventiladores dentro do secador. Fonte: Almeida (2009).

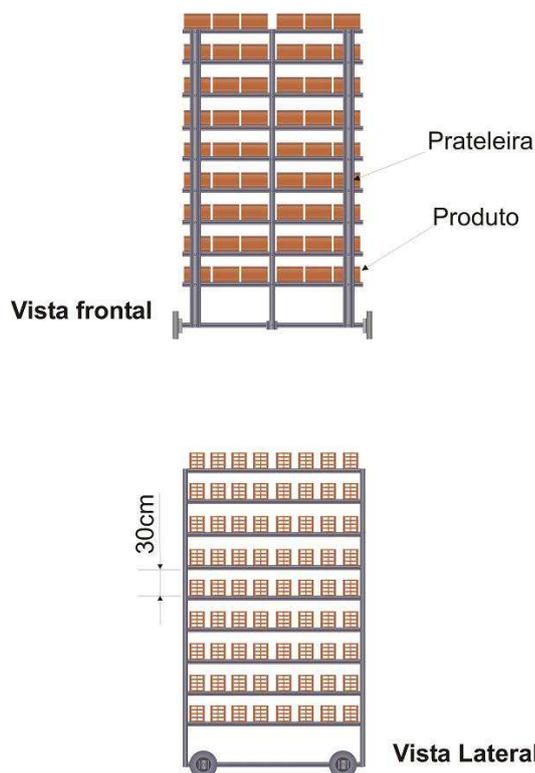


Figura 3.6 – Representação das vistas frontal e lateral de uma vagoneta. Fonte: Almeida (2009).

Inicialmente, o produto é submetido a um fluxo de ar de secagem com condições de baixa umidade e temperaturas elevadas. Naturalmente, com o decorrer do tempo ocorrem as trocas de massa e energia entre o produto e o ar que ali circula. O ar irá ceder energia na forma de calor ao produto, essa energia será usada para aquecer a umidade presente no tijolo até atingir o ponto de vaporização. Sendo assim o ar irá sofrer uma queda de temperatura, ou seja, irá se resfriar e ainda receber umidade do produto tornando-se mais úmido. Enquanto isto, o produto sofrerá um aumento de temperatura e uma queda na seu teor de umidade. Todo este processo deve acontecer paulatinamente, para que não sejam formados grande gradientes hídricos e térmicos, podendo levar a trincas, rupturas, empenamentos e outras deformações no produto.

Todas estas trocas entre o ar e o produto, bem como a proposta de controle do secador serão modeladas matematicamente de maneira mais fidedigna possível, dentro dos limites matemáticos e numéricos do modelo.

3.3 Modelagem matemática

A modelagem matemática é uma etapa singular e de extrema importância quando se propõe um estudo numérico de certo fenômeno físico. Aqui é importante incorporar o máximo de informações a respeito da situação física, para que assim, o modelo matemático represente fielmente o fenômeno real. Entretanto, há que se frisar que por mais fiel que um modelo matemático possa ser, ele jamais representará cem por cento o fenômeno físico real. Isto se dá pelo fato das limitações matemáticas e dos modelos representativos. Quanto mais se incorporar informações do fenômeno no modelo mais equações haverá para representar essas ocorrências reais e mais “pesado” e complexo será o modelo.

Segundo Bassanezi (1994), modelagem matemática é quase sempre um sistema de equações ou inequações algébricas, diferenciais, integrais, etc., obtido através de relações estabelecidas entre as variáveis consideradas essenciais ao fenômeno em análise.

Portanto deverá haver um certo limite na representação do modelo de acordo com a precisão e relevância da abordagem. Limitações relacionadas à “computacionabilidade” é um outro ponto de limite relevante. Modelo mais fiel representa mais equações que por sua vez tornam o tempo computacional maior, requerendo mais memória e potência dos equipamentos.

Neste trabalho serão apresentadas as modelagem dos balanços de massa e energia entre o ar e o produto e a modelagem do processo de controle do secador através do controlador tipo PID em malha fechada.

3.3.1 Modelagem matemática dos balanços de massa e energia entre o ar e o produto

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.

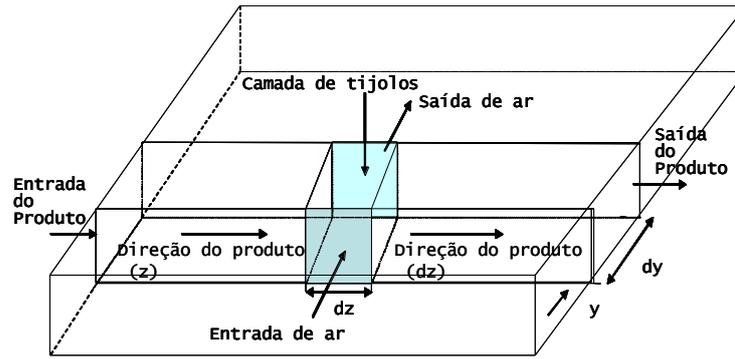


Figura 3.7 - Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado.

Fonte: Almeida (2009).

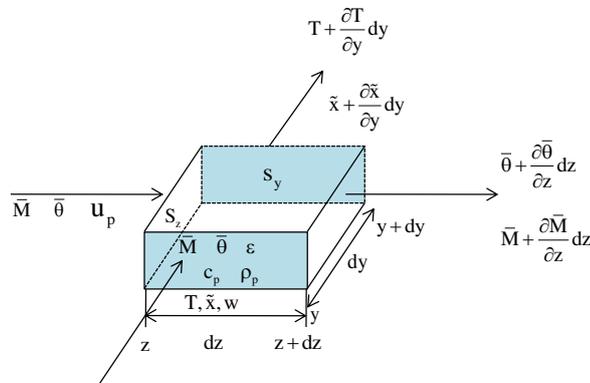


Figura 3.8 - Volume infinitesimal de sólido na camada. Fonte: Almeida (2009).

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

a) Balanço de energia para o ar

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

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

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.

b) Balanço de energia para o produto

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

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

ou ainda

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

c) 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:

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

d) 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 em questão para a pesquisa. Sendo assim, utiliza-se a Equação (3.8) citada por Silva (2009) que descreve o balanço de massa para o produto.

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

A derivação da Equação (3.8), tem como resultado a Equação (3.9):

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

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 reportados 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.

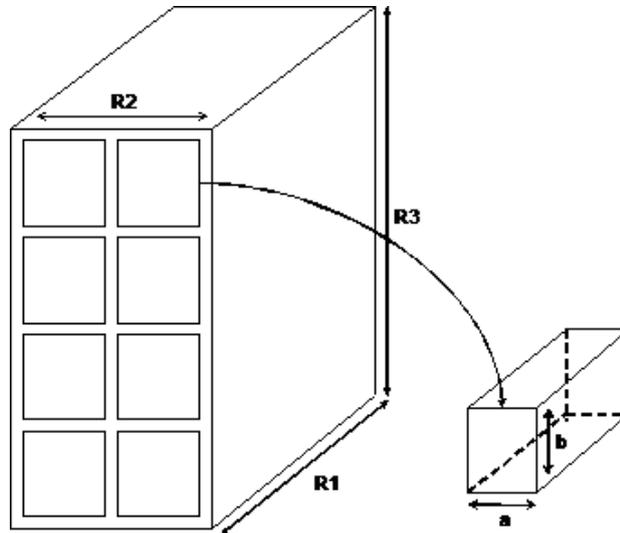


Figura 3.9 – Esquema do tijolo utilizado nos experimentos. Fonte: Almeida (2009).

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:

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

onde,

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

hidráulico, comprimento característico do tijolo (em forma de paralelepípedo); $Re = \frac{\rho_a w_a R_1}{\mu_a}$

é o número de Reynolds e $Pr = \frac{c_a \mu_a}{k_a}$ 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 $u_p = 0,01$ m/s,. Para esta velocidade o tempo que as vagonetas levam para percorrer o secador é de aproximadamente duas hora. Vale ressaltar que a velocidade vai sendo corrigida a medida que o teor de umidade verificado não é igual a umidade desejado.

Para a pesquisa o secador foi dividido em três secções, onde em cada uma variou-se temperatura e umidade absoluta do ar. As condições iniciais e de contorno a seguir são mostradas através de um esquema da vista superior do secador na Figura 3.10:

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

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

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

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

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

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

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

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

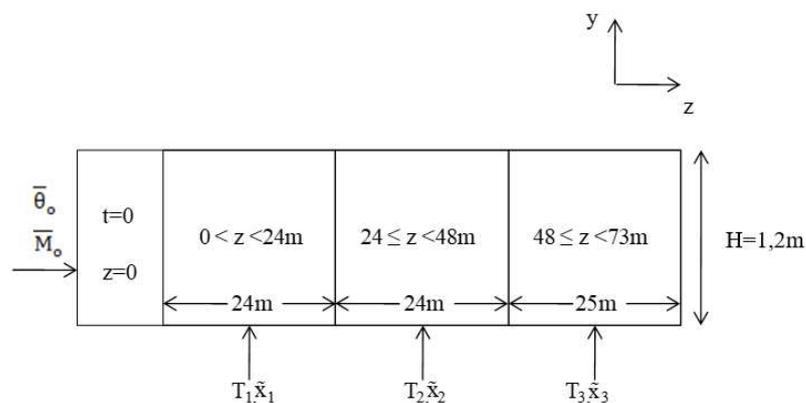


Figura 3.10 – Esquema das condições iniciais e de contorno no secador.

3.4 Solução numérica do modelo proposto para as transferências de calor e massa entre o ar e o produto

Técnicas numéricas para solução de problemas complexos nos campos de engenharia e da física é hoje uma realidade devido ao grande desenvolvimento de computadores de alta velocidade e de grande capacidade de armazenamento. Em função dessa disponibilidade computacional, que cresce exponencialmente, o desenvolvimento de algoritmos para a solução dos mais diversos problemas tem recebido enorme atenção dos analistas numéricos e engenheiros, fazendo com que o número de pesquisas que utilizam técnicas numéricas tenha cada vez mais espaço tanto no meio acadêmico-científico como no industrial (Maliska, 2004).

Existem diversas técnicas numéricas que podem ser usadas para resolver problemas simples e complexos, com precisão. A utilização de soluções numéricas tem inúmeras vantagens frente a utilização de soluções analíticas e de procedimentos experimentais. Dentre estas vantagens, a redução de custo, redução do tempo de projeto, questões relacionadas à segurança, otimização de projeto, entre outras.

Dentro dos métodos numéricos tradicionais os mais utilizados para resolver as equações diferenciais são: Método dos Volumes Finitos (MVF), Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). No desenvolvimento deste trabalho o método utilizado foi o de Volumes Finitos (MVF). Com o MVF os balanços de conservação são satisfeitos em nível de volumes elementares, para qualquer tamanho de malha, todos os princípios de conservação podem ser conferidos em uma malha bastante grosseira. Portanto não é necessário uma malha muito refinada, já que os balanços podem ser feitos manuseando-se poucos resultados em execuções rápidas no computador. Esse é uma das principais vantagens do MVF, pois em outros métodos por não existir o conceito de balanços em volumes elementares a solução exige uma malha bastante refinada. Em resumo o MVF obtém as equações aproximadas fazendo um balanço da propriedade em questão no volume elementar ou volume de controle, e também por meio da integração sobre o volume de controle no espaço e no tempo, da equação na forma conservativa (Maliska, 2004).

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.

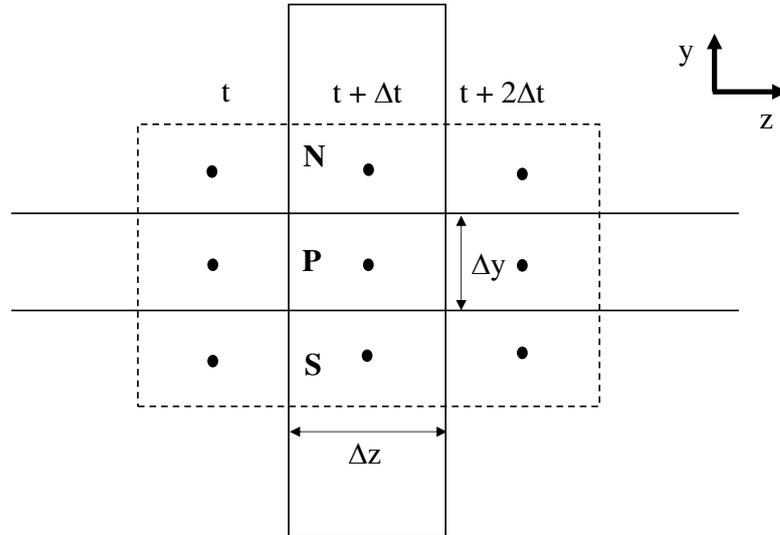


Figura 3.11 - Esquema numérico e o volume de controle utilizado.

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.

a) Balanço de energia para o ar

Integrado a Equação (3.4) no volume e no tempo, tem-se:

$$(T_p - T_p^o) \Delta x \Delta y \Delta z + \left(\frac{w_a}{\varepsilon} \right) (T_n - T_s) \Delta t \Delta x \Delta z = - \frac{A^* h_c (T_p - \bar{\theta}_p) \Delta x \Delta y \Delta z}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.22)$$

ou ainda

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \right) T_p = \left(\frac{w_a}{\varepsilon} \right) T_s + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t} \right) T_p^o + \left(\frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \right) \bar{\theta}_p \quad (2.23)$$

Escrevendo numa forma geral, obtém-se a equação dos coeficientes, que tem a seguinte forma:

$$A_P T_P = A_S T_S + A_P^o T_P^o + S_c^T \quad (3.24)$$

onde,

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

$$A_S = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.26)$$

$$A_P^o = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.27)$$

$$S_c^T = \frac{A^* h_c \Delta y \bar{\theta}_P}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a \tilde{x} c_v)} \quad (3.28)$$

Para as equações do balanço de energia para o produto e dos balanços de massa do ar e do produto o procedimento é análogo para a obtenção das respectivas equações dos coeficientes.

b) Balanço de energia para o produto

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

$$A_P \bar{\theta}_P = A_P^o \bar{\theta}_P^o + S_c^{\bar{\theta}} \quad (3.29)$$

onde,

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.30)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.31)$$

$$S_c^{\bar{o}} = \frac{(h_{fg}^* + c_v T_p) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \Delta z + \frac{h_c A^* T_p \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.32)$$

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

c) Balanço de massa do ar

Seguindo o mesmo procedimento para a Equação (3.7), a equação dos coeficientes é escrita como:

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.33)$$

onde,

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.34)$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.35)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.36)$$

$$S_c^x = -\frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.37)$$

d) Balanço de massa do produto

Da mesma forma para a Equação (3.9):

$$A_p \overline{M}_p = A_p^o \overline{M}_p^o + S_c^M \quad (3.38)$$

onde,

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.39)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.40)$$

$$S_c^M = (-[c_1 k_1 \exp(k_1 t) + c_2 k_2 \exp(k_2 t)](M_o - M_e)) \Delta z \quad (3.41)$$

Aqui é válido salientar que os gradientes hídricos e térmicos que ocorrem entre o ar e o produto se dão nas direções do fluxo de ar e saída do secador. Nenhuma mudança no ar e tijolo ocorre na direção perpendicular às direções citadas. Isto se deve ao fato do secador ser considerado como uma única vagoneta, uma vez que estas são introduzidas uma após a outra preenchendo todo o seu comprimento.

3.5 Malha numérica

Para a simulação e obtenção dos resultados foi desenvolvido um programa no ambiente Mathematica® e usado uma malha estruturada (apresentam regularidade na disposição dos pontos) e uniforme (volumes de controle uniformemente espaçados) de 20 volumes de controle na direção z, ver Figura 3.12. O programa desenvolvido encontra-se no Anexo I.

Maiores detalhes do refinamento e testes até a obtenção da malha com 20 volumes de controle na direção z encontram-se nos trabalhos de Farias (2003), Almeida (2009) e Tavares (2013).

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).

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica / CCT / UFCG em micro computadores Core i7 com a seguinte configuração: 1TB com 8GB SSD, memória de 8GB e memória dedicada de 2GB.

O método numérico utilizado para a simulação foi o método dos volumes finitos (MVF).

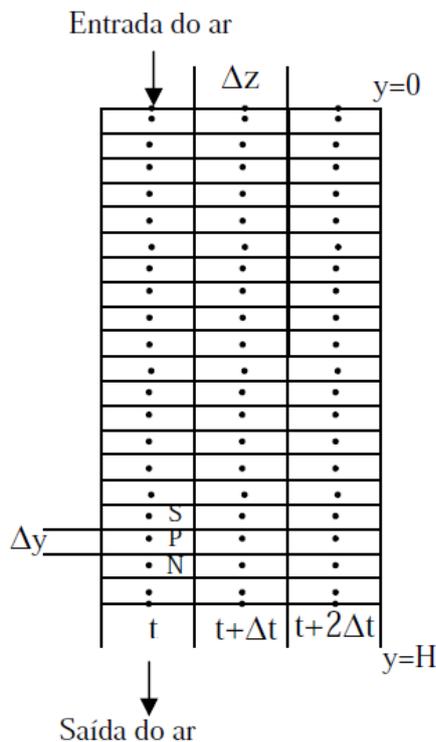


Figura 3.12 – Esquema da malha numérica usada na simulação.

3.5.1 Procedimentos Elípticos, Parabólicos e Hiperbólicos para solução de EDPs

Um problema numérico pode seguir procedimentos do tipo elíptico, parabólico e hiperbólico para a obtenção da solução das equações diferenciais parciais. Segundo Maliska (2004), a classificação de problemas elípticos, parabólicos e hiperbólicos pode ser feita

facilmente, de acordo com o tipo de equação que governa o fenômeno, utilizando-se a relação entre os coeficientes da equação diferencial parcial.

O problema abordado neste estudo é do tipo parabólico na direção z . Fato este que justifica a escolha do método de sintonia ser o de tentativa e erro. Por se tratar de um problema em marcha no espaço, não é possível obter a resposta no tempo para o secador como um todo. No problema em estudo, as equações são resolvidas em um dado instante de tempo e só então avança-se no espaço, por isso dito problema em marcha. Para aplicar métodos como o de Ziegler-Nichols para sintonia do controlador, por exemplo, o problema teria que ser do tipo elíptico. Assim todas as informações físicas se transmitiriam ao mesmo tempo pra toda a geometria estudada, ou seja para todo o secador.

Os problemas são classificados como Parabólicos ou Hiperbólicos quando permitem o procedimento de marcha. Problemas de marcha são aqueles que não necessitam de condições de contorno a jusante, isto é dependem apenas de informações a montante. Os problemas hiperbólicos são baseados nas características do problema e estão relacionados a problemas de vibração e convecção, enquanto que os Parabólicos são baseados a partir de uma coordenada.

Em problemas parabólicos, qualquer perturbação que ocorra em um ponto P do domínio de controle em um instante $t_p > 0$, só influencia a solução em $t > t_p$. Isto é consistente com a física, já que um evento qualquer pode influenciar eventos no futuro, mas não no passado ($t < t_p$). Além disso o efeito de perturbação se dissipa conforme aumenta a distância ao ponto P . Os mecanismos de dissipação presentes em problemas parabólicos fazem com que a solução no domínio em estudo e com tempo maior que zero seja suave, mesmo que as condições iniciais não o sejam (FORTUNA, 2000).

Os problemas classificados como elípticos não permitem o procedimento de marcha. Nestes problemas as informações físicas se transmitem em todas as direções coordenadas, logo requer condições de contorno por toda a fronteira do domínio.

Segundo Fortuna (2000) uma característica dos problemas regidos por equações elípticas é que toda o domínio de controle é imediatamente afetada por qualquer mudança no valor da

variável dependente em um ponto no interior no domínio, ou em sua fronteira. Isto equivale a dizer que perturbações deslocam-se em todas as direções dentro do domínio, afetando todos os demais pontos internos, embora essa influência diminua com o aumento da distância do ponto em questão.

A Figura 3.13 mostra um esquema para a caracterização das coordenadas.

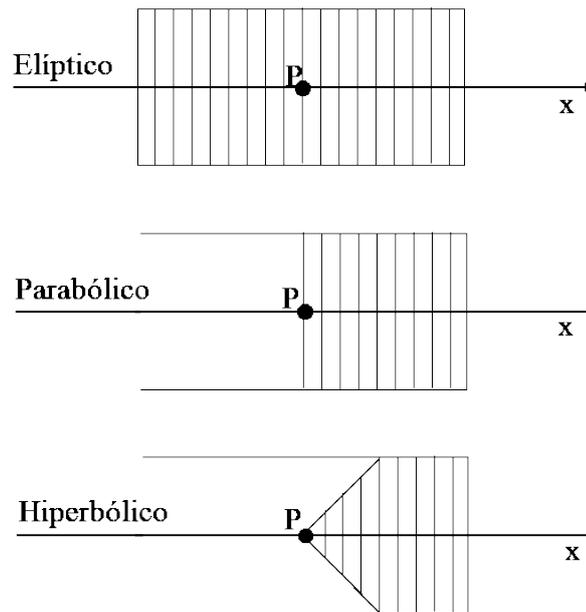


Figura 3.13 – Caracterização das coordenadas. Fonte: Adaptado de Maliska (2004).

3.6 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), a fim de tornar o modelo mais completo e contemplar uma possível saturação do ar de secagem. Assim:

- a) Em um determinado ponto do leito, calculados \bar{M} , $\bar{\theta}$, T e \tilde{x} , determina-se, UR e Pvs, usando as Equações 3.16 e 3.17;
- b) 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;
- c) Com o novo \tilde{x}_a , determina-se os novos valores de \bar{M} , $\bar{\theta}$, T e \tilde{x} ;
- d) 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:

$$\begin{aligned}
 T = & \frac{\frac{\rho_a w_a \Delta z}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x}) T_{ant} + \rho_p \Delta y (c_p + c_w \bar{M}_{ant}) \bar{\theta}_{ant}}{\rho_a w_a \frac{dz}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x})} + \\
 & + \frac{-\rho_p \Delta y (c_p + c_w M_o) T_{ant} - \rho_a w_a \left(\frac{\Delta z}{u_p}\right) h_{fg}^* (\tilde{x}_{ant} - \tilde{x})}{\rho_a w_a \frac{\Delta z}{u_p} (c_a + c_v \tilde{x})}
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

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:

$$\bar{M} = \bar{M}_{ant} + \left(\frac{\rho_a w_a \Delta z}{\rho_p u_p \Delta y}\right) \cdot (\tilde{x}_{ant} - \tilde{x}) \tag{3.43}$$

Um valor $\Delta x_a = 10^{-8}$ kg/kg foi usado na simulação. O uso deste valor se dá pelo fato de que os valores de umidade absoluta são da ordem de 10^{-3} kg/kg. Desta forma, uma correção da ordem de 10^{-8} torna-se bem precisa.

3.7 Modelagem matemática do controlador no processo de secagem

O problema de controle envolvido nesta pesquisa refere-se ao teor de umidade que o tijolo terá após percorrer todo o secador. Para tanto, ao final do secador ocorrerá uma leitura desta variável e então uma comparação com um valor preestabelecido como referência, que é o teor de umidade obtido experimentalmente (ou até mesmo aquele estabelecido comercialmente), onde se garante a qualidade do produto na etapa seguinte (queima) e também na pós queima. Tal umidade de referência é o chamado *set point*. Quando ao final do túnel, o valor real lido do teor de umidade será comparado com o *set point* e, havendo uma diferença entre eles, o controlador entra em ação de forma a corrigir a velocidade dos carrinhos dentro do secador, minimizando esta diferença.

Uma balança de precisão pode ser o instrumento de medição usado para conferir se o teor de umidade desejado foi atingido. Sabendo-se qual deve ser a massa do tijolo seco é possível comparar o valor lido da massa do tijolo que sai do secador com o valor da massa do tijolo que se deseja obter. Uma diferença positiva entre a massa do tijolo que sai e a do que se deseja implica em umidade acima do esperado.

É interessante salientar que a ação do controle, conforme já mencionado, será uma ação reversa ou seja, se a variável de processo aumenta (umidade do tijolo) a variável manipulada (velocidade das vagonetas) diminui. Pode-se dizer que, o teor de umidade do tijolo ao final da secagem é o parâmetro de maior importância, tendo em vista que, se o produto for entregue aos fornos de queima com elevada umidade, este apresentará fenômenos tais como explosões, deformações em sua geometria, fatos estes que serão discutidos ainda neste trabalho.

Por outro lado, se o teor de umidade for muito abaixo do ideal, pode acontecer de, mesmo antes da queima, na própria etapa de secagem, o produto já apresentar defeitos. Nem sempre tais defeitos são visualizados facilmente. Por exemplo, trincas provenientes do fenômeno de retração volumétrica, devido a remoção de umidade muito rápida, mas seguidas de expansão térmica podem camuflar-se e não serem detectadas a “olho nu”. Caso ele seja levado à etapa de queima, problemas como fissuras, empenamento, e até rachaduras severas podem acontecer.

Para uma melhor compreensão de como acontecerá a ação do controle, as Figuras 3.14 e 3.15 mostram, respectivamente, esquema e fluxograma (simulação) mais detalhado do processo.

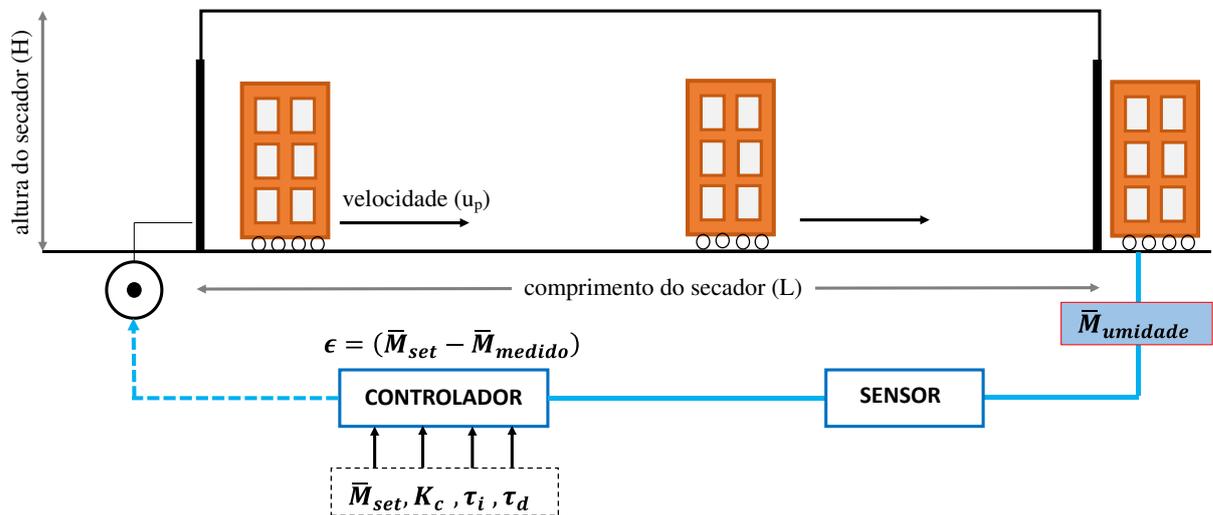


Figura 3.14 – Esquema da ação do controle no processo de secagem de tijolos.

O produto entra no secador com um certo teor de umidade inicial. Ao longo do percurso dentro do secador tipo túnel, o produto e o ar efetuarão trocas de energia e massa, de modo que, durante o processo o produto se aquece e seca. Ao final do percurso, um sensor fará a aferição do teor de umidade do tijolo. Esse valor é então comparado com o valor de referência (*set point*).

Essa comparação poderá incorrer em três situações. Em um caso, o desvio (erro) entre a variável medida (variável de processo) e o *set point* pode dar igual a zero e então a variável manipulada (velocidade das vagonetas) permanecerá inalterada.

Em uma outra situação, o desvio oriundo da comparação entre a variável de processo e o *set point* poderá ser maior que zero, ou seja, o teor de umidade está abaixo do ideal, nesse caso o controlador age no sistema, fazendo com que a velocidade das vagonetas aumente, e portanto o tempo de permanência no secador será menor.

Uma terceira possibilidade é que o desvio seja menor que zero, ou seja o teor de umidade esteja muito alto. A ação do controle será desta vez voltada a agir sobre o sistema, só que de forma a diminuir a velocidade das vagonetas. Isto fará com que o produto permaneça mais

tempo dentro do secador. Este ajuste será otimizado com a ação do controlador PID. Optou-se por este tipo de controlador por todas as vantagens que ele apresenta.

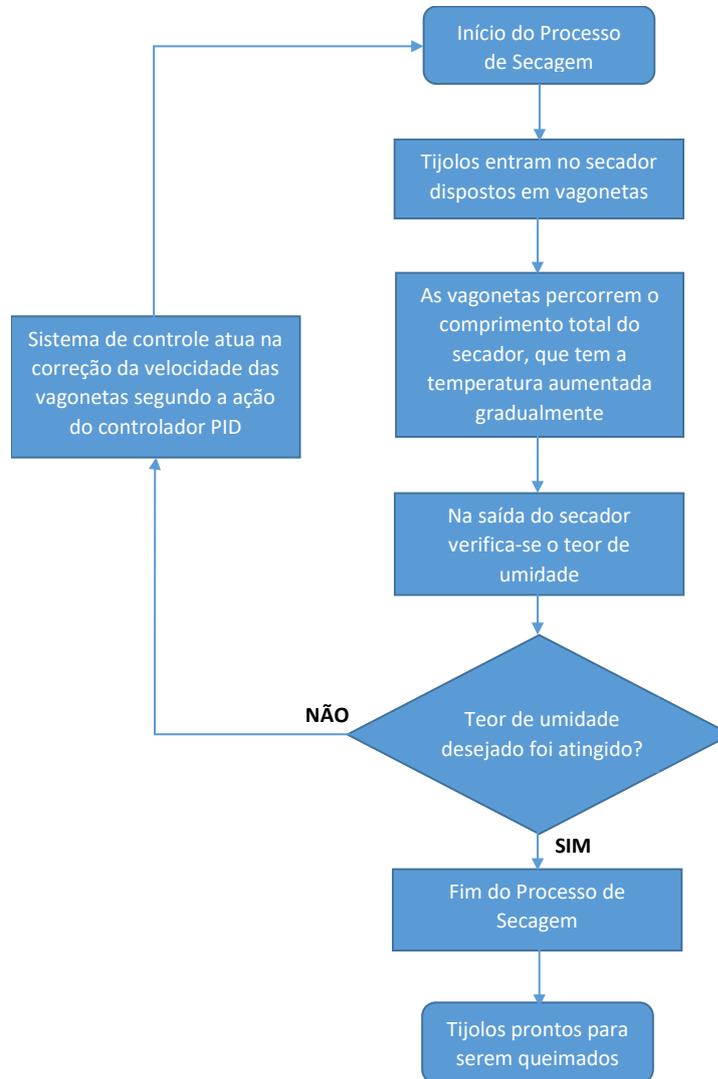


Figura 3.15 – Fluxograma do processo de secagem de tijolos na simulação.

A modelagem matemática da atuação do controlador do tipo PID no processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados se dá a partir da Equação (3.44), chamada de Lei do Controle. Esta equação é equivalente à Equação (2.32). Conforme já mencionado, cada termo se refere a uma ação. O primeiro, ação proporcional. O segundo a ação integrativa. Já o terceiro termo refere-se a ação derivativa. A combinação desses três termos faz com que esse tipo de controlador ganhe características peculiares e tem sido utilizado largamente na indústria.

Lei do Controle:

$$\Delta u_{p\tilde{k}} = K_c \epsilon_{\tilde{k}} + \frac{K_c}{\tau_i} \sum_0^{\tilde{k}+1} \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}})}{2} \Delta t + K_c \tau_d \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}})}{\Delta t} \quad (3.44)$$

A dedução da Equação (3.44) se dá através da resposta do erro em função do tempo representado na Figura 3.16. Por exemplo, no tempo \tilde{k} , o respectivo erro é $\epsilon_{\tilde{k}}$. Para o tempo $\tilde{k} + 1$, o erro correspondente será $\epsilon_{\tilde{k}+1}$ e de modo análogo para os próximos passos de tempo.

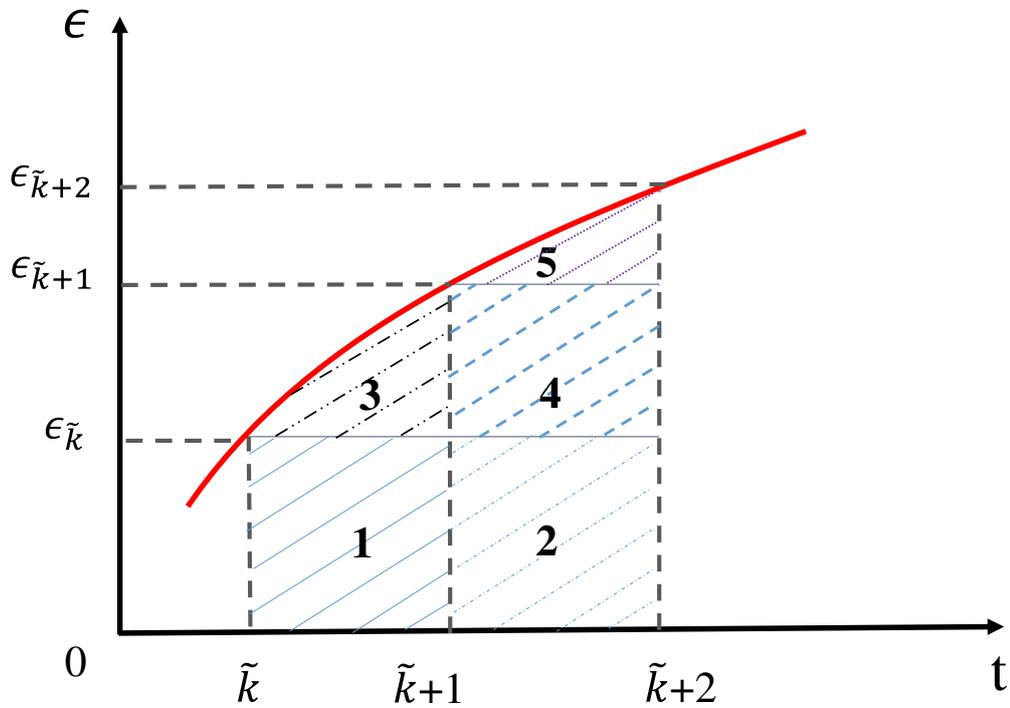


Figura 3.16 - Demonstração do comportamento do erro em função do tempo.

A integral sob a curva representa exatamente a função do desvio (erro). Mas pode-se facilitar a análise ao subdividir em volumes tal qual está representado. Assim calculando-se a área correspondente a cada volume, tem-se respectivamente para os volume 1, 2, 3, 4 e 5:

$$A_1 = (\epsilon_{\tilde{k}}) \cdot ((\tilde{k} + 1) - \tilde{k}) \quad (3.45)$$

$$A_2 = (\epsilon_{\tilde{k}}) \cdot ((\tilde{k} + 2) - (\tilde{k} + 1)) \quad (3.46)$$

$$A_3 = [(\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}}) \cdot ((\tilde{k} + 1) - \tilde{k})]/2 \quad (3.47)$$

$$A_4 = (\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}}) \cdot ((\tilde{k} + 2) - (\tilde{k} + 1)) \quad (3.48)$$

$$A_5 = [(\epsilon_{\tilde{k}+2} - \epsilon_{\tilde{k}+1}) \cdot ((\tilde{k} + 2) - (\tilde{k} + 1))]/2 \quad (3.49)$$

Assim no tempo \tilde{k} , tem-se que:

$$u_{p\tilde{k}} = K_c \epsilon_{\tilde{k}} + \frac{K_c}{\tau_i} \sum_0^{\tilde{k}+1} \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}})}{2} \Delta t + K_c \tau_d \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}})}{\Delta t} \quad (3.50)$$

No tempo $\tilde{k}+1$, pode-se escrever:

$$u_{p\tilde{k}+1} = K_c \epsilon_{\tilde{k}+1} + \frac{K_c}{\tau_i} \sum_0^{\tilde{k}+2} \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+2} - \epsilon_{\tilde{k}+1})}{2} \Delta t + K_c \tau_d \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+2} - \epsilon_{\tilde{k}+1})}{\Delta t} \quad (3.51)$$

Fazendo $\Delta u_p = (u_{p\tilde{k}+1} - u_{p\tilde{k}})$

$$\Delta u_p = K_c (\epsilon_{\tilde{k}+1} - \epsilon_{\tilde{k}}) + \frac{K_c}{\tau_i} \frac{(\epsilon_{\tilde{k}+1} + \epsilon_{\tilde{k}})}{2} \Delta t + K_c \tau_d \frac{(\epsilon_{\tilde{k}} - 2\epsilon_{\tilde{k}+1} + \epsilon_{\tilde{k}+2})}{\Delta t} \quad (3.52)$$

Onde K_c , τ_i e τ_d são, respectivamente, os parâmetros proporcional, integrativo e derivativo.

Tais parâmetros são obtidos através da sintonia do controlador segundo um método de sintonia. Neste estudo, conforme já mencionado, utilizou-se o método “tentativa e erro” pelos motivos já expostos.

3.8 Casos estudados

No presente trabalho são analisados tanto a influência das condições do ar de secagem quanto dos parâmetros que melhor sintonizam o controlador PID no processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em secador do tipo túnel.

Diversos casos foram simulados afim de obter os melhores parâmetros e consequentemente a melhor sintonia.

Para os casos estudados os parâmetros usados na Equação (3.8) estão descritos na Tabela 3.1, reportados por Silva (2009).

Tabela 3.1 - Parâmetros da Equação (3.8).

T(°C)	Parâmetros					
	c ₁	k ₁ (s ⁻¹)	c ₂	k ₂ (s ⁻¹)	M _o (kg/kg)	M _e (kg/kg)
60	0,54774	-0,0059453	0,5133493	-0,0059452	0,14795	0,00268
70	-1,083353 x 10 ⁻¹⁸	0,0067809	1,04505	-0,0070948	0,15414	0,00076
80	0,535201	-0,0091904	0,527668	-0,0091903	0,15248	0,00039
100	4,879507	-0,0083828	-3,827964	-0,0078813	0,16903	0,00038

Já as especificações relacionadas às condições iniciais na entrada do controlador usadas na Equação (3.52) para o teor de umidade desejado (\bar{M}_{set}) e o ganho de velocidade das vagonetas (Δu_p) são respectivamente, 0,01 kg/kg e 1×10^{-5} m/s, para todos os casos estudados.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Obtenção dos valores de umidade com o modelo desenvolvido

Para analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção da água do tijolo cerâmico vazado, bem como encontrar os parâmetros de sintonia do controlador, quatro casos foram simulados. Primeiramente variou-se as condições do ar na entrada das três secções do secador, mantendo-se a velocidade do ar constante, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Condições do ar de secagem na entrada do secador.

Caso	Leito	Ar						
	y (m)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	\tilde{x}_1 (kg/kg)	\tilde{x}_2 (kg/kg)	\tilde{x}_3 (kg/kg)	w (m/s)
1	1,2	60	70	80	0,01697	0,0149	0,01367	20
2	1,2	60	70	80	0,01697	0,0149	0,01367	20
4	1,8	60	70	80	0,01697	0,0149	0,01367	20
5	1,8	60	70	80	0,01697	0,0149	0,01367	20

As condições do teor de umidade médio inicial (\bar{M}_o) e temperatura inicial do produto ($\bar{\theta}_o$) na entrada do secador para a temperatura de 60°C (temperatura inicial para todos os casos estudados) são, respectivamente, 0,14795 kg/kg e 20,5 °C.

Primeiro escolheu-se as condições iniciais e de contorno do ar de secagem e as condições de entrada do controlador conforme está especificado no código em anexo. Em seguida, foram simulados casos com diferentes parâmetros de ajuste do controlador (K_c, τ_i e τ_d).

Partiu-se de um chute inicial para os valores dos parâmetros K_c, τ_i e τ_d com base na observação de valores reportados na literatura, bem como, de reflexões sobre a sensibilidade destes parâmetros dados por Campos e Teixeira (2010), sobre a sintonia do controlador PID pelo método de Ziegler-Nichols. Entretanto, até se obter parâmetros do controlador com resposta física coerente houveram diversos casos onde aconteceram “*overflow*”, teores de umidade oscilando entre positivo e negativo e muitas outras respostas que desestabilizaram a cinética de secagem e que não condiziam com a física do problema. Na Tabela 4.2 são elencados alguns desses valores chutados inicialmente.

Tabela 4.2 – Chutes iniciais dos parâmetros do PID

K_c	τ_i	τ_d	Resposta física
1	1	0,5	Não simulou
0,5	0,5	0,00015	<i>Overflow</i>
0,5	0,5	0,001	Resposta coerente
0,25	0,25	0,002	Resposta coerente

Através do estudo detalhado sobre os parâmetros e sua sensibilidade dentro dos processos reportados na literatura e até mesmo pelo caráter de cada um, (ver os tópicos 2.5.3.1, 2.5.3.2 e 2.5.3.3) pode-se observar que, nos casos estudados nesta pesquisa, a variação do parâmetro referente a parte derivativa da equação que rege a modelagem do controlador PID, tornou o processo relativamente mais rápido.

A parcela de ganho derivativo adiciona um caráter antecipativo ao processo. Ela age no sentido de diminuir as variações da variável manipulada, evitando oscilações bruscas. Isso

confere ao controlador PID uma resposta mais rápida dentro do intervalo desejado. Na iteração de número 59 para o caso 1 observa-se que a velocidade é, $u_p=0,00358131$ m/s, enquanto que no caso 2 na mesma iteração $u_p=0,00299208$ m/s com respectivos teores de umidade 0,0197481 e 0,0152811 kg/kg. Ou seja, para o caso 2 o tijolo já se encontra mais próximo do teor de umidade desejado (*setpoint*), mesmo sob as mesmas condições de secagem. Isso se deve ao fato de que um acréscimo de pouco mais de 8% no parâmetro derivativo fez com que a cinética do controlador se tornasse melhor, acelerando o processo de convergência para o teor de umidade desejado.

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 de tijolos cerâmicos vazados 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 numéricas para os teores de umidade ao longo do tempo, para os casos estudados. O modelo se ajusta bem e apresenta pequenos erros. A obtenção das curvas experimentais foram feitas através da utilização dos parâmetros obtidos por Silva (2009) na Equação (3.8).

Essa pequena diferença pode ter ocorrido devido a fatores como incerteza da medição oriunda de precisão dos instrumentos utilizados no processo de coleta dos dados, condições ambientais, etc. Já o degrau na curva experimental se deve ao fato do secador estar dividido em três zonas com parâmetros de secagem distintos, conforme mostrado na Figura 3.10. Isso gera uma descontinuidade nas informações para cada trecho da curva.

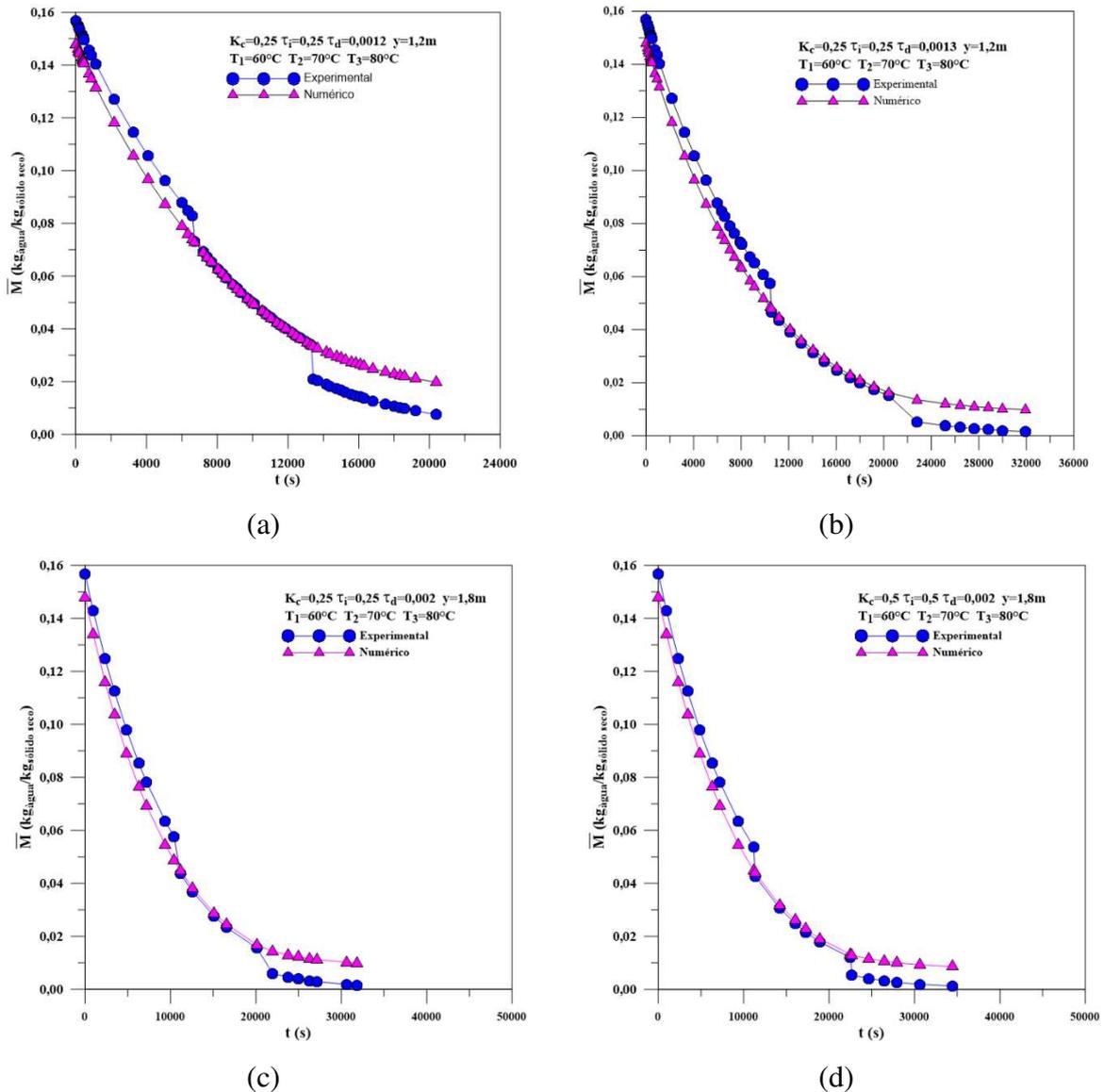
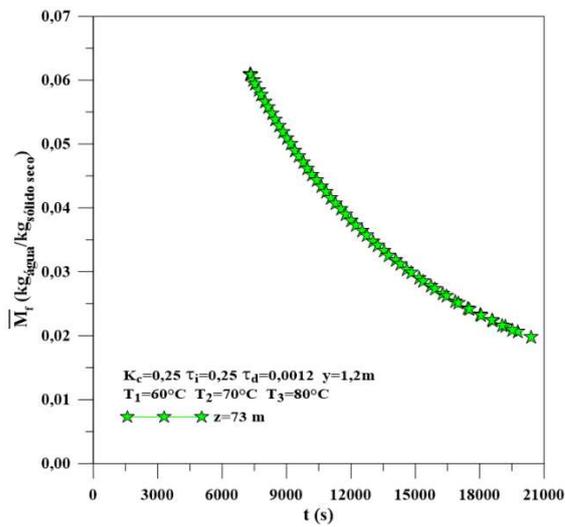


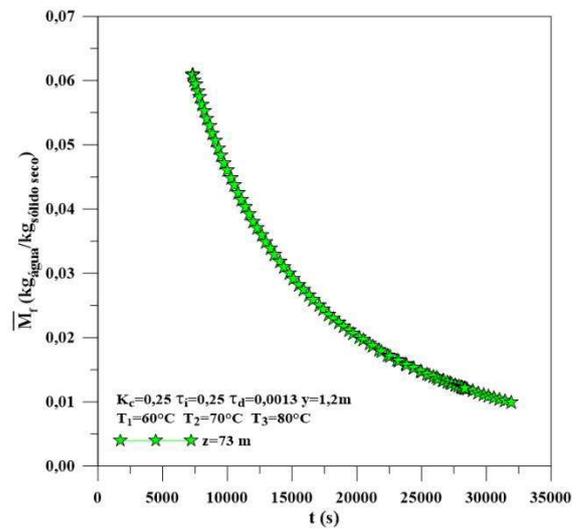
Figura 4.1 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais (Silva, 2009) do teor de umidade de tijolo cerâmico vazado durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado a) Caso 1, b) Caso2, c) Caso 3, d) Caso 4.

A Figura 4.2 apresenta a cinética de secagem do tijolo cerâmico industrial ao final de cada passagem dentro do secador. Neste caso os dados são referentes a posição $z=73m$ dentro do mesmo. Toda vez que o produto percorre o secador totalmente, é feita a verificação pelo sistema de controle da condição de umidade do produto. Em seguida esse resultado é comparado com o teor de umidade desejado ao final do processo. Caso o teor de umidade desejado não tenha sido atingido ($\bar{M}_f > \bar{M}_{set}$), a velocidade das vagonetas é corrigida e o produto percorre o secador com uma nova velocidade. Esta ação ocorre enquanto o teor de umidade desejado não

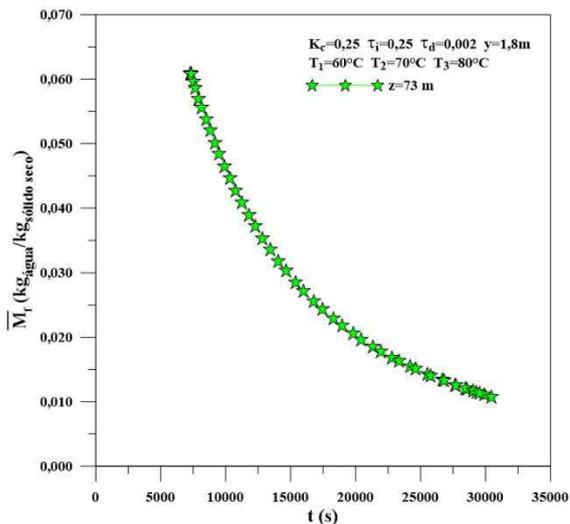
for atingido. Isto deve acontecer de forma que as respostas tenham coerência física e sejam condizentes com a dinâmica do processo de secagem do produto. Caso isto não aconteça, os parâmetros do controlador devem ser ajustados e simulados novamente, o que consiste exatamente em sintonizar o controlador e obter parâmetros mais eficientes em ajustar a velocidade das vagonetas, otimizando assim o processo.



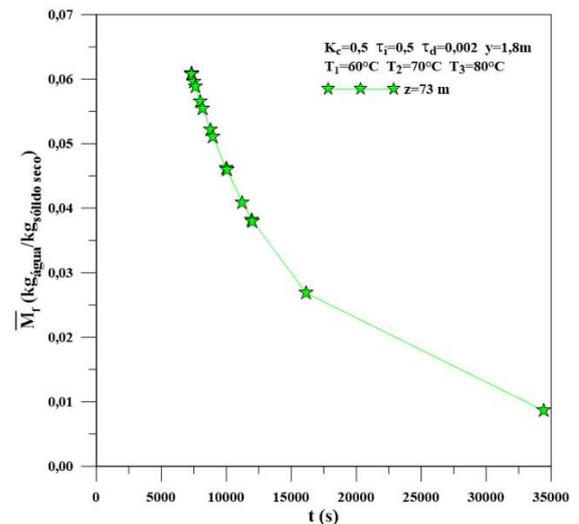
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.2- Cinética de secagem do tijolo cerâmico vazado na saída do secador ($z=73\text{m}$) em função do tempo a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4.

Analisando a Figura 4.2 (a) é perceptível que o produto ainda não atingiu o teor de umidade desejado, mas que já se encontra bem próximo dele. Com a mudança da velocidade das vagonetas na entrada do secador pode-se vislumbrar essa convergência ao longo do tempo. Já no caso 2 (Figura 4.2 (b)) um ajuste nos parâmetros do controlador fez com que o teor de umidade fosse atingido. Na simulação o número máximo de iteração para o caso 2 foi de 100 (condição estabelecida no início do código). Na iteração 91 o teor de umidade desejado foi atingido e o tempo de residência no secador nesta iteração foi de aproximadamente 8 horas e 52 minutos (31.921,9 segundos). Isso se deve ao fato de que um acréscimo de 8,3% no τ_d , proporcionasse melhor ação do controlador e, conseqüentemente, um ajuste mais veloz na velocidade das vagonetas.

Aqui pode-se observar o quanto a simulação é importante no processo de ajuste dos parâmetros e das condições ótimas de operação para uma planta industrial de secagem. Realizar esses ajustes na prática seria inviável, pois causaria inúmeros transtornos e elevaria muito os custos de produção. Uma vez que o código computacional descreva bem o processo, este será uma ferramenta indispensável para simular a reação do processo frente às mudanças nas condições tanto do ar quanto do produto, alinhando-as e procurando sempre otimizar o processo. Essas informações serão imprescindíveis à otimização do processo de secagem de tijolos cerâmicos. Um banco de dados interceptando inúmeras condições operacionais, obtidos via simulação computacional, daria ao processo real condições confiáveis de operação com os menores tempos de processo, mas garantindo a integridade e qualidade do produto. Além disso o número de refugos já nesta etapa e na etapa posterior, a queima, iria diminuir muito, pois a secagem é determinante, também, na qualidade pós queima. O produto deve sair do secador com teores de umidade adequados e uniformizados. Se a umidade é muito alta o produto pode, por exemplo, explodir dentro do forno de queima, se deformar. Se a umidade é muito baixa, trincas e rachaduras serão inevitáveis, especialmente nos pontos concentradores de tensões.

Na Figura 4.3 é apresentada a relação entre o teor de umidade do tijolo (\bar{M}_f) e a velocidade das vagonetas (u_p) de cada leitura feita ao final do secador. Nota-se que a medida que o teor de umidade (variável de processo) é comparado, verifica-se que este é maior do que o teor de umidade desejado (M_d), assim o sistema de controle atua na variável controlada que é a velocidade das vagonetas, de forma a diminuí-la, o que fará com que na próxima passagem, as

vagonetas levem mais tempo para percorrer o secador e, conseqüentemente, o produto permaneça mais tempo efetuando as trocas térmicas e hídricas com o ar, diminuindo seu teor de umidade na saída do secador ($z=73\text{m}$). Para todos os casos (Figura 4.3) observa-se que a resposta entre a remoção da umidade do produto e a velocidade das vagonetas são compatíveis.

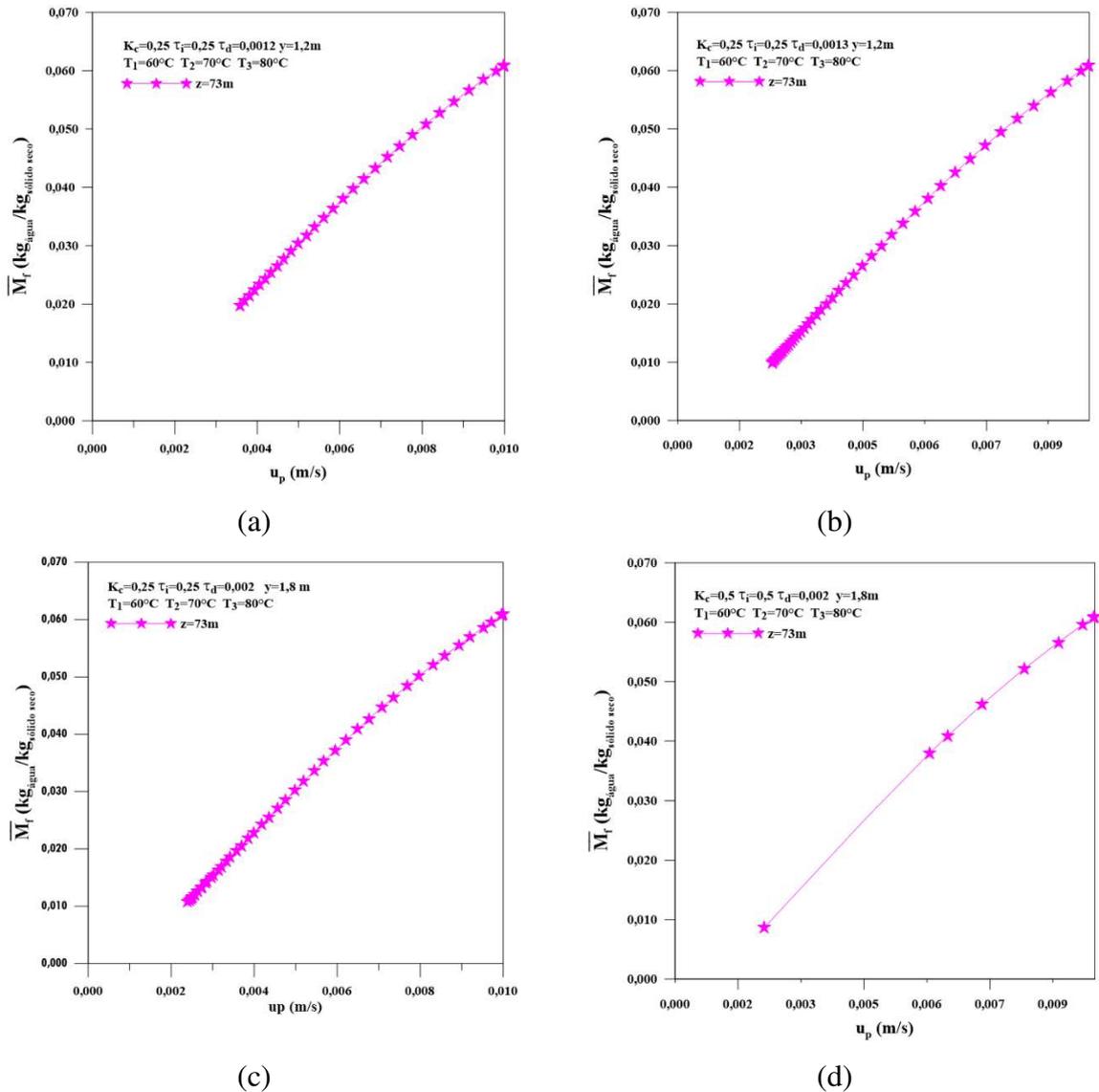


Figura 4.3 – Teor de umidade do produto na saída do secador ($z=73\text{ m}$) em função da velocidade das vagonetas a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4.

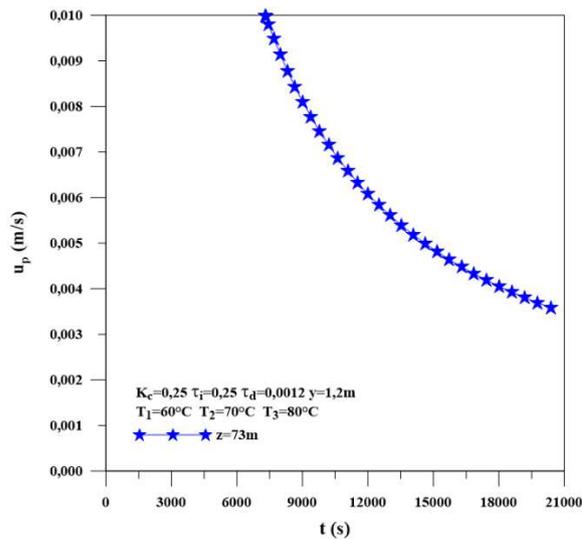
Nota-se que para o caso 4 (Figura 4.3 (d)), há uma correção muito mais rápida na velocidade das vagonetas. Isso é completamente normal, e significa que para tais condições operacionais o controlador age muito mais rapidamente sobre a variável controlada (velocidade

das vagonetas). Em poucas iterações já se encontra a velocidade ótima de operação para tais condições de secagem.

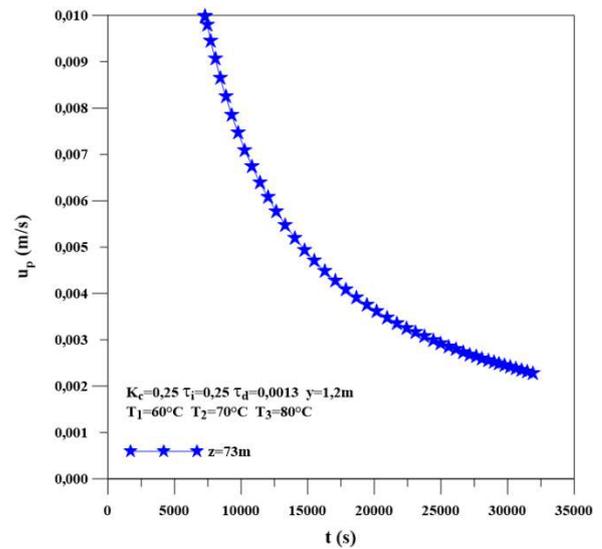
Já a Figura 4.4 mostra a relação entre a velocidade das vagonetas e o tempo de processo ao final de cada vez que estas percorrem o secador ($z=73\text{m}$) para os casos estudados. Como já era de se esperar, o fato explicado na Figuras 4.3 justifica a Figura 4.4. Uma vez que a velocidade das vagonetas diminui, o produto levará mais tempo para percorrer o secador, ou seja, o tempo de processo será maior. Ao final da primeira iteração ($u_p = 0,01 \text{ m/s}$) o tempo de processo foi de aproximadamente 2 horas para todos os casos. A medida que houve a ação do controlador, a velocidade das vagonetas diminuiu e o que se observa é que ao final da última iteração o tempo de residência dentro do secador quase triplicou e foi para aproximadamente cinco horas e quarenta minutos (caso 1). Entretanto o *setpoint* ainda não foi atingido (necessitaria de mais iterações para ajustar a velocidade das vagonetas). No caso 2 o *setpoint* foi atingido e o tempo de processo foi de quase nove horas (Figura 4.8 b). Já para o caso 4 o tempo de processo é de aproximadamente nove horas e meia.

Vale salientar que no caso 3 e caso 4 o tempo de permanência aumenta pois o a espessura do leito passou de 1,2 m para 1,8 m. Um acréscimo de 50% em relação aos anteriores. Mesmo assim observa-se a otimização do processo de secagem. Pois, o tempo de processo aumenta em torno de 19% no caso 4, enquanto que isto reflete em um ganho de produtividade na etapa de secagem de 50%.

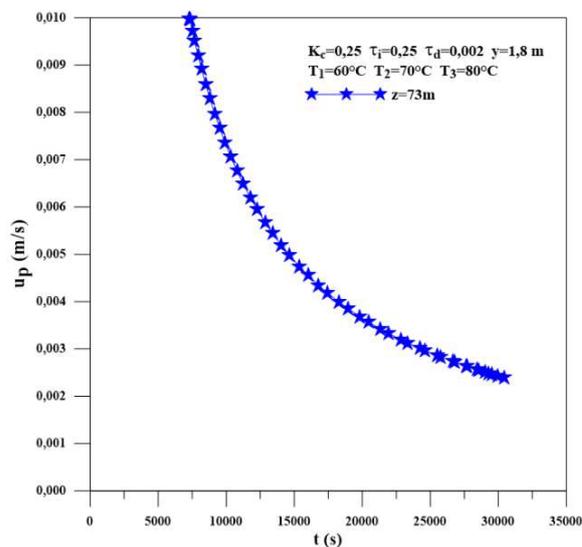
Ainda sobre a Figura 4.4 (d), nota-se que o controlador vai agindo de forma suave até certo ponto. Porém, em única iteração na simulação ele já corrige de maneira muito abrupta a velocidade das vagonetas. O que faz com que da iteração 16 para a 17 a velocidade que proporcionaria um tempo de processo em torno de quatro horas, é corrigida e passa agora para uma velocidade que fará com que o produto tenha um tempo de permanência no secador de quase 10 horas. Significa dizer que ao se dobrar os parâmetros proporcional e integrativo a dinâmica do processo muda e a resposta física é mais rápida.



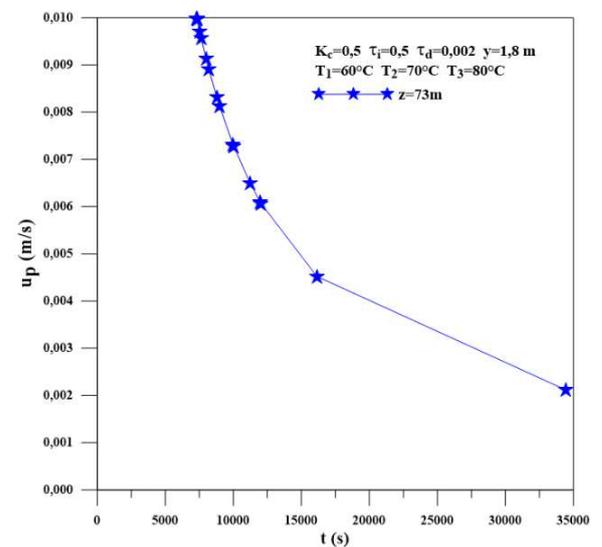
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.4 – Correlação da velocidade das vagonetas em função do tempo de processo ao final do secador ($z=73$ m) a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3, d) Caso 4.

Nas Figuras 4.5 a 4.10, são mostrados, respectivamente, os valores dos teor de umidade (\bar{M}), temperatura do produto ($\bar{\theta}$), temperatura do ar de secagem (T), umidade relativa (UR), razão de umidade (\tilde{x}) e pressão de vapor saturado (P_{vs}) em tempos diferentes ao longo do leito para o caso 4 estudado nesta pesquisa. Para os demais casos (caso 1, caso 2 e caso 3) os gráficos encontram-se em anexo. 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. Embora a umidade relativa do ar de secagem seja baixa, o que lhe confere um elevado potencial de secagem, um fator que também favorece uma secagem uniforme é a velocidade de deslocamento das vagonetas.

Este é um ponto interessante, uma vez que as recomendações são exatamente não promover altos gradientes térmicos e hídricos no processo de secagem de tijolos cerâmicos. As condições usadas na simulação são, portanto, satisfatória sob esta ótica, no entanto leva a um outro aspecto que é a questão do tempo de processo. Quanto maior o tempo que o tijolo leva para percorrer o secador mais custos de produção estarão envolvidos, encarecendo o processo em si e conseqüentemente, o produto final. Logo, otimizar as variáveis envolvidas neste processo é de suma importância para tornar a atividade viável. As condições usadas nesta simulação são comprovadamente satisfatórias segundo Tavares (2013) e Silva (2009) que estudaram a secagem convectiva de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel. Tavares (2013), validou a metodologia numérica usada em seu trabalho com os dados experimentais fornecidos por Silva (2009), os quais fornecem suporte para validação do modelo adotado nesta pesquisa.

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, conforme já mencionado, altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do leito porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no tijolo, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformações e empenamentos no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo e, conseqüentemente, inviabilizando a sua comercialização, gerando desperdícios e causando um maior impacto ambiental.

Segundo Nascimento (2002), 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.

É importante encontrar as condições ideais de secagem para que se encontre o equilíbrio entre a produtividade e a qualidade dos produtos, especialmente nos dias atuais onde os consumidores estão cada vez mais exigentes e as empresas cada vez mais concorrentes. Vislumbrar melhorias no processo produtivo para atender os requisitos de qualidade com preço competitivo passa a ser quase que regra para as organizações que desejam se manter ativas. Aliar estudos científicos aos processos industriais é imprescindível para otimização e melhorias com menores custos.

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.

Os defeitos, tais como as trincas e deformações, que podem aparecer depois do processo de secagem se devem ao fato de que ao longo do processo de remoção da massa de água presente na mistura não ter havido uma velocidade adequada de retirada. Se o ar estiver muito seco com uma velocidade e com temperaturas muito elevadas, ele irá promover uma secagem desigual no tijolo. A parte mais externa, superficial, irá absorver energia na forma de calor e isso fará com que haja a vaporização da água e a consequente transferência dessa massa de água do tijolo para o ar. Só que isto acontecerá de maneira tão brusca que não será possível uma readaptação das partículas de argila frente aos espaços vazios (porosidade) que se formarão no interior do produto.

Além disso, não haverá tempo suficiente para que a umidade da parte mais interna do tijolo possa migrar, através das forças capilares e outros mecanismos físicos, para a superfície e ser absorvida pelo ar. Consequentemente a superfície fica muito quente e seca, enquanto que o interior fica úmido e mais frio, comprometendo as propriedades mecânicas do produto.

Na Figura 4.5 é interessante destacar que ao longo do leito o teor de umidade praticamente não varia. Ou seja, a taxa de transferência de massa em $y=0$ e $y=1,8$ m é praticamente constante.

Isso é interessante, pois significa que não há altos gradientes hídricos ao longo do leito nos diferentes tempos de processo dentro do secador e, conseqüentemente pode-se afirmar que o fenômeno de secagem acontece de maneira uniforme dentro do leito. Ou seja, a transferência de água dos tijolos que estão na frente de contato direto com o ar e aqueles que estão na parte posterior das vagonetas, acontece uniformemente. Fatores como a velocidade e a temperatura do ar, o comprimento do leito e a velocidade das vagonetas tem forte influência nisto.

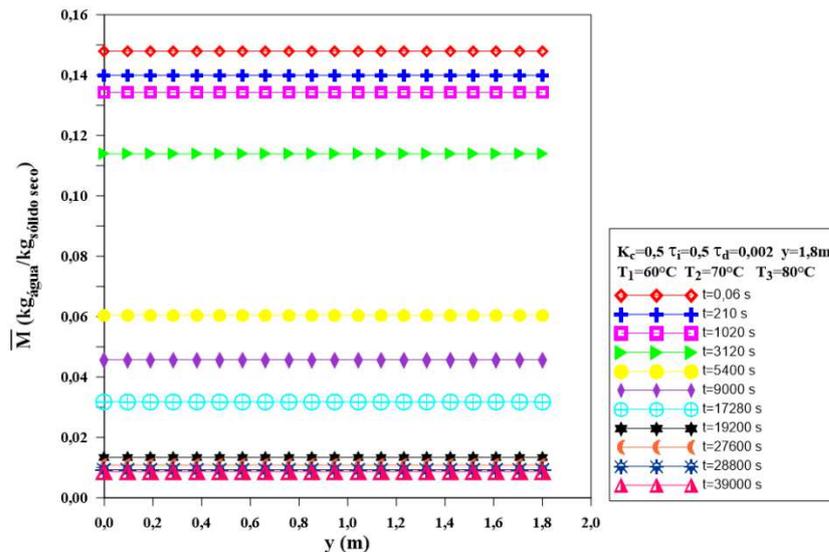


Figura 4.5 - Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4).

Na Figura 4.6 pode ser observado a temperatura do produto dentro do leito em diferentes tempos de processo. Assim como a umidade, esta também praticamente não varia. O que implica em aquecimento uniforme em todas as posições no leito. Nos primeiros tempos observa-se que é imperceptível a variação na temperatura ao longo do leito. No tempo de processo $t=3120$ s já se percebe uma sutil variação, o que é natural pois já houve tempo suficiente para que houvesse trocas significativas entre o ar e o produto e a frente de contato inicial irá se aquecer mais rápido, o que fisicamente está coerente e já era de se esperar. Para tempos de processo mais elevados é notório que essa variação torna-se, novamente, a ser mínima. Isto deve-se ao aumento gradativo das temperatura do ar de secagem.

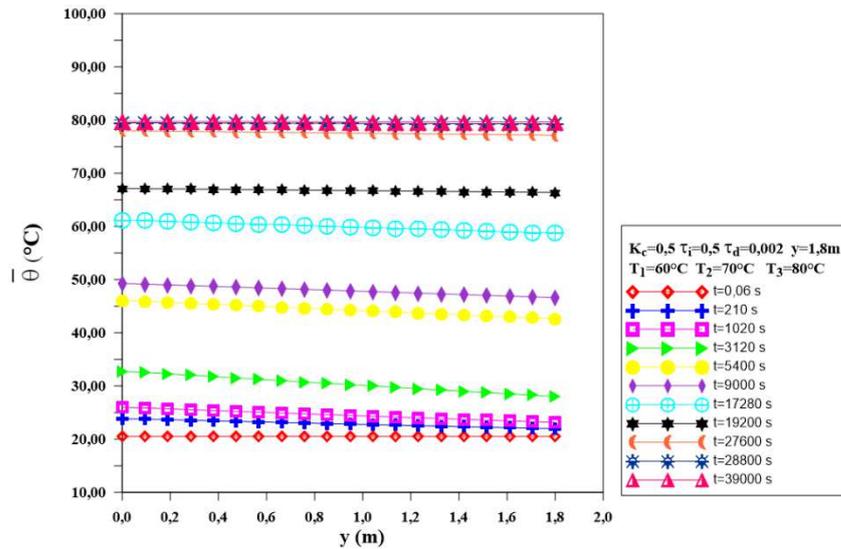


Figura 4.6- Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4)

Na Figura 4.7 observa-se que há uma pequena variação na temperatura do ar ao longo do leito no início da secagem. Isto se deve ao fato de que, no início do processo, os tijolos com elevados índices de umidade requerem mais energia para vaporizar a água na superfície.

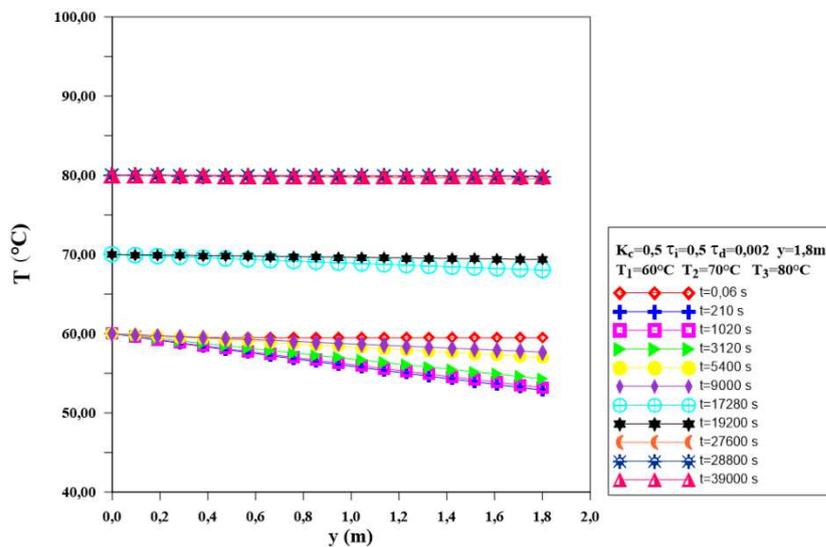


Figura 4.7 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4).

Em relação à umidade relativa (Figura 4.8) observa-se que no início do processo (entre $t=210s$ e $t=9000s$) há uma certa variação da mesma ao longo do leito, em decorrência do fato de que no início do processo o tijolo está uniformemente mais úmido e transfere com certa facilidade essa umidade ao ar que se encontra com umidade relativa baixa. Logo, o ar que chega ao final do leito já recebeu uma significativa quantidade de água e está mais úmido. Isto está em concordância com o fato de haver uma diminuição da temperatura do ar de secagem, conforme pode ser observado na Figura 4.7.

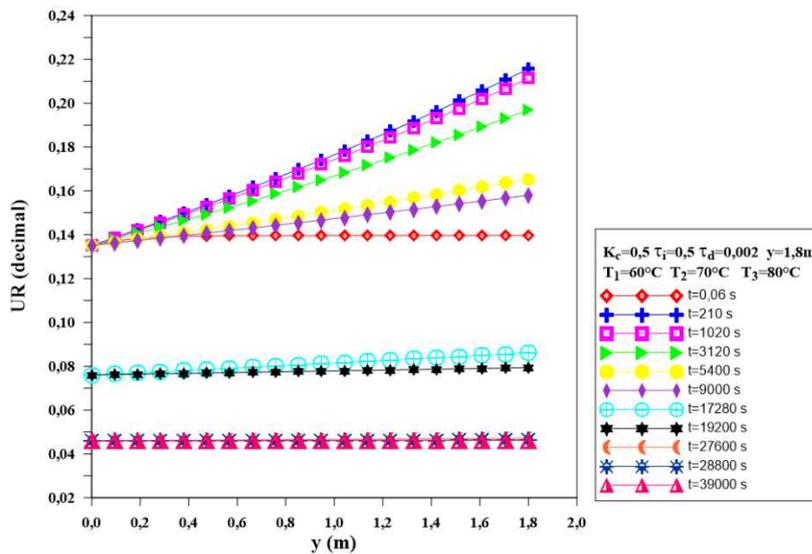


Figura 4.8 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4).

Na Figura 4.9 observa-se que ocorre uma notável variação na razão de umidade logo no início do leito, o que já era de se esperar. Isso se explica pelos mesmos motivos referentes à umidade relativa.

No que diz respeito à pressão de vapor saturado (Figura 4.10), tem-se uma pequena diminuição desta ao longo da posição no leito, devido à redução da temperatura do ar de secagem dentro do mesmo, gerada pelo fornecimento de energia ao produto para evaporar a água na superfície do tijolo.

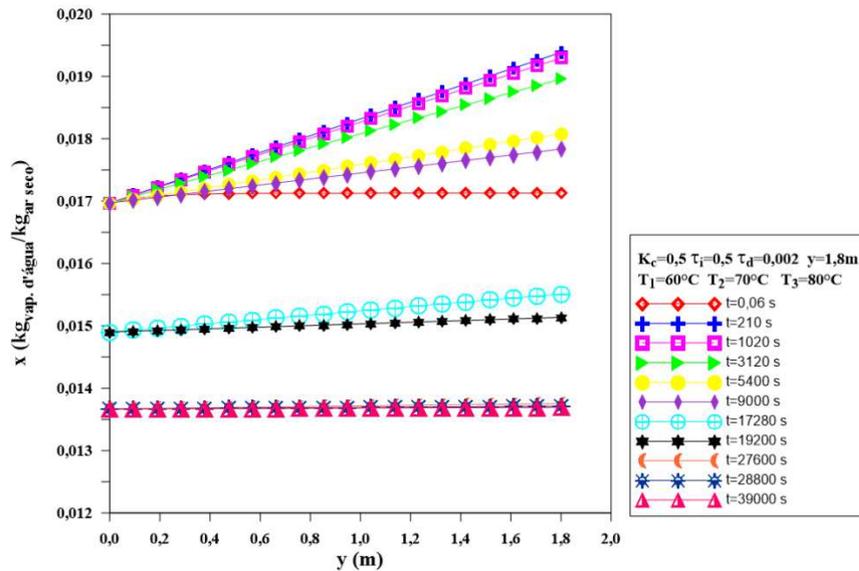


Figura 4.9 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4).

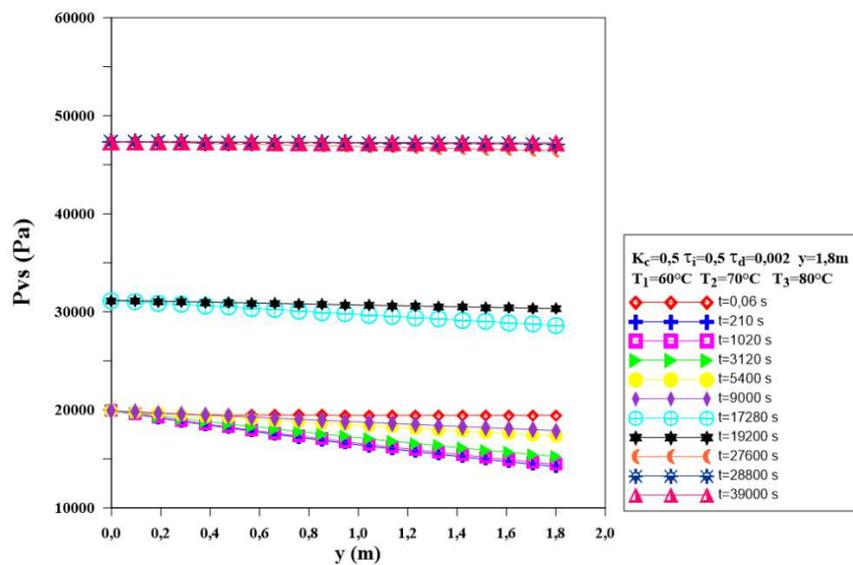


Figura 4.10 - Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado (Caso 4).

Apesar de existirem diversas técnicas para o ajuste dos coeficientes de sintonia do controlador reportados na literatura, a metodologia de ajuste utilizada neste trabalho foi manual. Uma vez que o código numérico elaborado está em concordância com o fenômeno físico,

passou-se a implementar os coeficientes de sintonia do controlador PID aplicado ao processo de controle do secador túnel de fluxo cruzado. O que inviabilizou a utilização de um método proposto na literatura para sintonia deste controlador foi o fato do problema ser do tipo parabólico no espaço e não do tipo elíptico (ver discussão no tópico 3.5.1 sobre o assunto). O problema aqui abordado marcha no espaço e não no tempo.

Gráficos do teor de umidade (\bar{M}), temperatura do produto ($\bar{\theta}$), temperatura do ar de secagem (T), umidade relativa (UR), razão de umidade (\tilde{x}) e pressão de vapor saturado (Pvs) em tempos diferentes ao longo do leito para os casos 1, 2 e 3 encontram se em anexo.

A seguir, na Tabela 4.3 são mostrados os parâmetros ótimos do controlador PID encontrados no processo de sintonia dos casos aqui estudados, para determinadas condições operacional.

Tabela 4.3 – Parâmetros da Equação (3.52) obtidos por tentativa e erro.

Caso	Parâmetros do controlador PID			$u_{p\ final}$ (m/s)	n° máximo de iterações
	K_c	τ_i	τ_d		
1	0,25	0,25	0,0012	0,00358131	59
2	0,25	0,25	0,0013	0,00229	93
3	0,25	0,25	0,002	0,00239658	57
4	0,5	0,5	0,002	0,00212131	17

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

De acordo com a análise dos 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 modelagem matemática do processo de secagem em secador de fluxo cruzado;
- Os resultados numéricos apresentaram 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 e umidades relativas mais baixas, a velocidade de secagem e aquecimento do tijolo se mostraram bem controladas, o que provavelmente diminui os riscos de defeitos no produto, mas tornam o tempo de processo mais elevado;
- 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 e mesmo nos casos onde se aumentou a espessura do leito em 50% ($y=1,8$ m) não foi suficiente para a saturação do ar de secagem.
- O ar, após o contato com o tijolo, ainda possui potencial para ser reutilizado em outro processo. Pois ainda apresenta umidades bem abaixo de 100% e temperaturas relativamente altas.
- As respostas físicas das variáveis de controle mostram que o controlador do tipo PID se adequa bem ao controle do secador tipo túnel de fluxo cruzado abordado neste estudo;
- A sintonia manual dos parâmetros do PID se mostrou eficaz para as condições de operação do secador;
- O parâmetro τ_d apresentou resultados fisicamente satisfatórios quando sua variação foi muito pequena. Para valores próximos dos parâmetros K_c e τ_i as simulações não foram satisfatórias.
- Os parâmetros $K_c = 0,5$; $\tau_i = 0,5$; $\tau_d = 0,002$ tornaram o processo de ajuste mais rápido mesmo tendo um aumento de 50% na espessura do leito (caso 4);
- Uma variação de 100% nos parâmetros proporcional e integral (caso 4 em relação ao caso 3) tornou a ação do controlador muito mais rápida.
- Os parâmetros proporcional e integrativo apresentaram melhores respostas quando considerados iguais.

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

Os resultados obtidos são imprescindíveis à proposta de redimensionamento do secador, economia de insumos, menos refugos, mais qualidade do produto, menor quantidade de

resíduos devido a defeitos nas etapas de secagem e/ou queima, refletindo assim em ganho produtivo para a empresa;

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros podem-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;
- Estudar a secagem em tijolos com outras dimensões e formas, e até mesmo outros produtos argilosos.
- Aplicar a modelagem do controle de outros tipos de secadores;
- Aplicar os parâmetros de sintonia para outras condições operacionais;
- Utilizar outra plataforma para simulação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAJO, M. F. **Manual sobre fabricación de baldosas, tejas y ladrillos**, Beralmar S. A., Terrassa, 2000, p.193-266.

ABCERAM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICA). **Cerâmica no Brasil: introdução**. Disponível em:< http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp >. Acesso: 14/05/2013.

ABCERAM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICA). **Informações Técnicas-Definição e Classificação**. Disponível em: <<http://abceram.org.br/definicao-e-classificacao>> Acesso: 09/02/2018

ALBERO, J. L. A. **A operação de prensagem: considerações técnicas e sua aplicação industrial - Parte I: O Preenchimento das cavidades do molde** - Instituto de Tecnologia Ceramica, Universidad de Valência – Cerâmica Industrial, 2000.

ALMEIDA, G. S. **Transferência de calor e massa em sólidos heterogêneos com geometria arbitrária: uma análise concentrada**. 2003. p. 52. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina grande.

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.

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T., *Automatic Tuning of PID Controllers*, Ed. Research Triangle Park, 1988.

ASTRÖM, K. J. e HÄGGLUND, T. **Revisiting the ziegler-nichols step response method for PID control**, *Journal of Process Control*, (2004) 14: 635-650.

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**, p.1061-1064, 1971.

BASSANEZI, R. C. Modeling as a teaching-learning strategy. For the learning of mathematics, **Vancouver**, v. 14, n. 2, p. 31-35,1994.

BASSANEZI, R. C. Modelagem Matemática. *Dynamis*, **Blumenau**, v. 2, n. 7, p. 55-83, abril/jun. 1994.

BASSANEZI, R. C. **Ensino-aprendizagem com Modelagem Matemática**. São Paulo: Ed. Contexto, 2004. 389 p.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. 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.

BAZANELLA, A.S.; GOMES DA SILVA JR, J.M. **Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto**, Editora da UFRGS, 2005.

BÊ-Á-BÁ DA CERÂMICA. Disponível em:

http://www.emic.com.br/artigos.php?id_artigo=129&categoria=tecnicos&lang=16. Acesso em (10/04/13) às hs:15:46.

BELLINGIERI, J. C. **A indústria cerâmica em São Paulo e a “invenção do filtro de água: um estudo sobre cerâmica Lamparelli” Jabotical (1920-1947)**. UNESP, Araraquara/SP, 2003.

BELLINGIERI, J. C. **As origens da Indústria Cerâmica em São Paulo**. Cerâmica Industrial. 2005.

BEKE, J.; VAS, A. **Testing the drying process of shelled corn on aspects of nutritional quality and thermal efficiency**. Drying Technology, Special Issue, v.5, p.1007-1027, 1994.

BELTRAN, V.; FERRANDO, E.; GARCÍA, J.; SÁNCHEZ, E. **Extruded Rustic Floor Tile I. Impact of the Composition on the Body's Behaviour in the Prefiring Process Stages**, Tile & Brick International, v. 11, n. 3, p. 169-176, 1995.

BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. São Paulo: Makron Books, 1995.

BUSTAMANTE, G. N.; BRESSIANI, J. C. **A Indústria cerâmica brasileira**. Cerâmica Industrial. 2000.

BRISTOT, V.M. **Máquinas e Equipamentos para Cerâmica**. 1.ed. Criciúma, Santa Catarina, 1996.

BRISTOT, V. M. **Controle De Temperatura de Secadores de Revestimentos Cerâmicos Alimentados com Gás Natural**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BROSNAN, D. A.; ROBINSON, G. C. **Introduction to drying of ceramics**. Ohio: The American Ceramic Society, 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.

BROSNAN, D. A.; ROBINSON, G. C. **Introduction to drying of ceramics**. Ohio: The American Ceramic Society, 2003.

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.

CAMPESTRINI, L. **Sintonia de Controladores PID Descentralizados Baseada no Método do Ponto Crítico**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal da Paraíba, Porto Alegre.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais**. 2ª ed. São Paulo, Blucher, 2010.

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.

CERÂMICA SALEMA. Blocos de Vedação. Disponível em:<<http://www.ceramicasalema.com.br/blocos-de-vedacao/>>. Acesso: 28/02/17 às 17:00 horas

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

COSTA, H. C. da. **Aplicação de Técnicas de Modelagem e Controle em Sistemas Tipo Ponte Rolante**. 2010. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro.

DUNN, W. C. **Fundamentos de instrumentação industrial e controle de processos**. Porto Alegre: Bookman, 2013, 326p.

EMILIANI, G.P.; CORBARA, F. **Tecnologia cerâmica**. Faenza: Editoriale Faenza Editrice, 1999, v.1.198p.

FACCIN, F. **Abordagem Inovadora no Projeto de Controladores PID**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Departamento de Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

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.

Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais – FIEMG. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Cerâmica Vermelha**. Belo Horizonte, 2013, 31p.

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.

FORTES, M. **Um estudo fundamental das equações de transporte de massa e energia em meios capilares porosos**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Térmica, Universidade Federal de Minas Gerais, 100 p. Tese (Livre Docência), 1982.

FORTUNA, A. O., **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**, EDUSP, São Paulo, 2000.

FRANK, H. **O Garimpo da Família Silvestre**. Disponível em: www.museumin.ufrgs.br/EspSilvestre.htm. Acesso em: 05/04/2013.

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.

GOODWIN, G. C.; GRAEBE, E.; SALGADO, M. E. *Control System Design*. Ed. Prentice Hall, 2000.

GUERRA, W. A. **Implementação de Controle Proporcional, Integral e Derivativo Digital em Controladores Lógico Programáveis**. 2009. Monografia (Especialização em Engenharia de Instrumentação). Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Connecticut: AVI publishing company, Inc. 1980 381p.

HARTKE, R. F. **Desenvolvimento de uma ferramenta para simulação de secadores contínuos utilizados na indústria cerâmica vermelha**. Relatório de Estágio Profissional em Engenharia Mecânica. Florianópolis: Abril, 2003.

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, p. 765–802, 1996.

JÚNIOR, F. G. F.; LOPES, J. S. B.; MAITELLI, A. L.; ARAÚJO, F. M. U.; OLIVEIRA, L. A. M. G. **Implementação De Controladores PID Utilizando Lógica Fuzzy E Instrumentação Industrial**. VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São Luís, 2005.

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.

MACEDO, R. S. MENEZES, R. R. NEVES, G. A. FERREIRA, H. C. **Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha**, Cerâmica, 2008, v. 54, p. 411-417.

MAYA, P.A.; LEONARDI, F.; **Controle Essencial**. Pearson, 2010.

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.

MILLER, C. P. **Determinação de Parâmetros Mecânicos e Modelagem Numérica em Alvenaria Estrutural de Blocos Cerâmicos da Indústria de Campos dos Goytacazes**, 2008. 161P. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

MISRA, M. K., BROOKER, D. B. **Thin-layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn**. Transaction of the ASAE, v.23, n.5, p.1254- 1260, 1980.

MOTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; JUNIOR, M. C. **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos**. Cerâmica Industrial, 2001.

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.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 3.Ed. Rio de Janeiro: LTC, c2002. 695 p. ISBN 8521613016.

NOVUS, **Controle PID Básico**, Artigo técnico 2003.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. trad. Paulo Alvaro Maya; rev. técn. Fabrizio Leonardi. 4.Ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OGATTA, K. **Discrete-time Control Systems**. Pearson, 1994.

OGATA, K. **Dicrete-Time Control Systems**. Prentice-Hall, 1987.

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.

OLIVEIRA, A.P.N., MONTEDO, O.R.K., PIZETE, J., CASAGRANDE, M., **“Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influência sobre as propriedades do produto final”**, *Cerâmica Informação*, n. 10, pp. 57-65, Julho/Agosto 2000.

OLLER, S. **Normas e princípios de extrusão de argila e comportamento na secagem**. *Cerâmica*. v. 27, n. 140, p. 319-329, 1981.

ORIGEM DA PALAVRA – SITE DE ETIMOLOGIA. **Controle**. Disponível em: <http://origemdapalavra.com.br/site/palavras/controler/>. Acessado em 12/07/2017

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 Corporation, 1980, 197 p.

PHILLIPS, C. L.; HARBOR, R. D. **Sistemas de controle e realimentação**. São Paulo ; Rio de Janeiro: Makron, c1997. 558 p. ISBN 8534605963.

PINTO, J. E. M. G. **Aplicação Prática do Método de Sintonia Controladores PID Utilizando o Método do Relé com Histerese**. 2014. 116 p. Dissertação (Mestrado em

Ciências). Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

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. 2013

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F.G. **Importância da Composição Granulométrica de Massas para Cerâmica Vermelha,** *Cerâmica Industrial.* v. 2, n.1/2, p. 31-35, 1997.

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.

RESFRIADORES E SECADORES DE LEITO DE FLUIDO. **Secador de Leito de Fluido (Estático).** Disponível em: <<http://www.gea.com/pt/products/fluid-bed-dryer.jsp>>. Acesso em 02/04/2017.

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

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.

SANTOS, G. M. **Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha.** 2001. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina – SC.

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

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.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. série mercado. **Cerâmica vermelha para construção: telhas, tijolos e tubos**. Setembro de 2008.

SECADOR INDUSTRIAL. **Secador Contínuo**. Disponível em: <
<http://secadorindustrial.com.br/secadores/secador-contínuo/>>. Acesso: 02/04/2017.

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.

SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. 2ª ed., São Paulo: Érica, 1999.

STRASSBURGER, M. A. **Implantação de um Controle Automático de Temperatura em Secadores Semi-Contínuos**, Medianeira: 2011. 35 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira.

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).

TAVARES, F.V.S., **Secagem Convectiva de Sólidos em Secador Tipo Túnel: Modelagem e Simulação**. 2013. 118 p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

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.

TWIDO PROGRAMMABLE CONTROLLERS. Software Reference Guide. Telemecanique, Version 3.2, 2005.

VERDUCH, A. G.; SOLANA, S.V. **Formação de Eflorescência na Superfície dos Tijolos. Cerâmica Industrial**. v.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**. 2003. Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) - RJ.

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, p. 42-46, 2003.

VOLTOLINI, A. R. Produção Brasileira de Pisos e Revestimentos Cerâmicos na Última Década. **Cerâmica Industrial**. 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.

<http://www.metallum.com.br/61cbc/us/index.php>

ANEXOS

```

Remove ["Global' *"]
(*PROGRAMA ESCRITO POR VOLUMES FINITOS*)
dup = 1 * 10^-5;
kk = 1;
kkmax = 60;
Mpo = 0.14795;
(*sup=0.00088;*)
up = 0.01;
Mset = 0.01;
Mmed = Mpo;
(*especificações de entrada do controlador*)
dt = 1; (*tempo*)
DESV = 0; (*desvio zero*)
DESV1 = 0; (*desvio um*)
DESV2 = 0; (*desvio dois*)
kc = 0.25; (*parâmetros*)
taui = 0.25; (*parâmetros*)
taud = 0.0012; (*parâmetros*)

While [Mmed > Mset && kk < kkmax,
  up = up - dup;
  npy = 20;
  npx = 1;
  H = 1.2;
  L = 73;
  tmax = L / up;
  t1max = tmax / 3;
  t2max = 2 * tmax / 3;
  (*dados de entrada do material*)

  Tpo = 20.5;
  rop = 1985.8;

  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, unidade absoluta dada pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
  (*ur; unidade 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, unidade absoluta dada pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
  (*ur; unidade 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, unidade absoluta dada pelo catt entrando com temp e ur pg. 110*)
  (*ur; unidade 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);*)
  (*
  *)

```

```

i = 1;
auxR = 22105.649.25;
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 = 101.325;
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 = waol;
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_EINSTEIN 13qualificacao";
dir = CreateDirectory[pasta];

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

  z = z + dz;
  t = z / up;
  ii = ii + 1;
  Do[
    Mpold[[j]] = Mp[[j]];
    Taold[[j]] = Ta[[j]];
    Tpold[[j]] = Tp[[j]];

```

```

xaold[[j]] = xa[[j]];
, (j, 1, npy)];
If[z < 24,
Ta[1] = Tao1;
xa[1] = xao1;
wa = wao1;
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;
];
(* *)

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 SEÇÃO 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*Mp0*((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);
Mpln = 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*Mp0*((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));
Fvsaux =
  auxR * Exp[(auxA + auxB * (Talin + 273.16) + auxC * (Talin + 273.16)^2 + auxD * (Talin + 273.16)^3 + auxE * (Talin + 273.16)^4) /
    (auxF * (Talin + 273.16) - auxG * (Talin + 273.16)^2)];
Uraux = xalin * Patm / ((xalin + 0.622) * Fvsaux);
(*
Print[Talin, " ", Uraux, " ", iterlin, " ", j, " ", ii];
*)
xalin = xalin - dxalin;

];

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

, {j, 2, npy}];
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 == 500 || ii == 1000 ||
ii == 1100 || ii == 1200 || ii == 1300 || ii == 1400 || ii == 1500 || ii == 1600 || 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 || ii == 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 == 7600 || ii == 7700 || ii == 7800 || ii == 7900 || ii == 8000 || ii == 8100 || ii == 8200 || ii == 8300 ||
ii == 8400 || ii == 8500 || ii == 8600 || ii == 8700 || ii == 8800 || ii == 8900 || ii == 9000 || 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 == 10400 || 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 == 12300 || 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 == 19000 || 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 == 56000 || 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 == 82000 || 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 == 112000 || ii == 114000 ||
ii == 116000 || ii == 118000 || ii == 120000 || ii == 122000 || ii == 124000 || 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 == 182000 || ii == 184000 ||
ii == 186000 || ii == 188000 || ii == 190000 || ii == 192000 || ii == 194000 || 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 == 230000 || ii == 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 == 258000 || ii == 260000 || ii == 262000 ||
ii == 264000 || ii == 266000 || ii == 268000 || ii == 270000 || ii == 272000 || ii == 274000 || ii == 276000 ||

```



```

Print[" "];
Print["      ", "t=", t, "s      ", "z=", z, "m", "      ", "ii=", ii, "      ", "kk=",
kk, "      ", "up=", up, "      ", "dup=", dup];
Print[" "];
Print["y(m)", MatrixForm[y], " ", "M(kg/kg)", MatrixForm[Mp], " ", "θ(oC)", MatrixForm[Tp], " ",
"x(kg/kg)", MatrixForm[xa], " ", "T(oC)", MatrixForm[Ta], " ", "Evs(Pa)", MatrixForm[Pvs], " ", "UR",
MatrixForm[Ur] ];
If[kk == 1,
dup = dup;
DESV1 = DESV;

.];
If[kk >= 2,
dup = dup;
DESV2 = DESV1;
DESV1 = DESV;

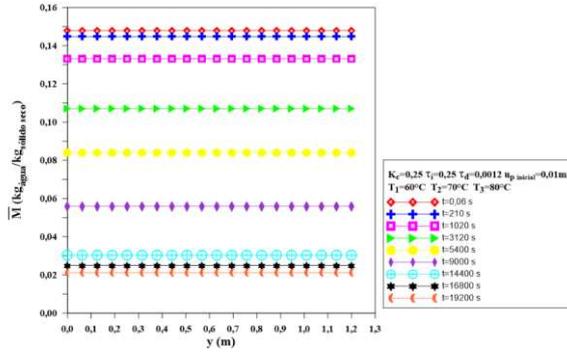
.];
Mmed = Sum[(Mp[[j]] / npy), {j, 1, npy}];
DESV = (Mmed - Mset);
If[kk > 3,
dup = kc * (DESV - DESV1) + (kc / tau) * ((DESV + DESV1) / 2) * dt + kc * taud * (DESV1 - 2 * DESV + DESV2) / dt;
(*
Print[kk, "      ", DESV1, "      ", DESV2, "      ", Mmed, "      ", Mset];
*)
.];

kk = kk + 1;

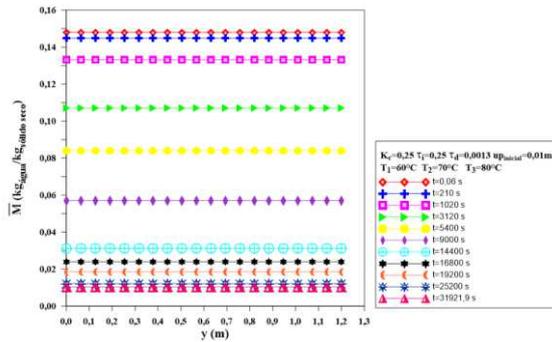
];

```

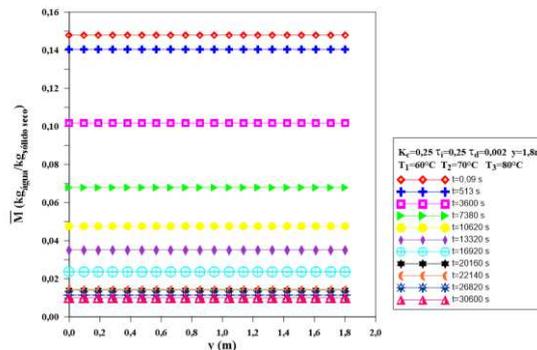
Nas Figuras a seguir, são mostrados, respectivamente, os valores do teor de umidade (\bar{M}), temperatura do produto ($\bar{\theta}$), temperatura do ar de secagem (T), umidade relativa (UR), razão de umidade (\bar{x}) e pressão de vapor saturado (Pvs) em tempos diferentes ao longo do leito para os casos 1, 2 e 3.



(a)

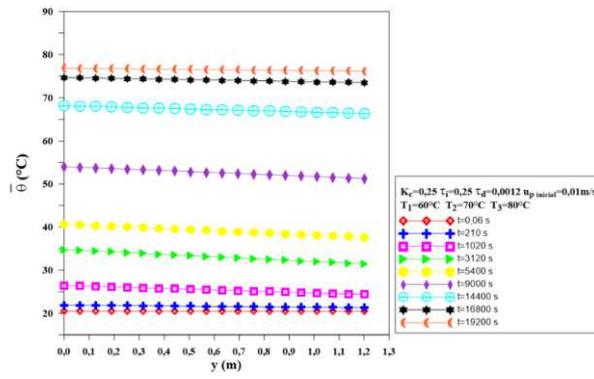


(b)

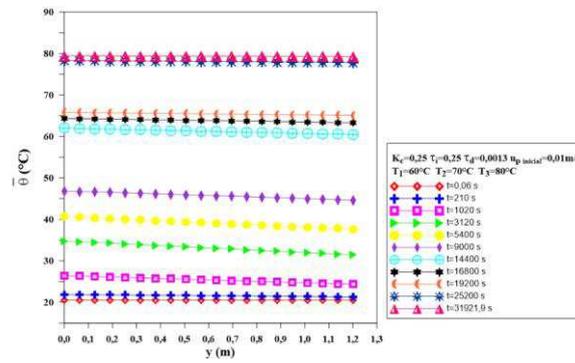


(c)

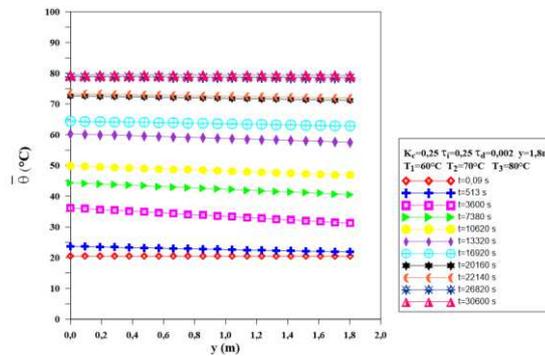
Figura A1 - Variação do teor de umidade ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado
a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.



(a)

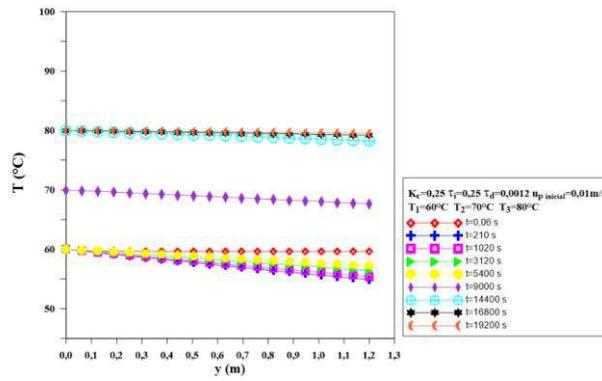


(b)

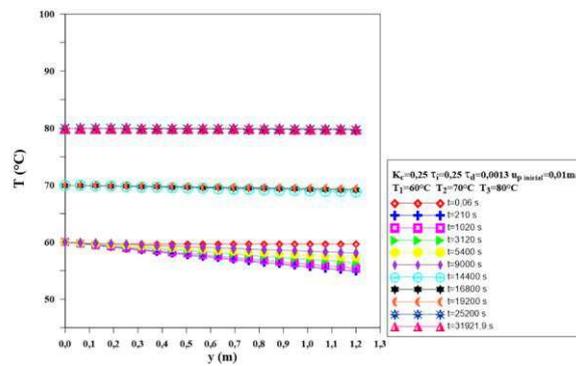


(c)

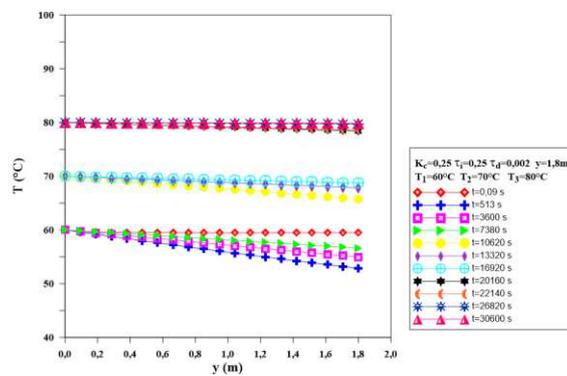
Figura A2 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.



(a)

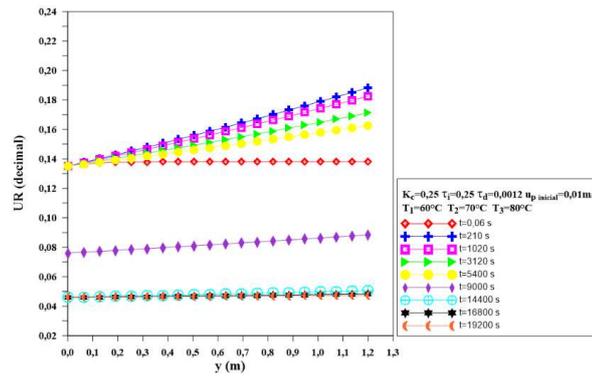


(b)

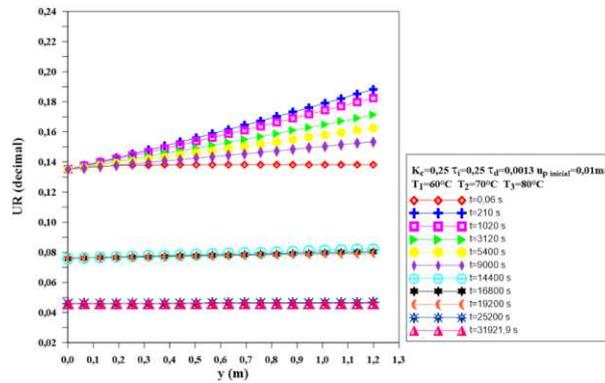


(c)

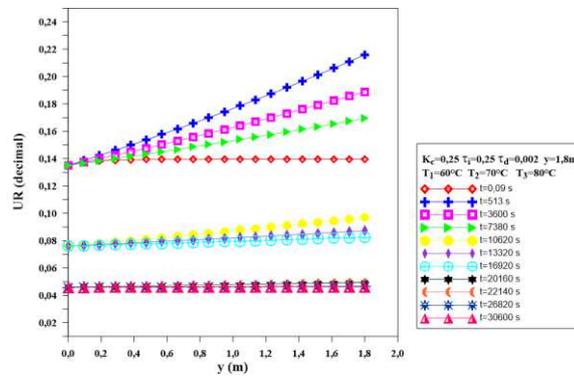
Figura A3 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado
a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.



(a)

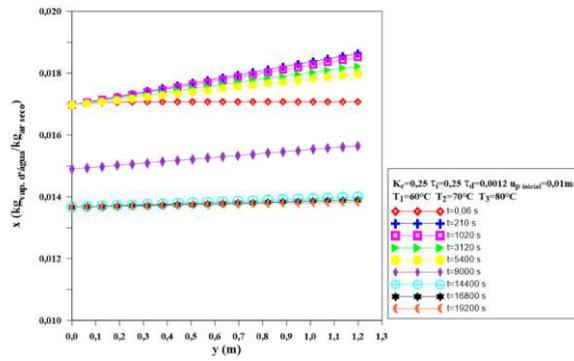


(b)

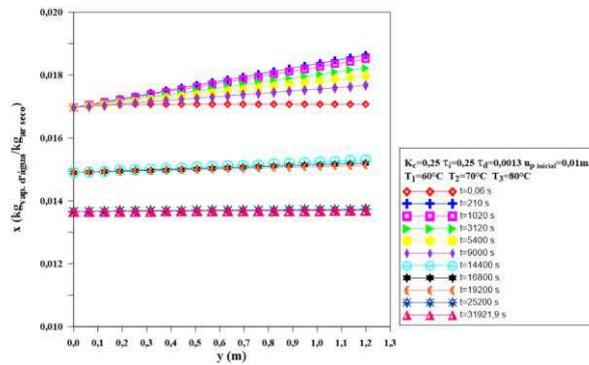


(c)

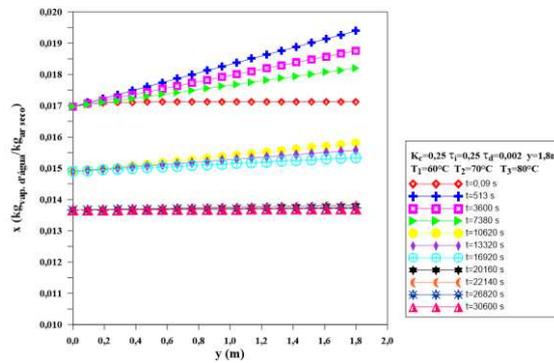
Figura A4 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.



(a)

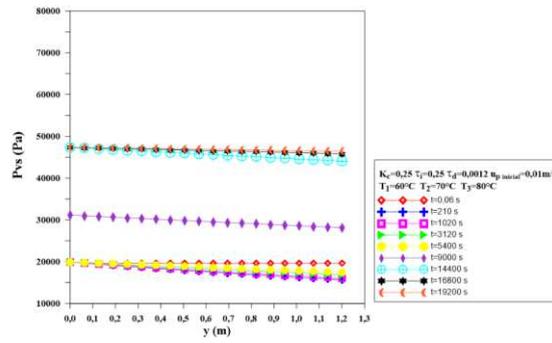


(b)

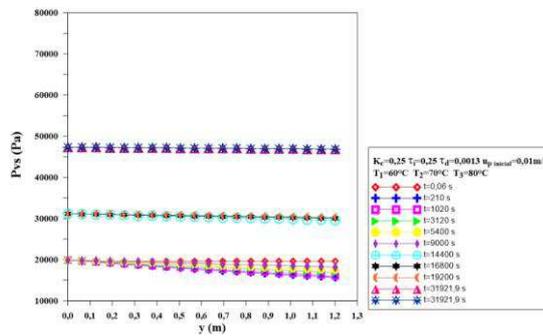


(c)

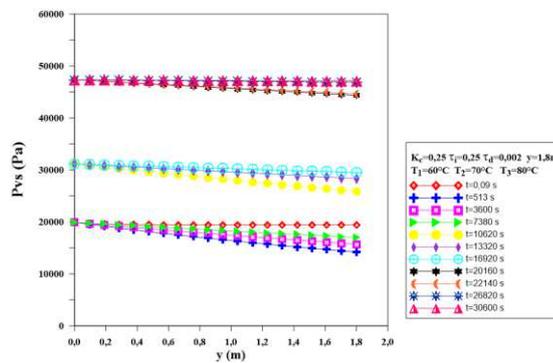
Figura A5 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito em diferentes tempos durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.



(a)



(b)



(c)

Figura A6 - 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 a) Caso 1, b) Caso 2, c) Caso 3.