

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA SECAGEM
DE CERÂMICA VERMELHA EM SISTEMAS
TÉRMICOS INDUSTRIAIS

AUTOR: Genival da Silva Almeida

ORIENTADORES: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande –PB, Abril de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DOUTORADO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS

SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO DA SECAGEM
DE CERÂMICA VERMELHA EM SISTEMAS
TÉRMICOS INDUSTRIAIS

Tese de Doutorado submetida à Coordenação do Curso de Doutorado em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Processos.

AUTOR: Genival da Silva Almeida

ORIENTADORES: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves

Campina Grande –PB, Abril de 2009



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

A447s

2009 Almeida, Genival da Silva.

Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais / Genival da Silva Almeida. — Campina Grande, 2009.

211 f.: il

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

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves.

1. Secagem. 2. Energia. 3. Exergia. 4. Experimental. 5. Numérico. 6. Tijolo Vazado. 7. Secador Industrial. I. Título.

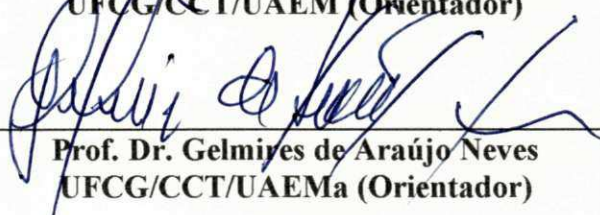
CDU – 66.047(043)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE **GENIVAL DA SILVA ALMEIDA** APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE.

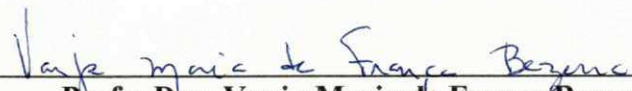
Tese de Doutorado **aprovada com distinção** em 30 de abril de 2009.




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




Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves
UFCG/CCT/UAEMa (Orientador)




Profa. Dra. Vanja Maria de França Bezerra
UFRN/CCT/DEQ (Examinadora Externa)



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
UEPB/CCT/DEQ (Examinador Externo)



Prof. Dr. José Jefferson da Silva Nascimento
UFCG/CCT/UAEM (Examinador Externo)



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva
UFCG/CCT/UAFA (Examinador Interno)

Campina Grande, 30 de abril de 2009.
PB – Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Genival da Silva Almeida e aprovada pela banca examinadora em 30 de abril de 2009.

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke, positioned above a horizontal line.

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

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu pai Numeriano Henrique de Almeida (in memorian) e a minha mãe Severina da Silva Almeida por estarem sempre dispostos a prestarem apoio incondicional nos momentos mais difíceis de minha vida.

À minha esposa Maria de Lourdes Cruz de Almeida (Lurdinha) e aos meus filhos Helder Newton Cruz de Almeida e Helber Henrique Cruz de Almeida, por compreenderem a minha ausência nos dias dedicados a este curso, acreditando sempre no meu sucesso.

Aos meus irmãos, José Assis Almeida da Silva, Natalício da Silva Almeida, Marielza da Silva Almeida, Antonio da Silva Almeida (in memorian), Givanildo da Silva Almeida e Genivaldo da Silva Almeida, que sempre se prestaram a ajudar nos momentos necessários e acreditaram em meu desempenho.

A toda minha família de uma forma geral, pela disposição em prestar qualquer ajuda, unidos em fé com Deus o onipotente.

AGRADECIMENTOS

À Deus, o criador, por nos conceder saúde, força e perseverança, essenciais para a conquista de meus objetivos.

À minha família por acreditarem sempre em nosso desempenho.

Ao meu orientador Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelos seus conhecimentos, sua experiência e sua eficácia na orientação dos trabalhos.

Ao meu amigo Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelo estímulo, dedicação e confiança nos momentos mais precisos.

Ao Professor Dr. Gelmires de Araújo Neves, que esteve sempre ao nosso dispor, oferecendo seus vastos conhecimentos, informações importantes e principalmente sua experiência na área de materiais cerâmicos.

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), pela concessão de uma bolsa de pós-graduação, essencial no alcance dos objetivos deste trabalho de pesquisa.

À Faculdade de Formação de Professores de Goiana-PE (FFPG), através da qual foram oferecidos os recursos necessários para o bom andamento dos trabalhos.

À Indústria de Cerâmica Cincera, localizada na cidade de Santa Rita-PB, pela atenção, o apoio e a disponibilização de suas instalações para os experimentos indispensáveis aos nossos estudos.

Ao diretor da empresa Cerâmica Cincera, localizada na cidade de Santa Rita-PB, o Sr. Telêmaco de Assunção Santiago Neto, pelo apoio necessário a realização dos experimentos efetuados naquela empresa.

Ao SINTEP (Sindicato dos Trabalhadores em Educação do Estado da Paraíba), em nome de seus diretores, pela estadia concedida no período destinado ao curso.

À Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade, pela confiança e por tudo que está nos oferecendo para a realização das atividades laboratoriais, metodológicas e de pesquisa, entre outras.

À Professora Dra. Odelsia Leonor Sanchez Alsina, pelos seus esforços em defesa do bom andamento dos trabalhos.

Aos professores e funcionários do curso de Engenharia Mecânica, pela dedicação providencial as atividades de nossos estudos.

Aos professores do curso de Engenharia de Processos, que através de seus conhecimentos nos proporcionaram informações indispensáveis para a conclusão do trabalho.

Ao nosso amigo, professor Dr. Wilton Pereira da Silva, pela sua ajuda constante e incondicional.

Ao meu amigo Joselito Barbosa da Silva, pelo seu apoio e sua participação nos momentos necessários.

Ao amigo Daniel Oliveira Avelino, Bolsista PIBIC/UFPG-CNPq, pela sua contribuição.

A todos os meus colegas de Engenharia Mecânica e Engenharia de Processos, que vem nos proporcionando incentivos, momentos de descontração, apoio, confiança e satisfação nesta caminhada.

Aos meus colegas de trabalho da Faculdade de Formação de Professores de Goiana-PE, pelo apoio e a compreensão nos momentos em que foi necessária minha ausência nesta instituição de ensino para dedicação a este curso.

Aos diretores da Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Dr. Antonio Batista Santiago, pela compreensão em minhas ausências nos momentos dedicados a esse trabalho.

Ao nosso amigo Sizenando Leal Cruz, pela sua disposição em atender as nossas necessidades.

Ao professor Emir Nunes da Silva (in memoriam) e à coordenadora Mônica Maria de Almeida, do Colégio Técnico Comercial Dom Bosco, por destinarem as instalações do colégio para nossos estudos.

Ao meu amigo, professor Antonio Azenildo de Araújo Ramos, que além da confiança em nosso trabalho, mostrou-se compreensivo e disposto a ajudar nos momentos cruciais.

Aos amigos, prof. Aristóteles Euflausino Ferreira e Elia Araujo da Silva, pelo apoio e confiança em nosso trabalho.

Aos amigos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

“O tempo não é uma corda que se possa medir nó-a-nó, o tempo é uma superfície oblíqua e ondulante que só a memória é capaz de fazer mover e aproximar.”

José Saramago

SUMÁRIO

1 Introdução	01
2 Revisão Bibliográfica	04
2.1 Materiais cerâmicos	04
2.1.1 Produção	04
2.1.2 Matérias-primas tradicionais	05
2.1.3 Caracterização das matérias - primas	05
2.1.4 Especificações da indústria de cerâmica vermelha	06
2.1.5 Classificação dos produtos cerâmicos quanto às matérias-primas	07
2.2 Argila	08
2.2.1 Propriedades da argila	08
2.2.2 Componentes	09
2.3 Etapas de fabricação de telhas e tijolos cerâmicos	12
2.4 Teoria e modelos de secagem	19
2.4.1 Mecanismos de transporte de umidade	19
2.4.2 Modelos de secagem	20
2.4.2.1 Modelos baseados no método de análise concentrada	20
2.4.2.2 Modelos baseados no método de análise distribuída	27
2.5 Processos de secagem em materiais cerâmicos	30
2.5.1 Informações gerais	30
2.5.2 Fases da secagem	35
2.5.3 Retração	38
2.5.4 Fissuras e descoloração	42
2.5.5 Suscetibilidade às fissuras de secagem	42

2.5.6 Estado da arte sobre secagem da matéria-prima para cerâmica vermelha	47
2.6 Secadores e fornos	51
2.6.1 Combustíveis	51
2.6.2 Tipos de fornos	54
2.6.2.1. Fornos intermitentes	54
2.6.2.2 Fornos contínuos	55
2.6.3 Balanços de energia e exergia nos fornos e secadores	56
2.6.3.1 Conservação de energia	56
2.6.3.2 Balanço de exergia	68
3 Metodologia	82
3.1 Metodologia experimental	82
3.1.1 Análise química e mineralógica	82
3.1.2 Experimentos de secagem em estufa	84
3.1.3 Experimentos de secagem em secador industrial	89
3.2 Metodologia numérica	92
3.2.1 Modelagem matemática	92
3.2.2 Solução numérica	103
3.2.3 Simulação da condensação de água	107
3.2.4 Análise energética e exergética do secador	109
3.2.4.1 Análise energética e transferência de massa	109
3.2.4.2 Análise exergética do processo de secagem	110
4 Resultados e discussões	113
4.1 Resultados experimentais	113
4.1.1 Caracterização da matéria-prima	113
4.1.1.1 Análise química	113
4.1.1.2 Análise mineralógica	114
4.1.1.3 Análise granulométrica	115
4.1.1.4 Análises térmicas	116
4.1.2 Secagem do tijolo	117

4.1.2.1 Secagem em estufa	117
4.1.2.2 secagem em secador industrial	126
4.2 Resultados simulados	130
4.2.1 Tratamento estatístico dos dados experimentais	130
4.2.2 Resultados obtidos com o simulador	131
4.2.3 Eficiências energética e exergética do secador	141
5 Conclusões e sugestões	144
5.1 Conclusões	144
5.2 Sugestões para futuros trabalhos	147
6 Referências	148
Anexos	168

RESUMO

ALMEIDA, Genival da Silva, *Simulação e Experimentação da Secagem de Cerâmica Vermelha em Sistemas Térmicos Industriais*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 211p. Tese (Doutorado).

Este trabalho tem como objetivo estudar teórica e experimentalmente a secagem de tijolos cerâmicos vazados em estufa e em secador industrial tipo túnel de fluxo cruzado, visando otimizar o processo de secagem. Um modelo matemático para descrever a transferência de calor e massa entre o ar e o produto que considera as propriedades termo-físicas variável, a porosidade do leito e a condensação do vapor de água no processo, é apresentado. A solução numérica das equações governantes é realizada usando o método dos volumes finitos. Foi desenvolvido um código computacional em linguagem do Mathematica®, para a obtenção dos dados numéricos. Para validar a metodologia numérica, foram realizados experimentos de secagem em tijolos cerâmicos vazados industriais, em estufa e em secador industrial tipo túnel. Resultados da temperatura, umidade absoluta e umidade relativa do ar, e do teor de umidade, dimensões e temperatura do sólido durante o processo de secagem e ao longo do secador, são analisados e comparados com os dados experimentais. Concluiu-se que a secagem com temperatura variável (50 à 100°C) e umidade relativa alta (70 à 85%), assegura tijolos com excelente qualidade, e que o secador industrial apresenta baixas eficiências, energética (5,8%) e exergética ($\approx 13,6\%$), alto consumo de energia para evaporar a água do produto e grande desperdício de energia contida no ar de exaustão evidenciando ser a secagem um processo altamente dissipativo. Para um tempo total de secagem de 8 a 10 horas no secador industrial, uma retração volumétrica, variando de 9,15 à 14,84%, foi obtida para o tijolo.

Palavras Chave: Secagem, energia, exergia, experimental, numérico, tijolo vazado, secador industrial.

ABSTRACT

ALMEIDA, Genival da Silva, *Simulation and Experimentation of Red Ceramics Drying in Industrial Thermal Systems*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 211p. Tese (Doutorado).

This work aims to study theoretical and experimentally the drying of holed ceramic bricks in oven and in an industrial tunnel dryer (cross-flow type). A mathematical model to describe heat and mass transfer between the air and product that considers variables thermophysical properties, porosity and condensation of water vapor in the process is presented. The numerical solution of governing equations is performed using the finite-volume method. A computational code in the Mathematica® language, to obtain the numerical data was developed. To validate the numerical methodology and to study the drying process, experiments were performed in oven and industrial tunnel dryer. Results of temperature, relative humidity and absolute humidity of the air and, moisture content, size and temperature of the solid during the drying process and along the dryer are analyzed and compared with experimental data. We conclude that drying with variable temperature (50 to 100°C) and high relative humidity (70 to 85%), ensures bricks with excellent quality, and that the industrial dryer presents low energy (5,8%) and exergy ($\approx 13,6\%$) efficiencies, high energy consumption to evaporate water from the product and a great loss of energy in the air exhaustion showing to be drying process highly dissipative. For a total drying time of 8 to 10 hours in the industrial dryer, the shrinkage of the brick has changed from 9.15 to 14.84%.

Keywords: Drying, energy, exergy, experimental, numerical, holed brick, industrial dryer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Fluxograma do processo produtivo de tijolos e telhas	13
Figura 2.2	Processo de extrusão de massa cerâmica	14
Figura 2.3	Prensagem uniaxial	16
Figura 2.4	Variação da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde provocada pela fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde	17
Figura 2.5	Esquema representativo do processo de secagem de material baseado numa análise concentrada	20
Figura 2.6	Gradiente de umidade na seção transversal da peça	34
Figura 2.7	Trincas na zona de maior retração	35
Figura 2.8	Fases da secagem: curva de secagem e diagrama de Scherwood	36
Figura 2.9	Fases da retração	38
Figura 2.10	Curva de Bigot: perda de água e retração	39
Figura 2.11	Variação da retração em função da água de conformação	41
Figura 2.12	Quociente da tensão superficial e viscosidade cinemática em função da temperatura	45
Figura 2.13	Tempo de secagem até a formação da primeira trinca em função da temperatura limite de resfriamento	47
Figura 2.14	Esquema de funcionamento de um forno túnel	55
Figura 2.15	Queimadores de gás natural, distribuídos ao longo da zona de queima	58
Figura 2.16	Instalação dos termopares na carga e vagão	59
Figura 2.17	Temperaturas da carga ao longo do forno túnel	60
Figura 3.1	Granulômetro a laser	83
Figura 3.2	Difratômetro de raio-X	84
Figura 3.3	Equipamento utilizado para as análises térmicas	84
Figura 3.4	Tijolo cerâmico utilizado no experimento	85
Figura 3.5	Paquímetro digital	86
Figura 3.6	Balança digital	87
Figura 3.7	Termômetro digital modelo TI-890	87
Figura 3.8	Termohigrômetro digital	87
Figura 3.9	Estufa com circulação de ar forçada	88
Figura 3.10	Posição das amostras na vagoneta utilizadas nos experimentos	90
Figura 3.11	Anemômetro de palhetas com leitura digital	90
Figura 3.12	Vagonetas usadas na secagem no secador industrial	91
Figura 3.13	Vista externa do secador industrial	91

Figura 3.14	Vista esquemática do secador industrial	93
Figura 3.15	Vista frontal e lateral da vagoneta	94
Figura 3.16	Vista angular da vagoneta	94
Figura 3.17	Vista superior e frontal das vagonetas	95
Figura 3.18	Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado	95
Figura 3.19	Volume infinitesimal de sólido na camada	96
Figura 3.20	Esquema do tijolo utilizado nos experimentos	99
Figura 3.21	Esquemática das condições iniciais e de contorno no secador	102
Figura 3.22	Esquema numérico e o volume de controle utilizado	104
Figura 4.1	Análise mineralógica via difratograma de raio x da amostra estudada	115
Figura 4.2	Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila	116
Figura 4.3	Curva termogravimétrica (TGA) e termodiferencial (DTA) da matéria-prima	117
Figura 4.4	Teor de umidade em função do tempo de secagem	118
Figura 4.5	Temperatura na superfície do tijolo (vértice) em função do tempo de secagem	118
Figura 4.6	Temperatura do ar de secagem no interior da estufa em função do tempo de secagem	120
Figura 4.7	Volume adimensional do tijolo em função do tempo de secagem	120
Figura 4.8	Volume adimensional do tijolo em função do teor de umidade em base seca para o experimento em estufa a uma temperatura variável	121
Figura 4.9	Teor de umidade médio em base seca e temperatura do tijolo em função do tempo de secagem	122
Figura 4.10	Variação volumétrica em função do teor de umidade médio em base seca para o experimento em estufa a temperatura constante de 100°C	123
Figura 4.11	Vistas da amostra utilizada nos experimentos em estufa com temperatura variável (t = 180 minutos)	124
Figura 4.12	Vistas da amostra submetida à secagem com temperatura constante de 100°C na estufa (t = 0 minuto)	125
Figura 4.13	Vistas da amostra submetida à secagem com temperatura constante de 100°C na estufa (t = 80 minutos)	125
Figura 4.14a	Vista da amostra submetida à secagem em estufa com temperatura constante de 100°C (t = 140 minutos)	126
Figura 4.14b	Vista da amostra submetida à secagem em estufa com temperatura constante de 100°C (t = 200 minutos)	126
Figura. 4.15	Vista da amostra 1 na saída do secador industrial	129
Figura. 4.16	Vista da amostra 2 na saída do secador industrial	129
Figura. 4.17	Vista da amostra 3 na saída do secador industrial	130
Figura 4.18	Comparação entre os teores de umidade obtidos na secagem em estufa e os obtidos via método de regressão não-linear	131
Figura 4.19	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade de tijolos cerâmicos vazados durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	133
Figura 4.20	Comparação entre os dados numéricos e experimentais da	

	temperatura de tijolos cerâmicos vazados durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	134
Figura 4.21	Teor de umidade do produto na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	135
Figura 4.22	Temperatura do produto na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	135
Figura 4.23	Umidade relativa do ar na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	136
Figura 4.24	Razão de umidade do ar na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	136
Figura 4.25	Pressão de vapor saturado na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	137
Figura 4.26	Variação do teor de umidade ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	138
Figura 4.27	Variação da temperatura do produto ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	138
Figura 4.28	Variação da temperatura do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	139
Figura 4.29	Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	139
Figura 4.30	Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	140
Figura 4.31	Variação da pressão de vapor saturado para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Classificação dos produtos (cerâmica vermelha) quanto às matérias-primas	07
Tabela 2.2	Modelos empíricos e semi-empíricos	27
Tabela 2.3	Teores de umidade para diferentes tipos de massas	40
Tabela 2.4	Consumo de combustíveis dos principais fornos empregados no setor de cerâmica vermelha	53
Tabela 3.1	Especificações do termômetro infravermelho	86
Tabela 4.1	Composição química da matéria-prima utilizada nos experimentos	114
Tabela 4.2	Distribuição de tamanho de partículas da matéria-prima estudada	115
Tabela 4.3	Parâmetros experimentais da secagem, do ar e do tijolo realizados na estufa	119
Tabela 4.4	Variação dimensional e volumétrica da amostra na estufa	119
Tabela 4.5	Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 1) obtida no secador industrial da Cerâmica Cincera	127
Tabela 4.6	Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 2) realizados no secador industrial da Cerâmica Cincera	127
Tabela 4.7	Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 3) realizados no secador industrial da Cerâmica Cincera	127
Tabela 4.8	Variação das dimensões da amostra 1 no secador industrial	128
Tabela 4.9	Variação das dimensões da amostra 2 no secador industrial	128
Tabela 4.10	Variação das dimensões da amostra 3 no secador industrial	128
Tabela 4.11	Parâmetros da equação 3.9, ajustado aos dados experimentais	130
Tabela 4.12	Parâmetros utilizados na simulação da secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado	132
Tabela 4.13	Eficiência energética média do secador industrial	141
Tabela 4.14	Eficiência exergetica média do secador industrial	142

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 variação de umidade	$[kg/kg]$
dT/dt	Taxa de variação de temperatura do produto	$[^{\circ}C/min]$
exp	Exponencial	$[-]$
ex^{ch}	Energia química	$[-]$
Ex	Exergia utilizada	$[-]$
Ex_d	Exergia desejada	$[-]$
Ex_p	Exergia utilizada no produto	$[-]$
Ex_i	Exergia na entrada do secador	$[-]$
En	Energia utilizada	$[-]$
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	$[m/s]$
m_p	massa do produto	$[g]$
\dot{m}_{ps}	Massa do produto seco	$[g]$
\dot{m}_{pi}	Massa do produto úmido	$[g]$
\dot{m}_{ai}	Fluxo de massa inicial do ar	$[g]$

\dot{m}_{af}	Fluxo de massa final do ar	[g]
M	Teor de umidade do produto	[kg/kg]
M_{∞}	Teor de umidade do meio externo	[kg/kg]
M''	Fluxo de massa por unidade de área	[kg/kg/s/m ²]
M'''	Geração de massa por unidade de volume	[kg/kg/s/m ³]
\bar{M}	Teor de umidade médio	[kg/kg]
\bar{M}^*	Teor de umidade médio adimensional	[-]
M_1^*	Teor de umidade adimensional do sólido 1	[-]
M_2^*	Teor de umidade adimensional do sólido 2	[-]
\bar{M}_{ant}	Teor de umidade médio anterior	[kg/kg]
M_o	Teor de umidade inicial do produto	[kg/kg]
\bar{M}_o	Teor de umidade médio inicial do produto	[kg/kg]
M_e	Teor de umidade de equilíbrio	[kg/kg]
\bar{M}_e	Teor de umidade médio de equilíbrio	[kg/kg]
P	Pressão	[Pa]
P_{vs}	Pressão do vapor saturado	[Pa]
P_{atm}	Pressão atmosférica	[Pa]
Q	Calor	[W]
\dot{Q}_{conv}	Fluxo de calor por convecção	[W]
\dot{Q}_{rad}	Fluxo de calor por radiação	[W]
\dot{Q}_{perdas}	Fluxo de calor perdido	[W]
\dot{Q}_{ef}	eficiência do fluxo de calor	[kJ/s]
q''	Fluxo de calor por unidade de área	[W/m ²]
q'''	Geração de calor por unidade de volume	[W/m ³]
q_{21}	Fluxo de calor	[W]
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]
S_g	Geração de entropia	[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]
\bar{T}	Temperatura do ar na saída do condensador	[°C]
\bar{T}_i	Temperatura do ar na entrada do condensador	[°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]
t_{rt}	Tempo de retenção do tijolo	[min]
t_{ra}	Tempo de retenção do ar	[min]
u_p	Velocidade do produto	[m/s]
UR	Umidade relativa	[%]

V	Volume do sólido	[m ³]
w	Velocidade do ar	[m/s]
x	Umidade absoluta	[kg/kg]
x _{af}	Umidade absoluta final	[kg/kg]
x _{ai}	Umidade absoluta do ar na entrada	[kg/kg]

Letras Gregas

α	Coefficiente de condutividade hidráulica	[-]
η	Eficiência energética do secador	[-]
η'	Rendimento da primeira lei, no sistema de aquecimento	[-]
ϵx	Eficiência exergetica	[-]
σ	Tensão superficial	[-]
μ	Viscosidade dinâmica da água	[-]
μ_m	Micrômetro	[-]
ϵ	Porosidade do produto	[-]
$\bar{\theta}_a$	Temperatura média do ar	[°C]
$\bar{\theta}_o$	Temperatura inicial do produto	[°C]
θ_1^*	Temperatura adimensional do sólido 1	[-]
θ_2^*	Temperatura adimensional do sólido 2	[-]
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]
Γ^ϕ	Propriedade do material	[-]
∇	Divergente	[-]

Superescritos

* Adimensional

Subscritos

ant	anterior
a	ar
c	Calor
conv	Convecção
e	Equilíbrio
m	Massa
o	Inicial
p	Produto
rad	Radiação

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Brasil, o setor industrial de produção em cerâmica vermelha, também chamada cerâmica estrutural, teve origem no século XVI nos estados da Bahia e Pernambuco, espalhando-se até os dias de hoje, por todos os estados, nas suas mais diversas formas e técnicas de fabricação. Essa atividade apresenta um grande atraso tecnológico característico em origem de pequenas e médias empresas distribuídas ao longo de todo país (Tapia et al., 2000). Conforme SEBRAE (2008), A ANICER (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) aponta que o mercado conta com cerca de 5.500 empresas entre cerâmicas e olarias, sendo responsável por mais de 400 mil empregos diretos, 1,25 milhões indiretos e gerando um faturamento anual de R\$ 6 bilhões (4,8% do faturamento da indústria da construção civil). Por outro lado, ainda segundo o SEBRAE (2008), a Associação Brasileira de Cerâmica (ABC) contabiliza, especificamente para a cerâmica vermelha, a existência de 11.000 empresas de pequeno porte distribuídas pelo País, empregando cerca de 300 mil pessoas, e gerando um faturamento da ordem de R\$ 2,8 bilhões. Esta vastidão é provocada além de outros motivos pelo baixo grau de conhecimento e investimento necessário ao início de atividades, apesar do crescimento de estudos voltados para esta área. As técnicas cerâmicas são bastante antigas, em torno de 400 a.C. para terra batida e 3000 a.C. para a terra cozida (Facincani, 1992).

Na região nordeste e principalmente no estado da Paraíba, verifica-se uma acentuada atividade industrial nessa área. Há, em todo o estado, cerca de 114 fábricas de produtos de cerâmica vermelha em atividade, distribuídas em pelo menos 30 municípios, oferecendo cerca de 2271 empregos diretos (SEBRAE, 2008).

O produto cerâmico, durante o seu processo de fabricação, passa pelas etapas de conformação, secagem e queima. A etapa de secagem da cerâmica vermelha tem uma importância relevante no processo de fabricação de materiais cerâmicos, uma vez que nesse processo, tem-se a eliminação da maior quantidade de água e conseqüentemente maior retração das peças (Lehmkuhl, 2004). Obviamente, a influência dessa etapa no produto cerâmico, depende de vários fatores que antecedem a secagem, tais como, propriedades químicas e mineralógicas do material, teor de umidade e granulometria.

Apesar de algumas empresas e estudiosos mostrarem-se empolgados com o avanço tecnológico no processo de fabricação de materiais cerâmicos, raramente são encontrados, no meio científico, trabalhos voltados para secagem de tijolos cerâmicos em caráter industrial.

A otimização do processo de secagem está diretamente ligado 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. 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 1^a 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 pela 2^a Lei da Termodinâmica (Kotas, 1985).

Diante do exposto, visando contribuir com esse avanço tecnológico, esse trabalho apresenta uma análise do funcionamento de um secador contínuo tipo túnel, os mais utilizados pela indústria cerâmica, devido a sua eficiência e agilidade. O trabalho apresenta dados numéricos e experimentais, obtidos através de uma análise criteriosa da secagem em um secador

industrial da indústria Cerâmica Cincera localizada no estado da Paraíba. Os resultados estão direcionados, principalmente, à economia de energia e à qualidade do tijolo cerâmico, favorecendo a diminuição dos custos da indústria e a aceitação do produto em escala comercial.

O objetivo geral deste trabalho é estudar numérica e experimentalmente a secagem de tijolos cerâmicos vazados industriais e oferecer às indústrias e/ou empresas que tenham interesse em otimizar o funcionamento de secadores industriais de tijolos cerâmicos, informações indispensáveis e raramente encontradas na literatura, no processo de secagem desse produto. O propósito é contribuir com o avanço tecnológico das indústrias cerâmicas na busca de economia de energia, priorizando a qualidade do produto final.

Especificamente, os seguintes objetivos são apresentados:

- caracterizar a argila e realizar experimentos de secagem de tijolos em estufa e em secador industrial;
- examinar o efeito da retração do material ao longo do secador em várias condições do processo;
- verificar o efeito da temperatura e umidade relativa do ar de secagem, a geometria do sólido na cinética de secagem e a qualidade do produto;
- modelar o processo de secagem de tijolos cerâmicos em um secador industrial tipo túnel, contínuo de fluxos cruzados;
- desenvolver um programa computacional para simular o processo de secagem para cerâmica vermelha;
- simular a distribuição de temperatura e umidade do produto (tijolo cerâmico vazado) e temperatura e umidade absoluta do ar no secador;
- comparar os resultados numéricos e experimentais do teor de umidade e temperatura dos tijolos, visando validar a modelagem matemática proposta;
- estudar energética e exergeticamente o secador visando a sua otimização.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais cerâmicos

As propriedades dos produtos cerâmicos são fundamentalmente determinadas pelas matérias primas e pela microestrutura final. Assim sendo, qualquer tentativa de controle das propriedades do produto, deve passar pelo entendimento e controle das propriedades básicas dos materiais, bem como do processo de fabricação (Neves, 1998).

2.1.1 Produção

Segundo Neves (1998), após a identificação dos pós-cerâmicos, deve haver uma seleção dos processos de conformação de maneira criteriosa, de modo que os compactos à verde possam ser sinterizados com eficiência e desenvolvam microestruturas que configurem as propriedades desejadas aos produtos finais. Pode-se usar a seguinte seqüência:

- a) Pó;
- b) Conformação;

- c) Secagem;
- d) Sinterização;
- e) Acabamento.

2.1.2 Matérias-primas tradicionais

As matérias-primas tradicionais usadas na indústria cerâmica são principalmente cristais inorgânicos, não-metálicos formados por processos geológicos complexos. Suas propriedades cerâmicas são freqüentemente determinadas pela estrutura cristalina e composição química dos seus constituintes essenciais, pela natureza e quantidade de minerais secundários presentes.

As características mineralógicas desses materiais e, portanto, suas propriedades cerâmicas estão sujeitas a grandes variações, dependendo do ambiente no qual o depósito mineral foi formado, assim como modificações químicas e físicas que tiveram lugar durante a formação geológica. Por isso, o conhecimento e conseqüentemente o controle do processo, a partir da matéria-prima, é de fundamental importância na obtenção das características desejadas no produto final (Macedo, 1997).

2.1.3 Caracterização das matérias-primas

Uma vez feita a classificação da argila, é de conveniência, e quando materialmente for possível, fazer a análise mineralógica para comparar com as argilas de referência.

Os ensaios compreendem:

- análises químicas, que possibilitam um estudo mais detalhado da matéria-prima a ser usada na produção da massa cerâmica;
- análise termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ATD), em que se monitora a diferença de temperatura e perda de massa de uma amostra de uma argila ao longo do processo, respectivamente;

- distribuição do tamanho de partículas e os valores de tamanho médio de partículas;
- difração de raios-x, onde se obtém como resultados as fases mineralógicas presentes na argila;
- microscopia eletrônica de varredura ou transmissão, onde se identificam os diferentes minerais presentes na argila.

2.1.4 Especificações da indústria de cerâmica vermelha

O setor de cerâmica vermelha, também chamada de cerâmica estrutural, é formado por um grande número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Embora algumas grandes empresas desponham no setor, o mesmo é caracterizado por um elevado número de pequenas e médias empresas, distribuídas ao longo de todo o país. Quanto ao nível tecnológico, algumas apresentam um elevado grau de aplicação do desenvolvimento tecnológico atingido pelo setor em todo o processo de produção, seja na preparação da matéria-prima, na fabricação das peças, na secagem ou na queima. Entretanto esta não é a regra geral, e muitas empresas ainda estão num estágio bastante primitivo quanto à modernização. Por representar um setor de grande importância na geração de empregos e na distribuição de renda, tem merecido a atenção de setores do governo, institutos de pesquisa, universidades e entidades diversas (Tapia et al., 2000).

Na produção de produtos cerâmicos, para a cerâmica vermelha, destaca-se:

- preparação de massa cerâmica com água;
- moldagem da massa cerâmica para fazer as peças;
- secagem apropriada;
- queima de acordo com as especificações ABNT EB-19, ABNT-EB-14, PMSP E-14;
- fabricação de tijolos de alvenaria e tijolos furados, telhas, ladrilhos e pisos.

2.1.5 Classificação dos produtos cerâmicos quanto às matérias-primas

Na indústria de cerâmica vermelha, a matéria-prima fundamental é a argila e a diversidade de sua origem pode causar variações no produto final. A principal característica da argila é sua plasticidade, o que permite a elaboração de variados formatos de peças com equipamentos relativamente simples (Sanches et al., 2002).

Segundo Sanches et al. (2002), as matérias-primas são geralmente especificadas pelos seguintes parâmetros:

- distribuição da composição de fases;
- distribuição de defeitos cristalinos;
- porosidade e estrutura dos poros;
- estrutura das partículas;
- tamanho de partícula;
- forma das partículas;
- densidade das partículas;
- densidade volumétrica;
- área da superfície específica.

Podem-se classificar os produtos e suas devidas matérias-primas conforme Tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 — Classificação dos produtos (cerâmica vermelha) quanto às matérias-primas.

Produtos	Matérias — Primas
Tijolos de alvenaria Tijolos furados Lages cerâmicas	Argilas plásticas em camadas mistas com matéria orgânica, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Material queimado entre 900 e 1000°C
Agregado leve	Argila + fudentes + óleo combustível. Material expandido entre 1050 e 1250°C

Fonte: Neves (1999)

2.2 Argila

A argila é um mineral natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade. Sob o ponto de vista físico-químico, as argilas podem ser consideradas como sistemas dispersos de minerais nos quais predominam partículas de diâmetro abaixo de 2 μm (Brown apud Andrade et al., 2005).

Do ponto de vista químico e mineralógico, as argilas são constituídas essencialmente por silicatos hidratados de alumínio, às vezes também de ferro e magnésio geralmente cristalinos, denominados argilominerais, ainda pode conter outros minerais, matéria orgânica e sais solúveis.

2.2.1 Propriedades da argila

As propriedades da argila são decorrentes de suas características intrínsecas, que são (Andrade, 2005):

- a) granulometria (elevado teor de partícula com granulometria inferior a 2 μm);
- b) composição química e mineralógica (argilominerais e impurezas presentes);
- c) capacidade de troca de cátions, resultante de substituições isomórficas no retículo cristalino dos argilominerais.

A argila é uma matéria-prima utilizada na fabricação de uma série de produtos cerâmicos. As razões para isto são suas principais propriedades que são: plasticidade, resistência mecânica, retração de secagem, queima e sinterização (Neves, 1998). A seguir, apresenta-se um pequeno detalhamento sobre cada uma delas:

- **plasticidade:** é a propriedade mais marcante das argilas, é versátil nos processos de conformação plástica;
- **resistência mecânica:** corpos formados a partir de argilas apresentam notável resistência mecânica à verde (corpo com umidade com que foram formados), a seco

(após eliminação da água com a secagem até 110°C) e após tratamento térmico em temperaturas adequadas (geralmente a partir de 800°C);

- **retração de secagem e pós-queima:** usualmente corpos feitos a partir de argilas sofrem redução de tamanho (retração ou contração) após secagem e queima. No caso de secagem, essa redução é consequência da eliminação da água utilizada na formação do corpo. Após a água ser eliminada, surge os vazios por ela deixados e ocorre uma aproximação das partículas em consequência das forças de atração eletrostática provocando o que se chama de aglomeração ou adensamento;
- **sinterização:** é um processo de adensamento de partículas sólidas com redução ou eliminação dos poros mediante tratamento térmico. Propriedades como absorção de água, porosidade e massa específica aparente estão relacionadas com a sinterização;

2.2.2 Componentes

Alguns componentes da argila, segundo Macedo (1997), destacam-se conforme suas principais características e aplicações. São eles:

- **argilas cauliniticas:** Caulinita é um dos argilominerais mais comum na crosta terrestre. Quando puro a caulinita tem baixa plasticidade e baixa resistência a cru. Apresenta cor branca, tem início de sinterização ao redor de 1250°C e funde ao redor de 1700°C. Por outro lado, entre 550°C e 650°C, perde água de constituição o que provoca a perda de massa e contração linear elevada.
- **quartzo (SiO₂):** É um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, sendo, portanto, normalmente encontrado em proporções variadas nas argilas. A distribuição granulométrica das partículas de quartzo tem influência decisiva sobre o desempenho dessas argilas, já que não sofre contração nem durante a secagem nem durante a queima. Apresenta as seguintes características:
 - a) reduz a plasticidade e contração;
 - b) reduz a resistência mecânica;

- c) produz uma textura mais aberta que permite a secagem correta e fácil liberação dos gases durante a queima.

O quartzo é uma das matérias-primas mais importante também para a indústria de cerâmica branca, tendo como principais usos:

- a) em materiais de revestimento;
 - b) no ajuste da viscosidade da fase líquida durante a queima;
 - c) na secagem e liberação dos gases durante a queima;
 - d) nas composições de vidros e vidrados.
- **feldspato:** Feldspato é um nome genérico que designa um grupo de minerais semelhantes. São silicatos de alumínio combinados com sódio, potássio ou cálcio e mais raramente bário. Esse nome inclui várias espécies minerais das quais as normalmente utilizadas são os feldspatos alcalinos do tipo:

Albita — $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$

Ortoclásio — KAlSi_3O_8

Anortita — $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$

O feldspato tem como principal característica a diminuição do ponto de fusão, além disso:

- a) aumenta o brilho;
- b) aumenta a resistência à abrasão;
- c) diminui a fluidez;
- d) diminui o coeficiente de dilatação;
- e) aumenta a resistência à solubilização;
- f) altera a cor nos vidrados coloridos.

Como aplicações de produtos a base de feldspato, pode-se citar:

- a) produtos de cerâmica branca;
 - b) porcelanas;
 - c) vidrados.
- **filitos cerâmicos:** trata-se de uma rocha metamórfica, composta de uma mistura de caulinita, mica moscovita finamente dividida ou sericita e quartzo em proporções variadas.

Como propriedades, pode-se citar:

- a) baixa plasticidade;
- b) baixa resistência à flexão a cru.

Como produtos a base de filitos cerâmicos, tem-se:

- a) grês sanitários – substituindo parte da fração de argilosa e do feldspato;
 - b) ladrilhos de piso;
 - c) azulejos;
 - d) alguns tipos de materiais refratários.
- **talco:** É um silicato hidratado de magnésio cuja fórmula é $3\text{MgO}_4\text{SiO}_2\text{H}_2\text{O}$.

Os produtos à base de talco podem ser usados:

- a) como constituinte principal (60% a 90%) em massa para fabricação de isoladores elétricos de alta frequência. Este tipo de corpo é conhecido como esteatita;
- b) na composição de massas cordieríticas, que tem como característica principal o baixo coeficiente de dilatação térmica;
- c) em quantidade de até 15% em massas de corpos porosos, para melhorar a resistência mecânica e reduzir as trincas, devido absorção de umidade;

- d) como fundente, substituindo parcialmente o feldspato em massas para fabricação de corpos semivítreos e vítreos;
- e) na composição de vidrados.

- **dolomita:** É o carbonato duplo de cálcio e magnésio, correspondendo a um teor teórico de 56% de carbonato de cálcio e 44% de carbonato de magnésio. A dolomita, além de outras aplicações, é utilizada na fabricação de materiais refratários.
- **calcita:** Aplica-se principalmente em massas calcárias com teores de umidade de até 30%. Apesar de proporcionar corpos de elevada porosidade e, portanto, baixa resistência mecânica, tem a vantagem de apresentar corpos de baixa contração linear com a queima, o que é conveniente para muitas aplicações na composição de vidrados e na fabricação de cimento aluminoso.

Os produtos de cerâmica vermelha, em geral, também são classificados em função do processo de fabricação utilizado, podendo ser extrudados ou prensados (Wittwer e Faria, 1997).

2.3 Etapas de fabricação de telhas e tijolos cerâmicos

A matéria-prima é transportada das jazidas para os galpões de estocagem, onde são dosados em função das características cerâmicas desejadas para o produto a ser trabalhado. A seguir, têm-se as descrições das principais etapas de fabricação de tijolos e telhas, acompanhadas da Figura 2.1, através de seu fluxograma (Wittwer e Faria, 1997; Mafra, 1999):

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.

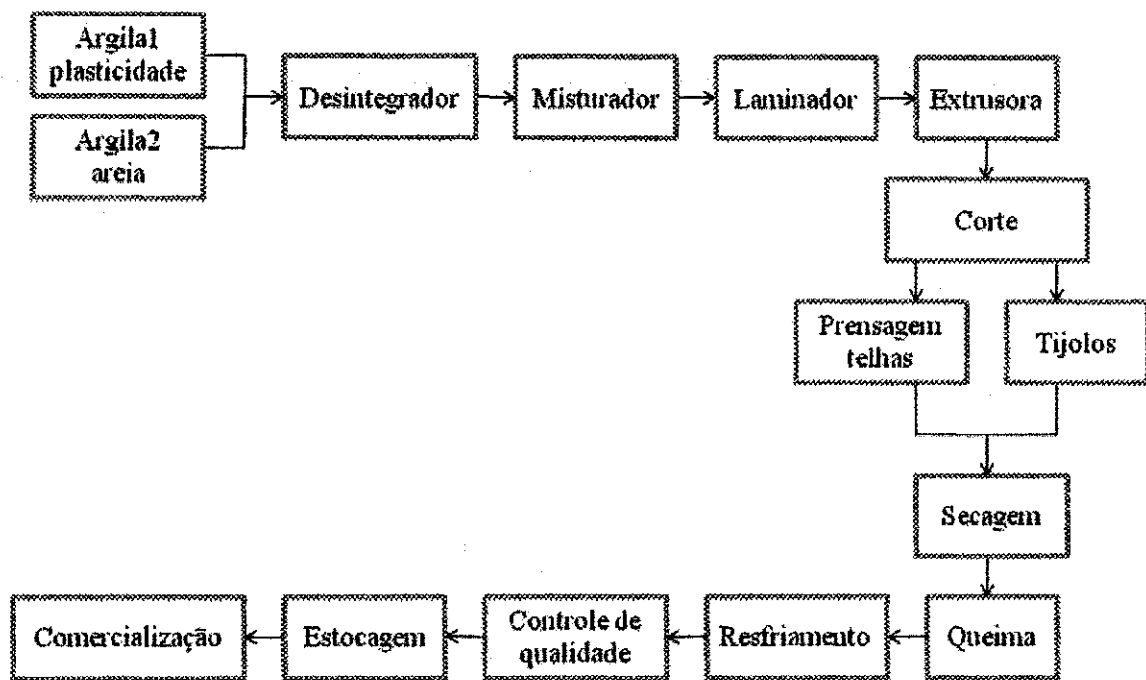


Figura 2.1 — Fluxograma do processo produtivo de tijolos e telhas. Fonte: Santos (2001).

misturador – depois da etapa do desintegrador, as matérias-primas são alimentadas num moedor/misturador, 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.

laminador – após o misturador, a massa cerâmica é alimentada nos laminadores, onde recebe um adensamento, eliminando as bolhas de ar, antes de ser levada as extrusoras. A laminação total da argila é obtida com velocidades diferentes nos cilindros laminadores.

extrusora – na extrusora, conhecida também como maromba, uma rosca interna, sem fim, impulsiona a massa, forçando-a a passar por uma chapa de aço perfurada, a mesma é lançada dentro de uma câmara de vácuo. Da câmara de vácuo, a massa é retirada por outra rosca sem fim, que a impele através de uma matriz de aço (boquilha), onde a massa recebe a forma desejada.

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 (Figura 2.2).

Para alguns produtos extrudados, tem-se:

- blocos de vedação (tijolos furados);
- blocos portantes, lajotões ou lajotas de pisos;
- lajotas para forro, dutos telefônicos;
- tubos cerâmicos sanitários (manilhas);
- tijolos maciços, tijolos estruturais.

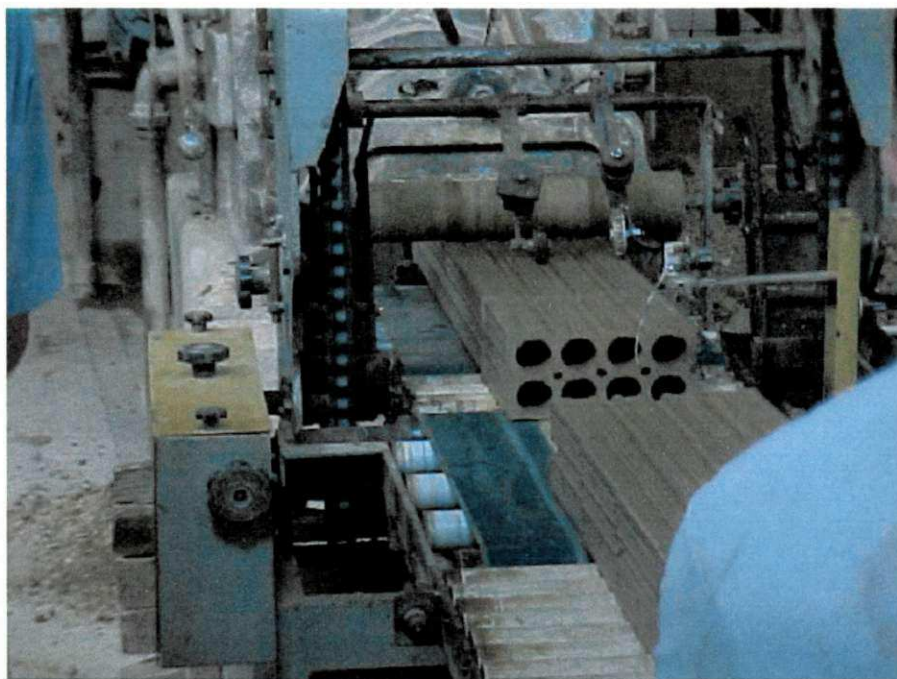


Figura 2.2 - Processo de extrusão de massa cerâmica. Fonte: Kawaguti (2004).

corte – A barra contínua de material extrudado é cortada manualmente ou automaticamente, com as dimensões requeridas logo após a saída da extrusora, tendo-se então o tijolo, a lajota, o tubo cerâmico, blocos e outros produtos de forma regular como no caso de alguns isoladores elétricos (Oliveira e Bernils, 2006).

prensagem – A prensagem tem por finalidade conformar a peça, dando-lhe resistência mecânica suficiente para suportar as diversas solicitações ao longo do processo produtivo, além de proporcionar peças uniformes, 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.

Este é o procedimento de conformação 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.

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 rígidos. 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 2.3), (Albero, 2000).

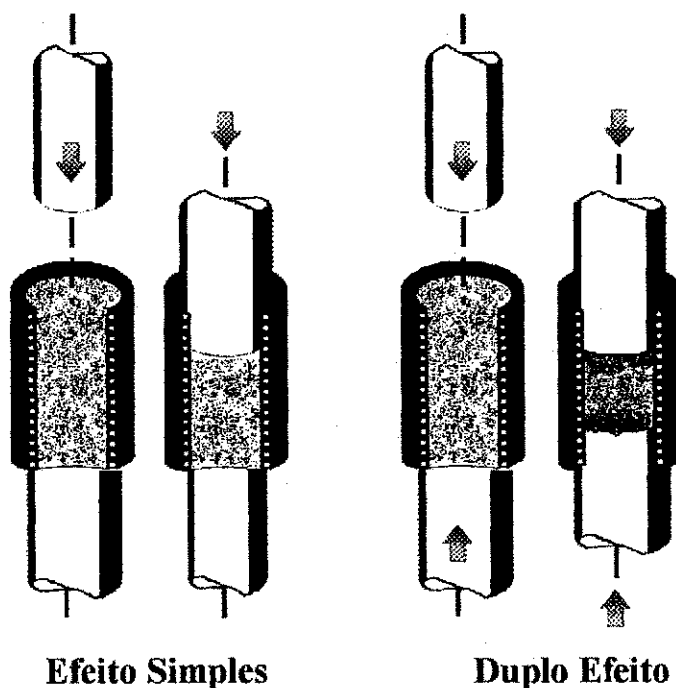


Figura 2.3 - Prensagem uniaxial. Fonte: Albero (2000).

A fricção entre as partículas do pó e também a fricção entre elas e a superfície do molde impedem que a pressão aplicada a uma ou mais superfícies da peça, seja integralmente transmitida e de forma uniforme a todas as regiões da peça, o que provoca a existência de gradientes de densidade e pressão nos corpos conformados (Figura 2.4).

Entre os produtos prensados, destaca-se:

- telhas;
- pisos;
- azulejos;

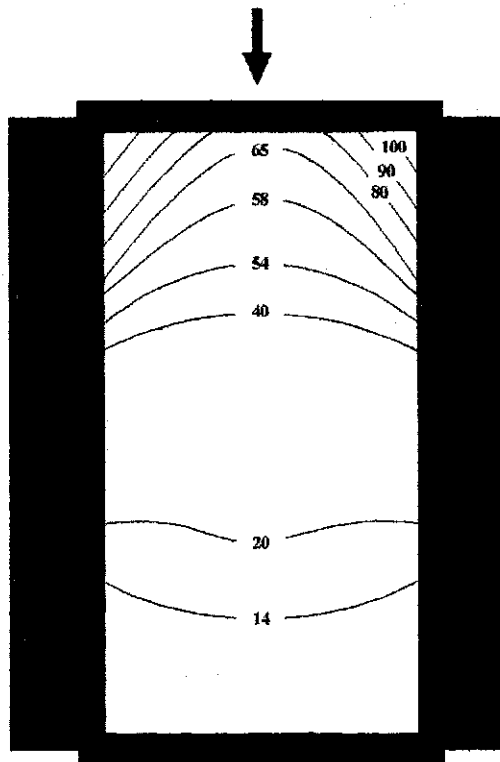


Figura 2.4 - Variação da pressão de prensagem aplicada nas regiões do molde provocada pela fricção entre as partículas e entre estas e as paredes do molde. Fonte: Alberio (2000).

A pressão de compactação apresenta variações significativas entre os formatos, tipos de estampas (ondulado, facetado), tipo de prensa e também de acordo com os testes durante a produção que indicam se está ocorrendo problemas no produto final, como por exemplo, elevada retração (excesso de compactação), ou problemas com baixa retração e resistência mecânica (compactação abaixo do normal).

As propriedades da peça queimada, assim como o desenvolvimento das etapas subsequentes, são muito influenciadas pela prensagem. Entre os defeitos mais comuns que os revestimentos apresentam devido às deficiências durante a operação de prensagem, pode-se citar: falta e excesso de compactação, falta de esquadros, curvaturas, trincas, defeito em cunha, sujeira no molde, rebarbas e furos.

Na fabricação de telhas, a barra maciça que sai da extrusora é cortada na dimensão requerida e conduzida para a prensagem, que ocorre em uma prensa rotativa.

secagem – depois que a massa cerâmica é extrudada ou prensada adquire a forma dos produtos desejados e estes são encaminhados para a secagem. O objetivo desta etapa é a redução do teor de umidade dos produtos de 18 a 20% após a extrusão ou prensagem, para 6 a 10% após a secagem. São empregado dois métodos de secagem, o natural ou o artificial. Vale ressaltar que: argila com menos água apresenta dificuldade para a moldagem e, água a mais dificulta a secagem e a queima, e provoca fissuras e refulgos exagerados. Posteriormente será apresentado um item específico sobre o tema.

queima – A etapa de queima é conduzida em equipamentos térmicos, denominados fornos, cuja concepção térmica mostra uma grande variedade. As operações de secagem e queima são as que consomem a maior parte do combustível utilizado, portanto, deve-se ter um estudo detalhado nestas etapas de funcionamento de fornos/secadores com vistas à otimização destes processos.

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.

A inspeção é somente visual. Algumas poucas empresas, entretanto, retiram amostras dos produtos para testes em laboratórios. O armazenamento dos produtos finais é feito, geralmente, em área coberta, para serem comercializados em seguida. Algumas empresas já estão adotando o sistema de embalagem em plásticos e colocação em pallets, o que facilita o carregamento e transporte dos produtos.

2.4 Teoria e modelos de secagem

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).

Além do transporte de calor e massa, pode-se citar outro fenômeno que ocorre durante o processo de secagem, trata-se da variação da dimensão do sólido (Rovedo et al., 1995a).

2.4.1 Mecanismos de transporte de umidade

Os seguintes mecanismos de transporte de umidade em sólidos têm sido propostos na literatura (Fortes e Okos, 1980; Strumillo e Kudra, 1986; Brooker et al., 1992; Lima, 1995):

- transporte por difusão líquida devido a gradientes de concentração de umidade;
- transporte por difusão de vapor devido a gradientes de concentração de umidade e de pressão parcial do vapor (devido a gradientes de temperatura);
- transporte por efusão, que ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor é da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros;
- transporte de vapor por termo-difusão devido a gradientes de temperatura;
- transporte de líquido por forças capilares;
- transporte de líquido por pressão osmótica;
- transporte de líquido devido à gravidade;
- transporte de líquido e de vapor, devido a diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- transporte por difusão superficial.

Neste sentido, apesar do não detalhamento de cada um destes mecanismos, informações adicionais podem ser encontradas nas referências anteriormente citadas.

2.4.2 Modelos de secagem

Numerosos modelos têm sido propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem de sólidos, podendo ser classificados em dois grupos:

- modelos baseados numa análise concentrada;
- modelos baseados numa análise distribuída.

2.4.2.1 Modelos baseados no método de análise concentrada

Para compreensão deste método, considere um sólido de forma arbitrária como ilustrado na Figura 2.5. O sólido pode receber (ou ceder) um fluxo de calor e/ou umidade por unidade de área em sua superfície e ter geração interna de massa e/ou energia por unidade de volume uniformemente distribuída, como por exemplo, durante a respiração e transpiração dos produtos biológicos (Lima, 1999).

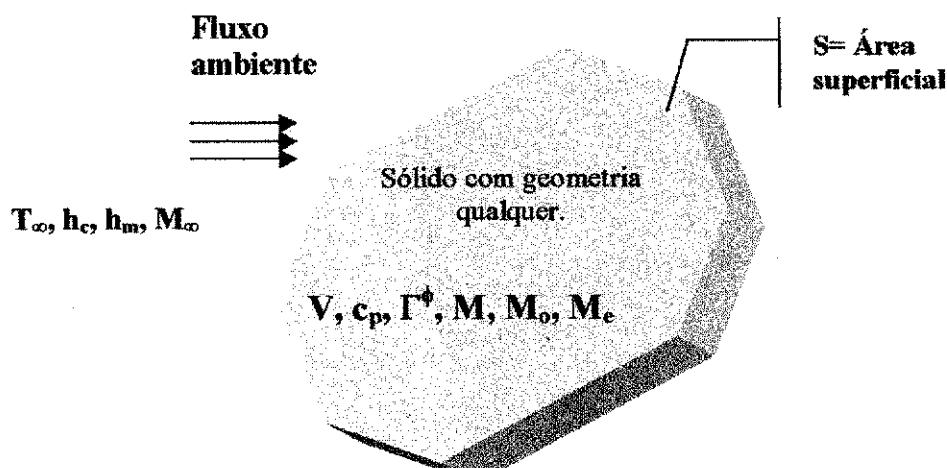


Figura 2.5 - Esquema representativo do processo de secagem de material baseado numa análise concentrada

Na Figura 2.5, T_∞ é a temperatura do meio externo (K) ou ($^{\circ}\text{C}$), h_c e h_m são os coeficientes de transferência de calor ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$) e massa (m/s), respectivamente, M_∞ é o teor de umidade do meio externo (kg/kg), V é o volume do sólido homogêneo (m^3), C_p é o calor específico (J/kgK), Γ^ϕ é a propriedade do material, M é o teor de umidade do produto (kg/kg), M_0 é o teor de umidade inicial do produto (kg/kg) e M_e é o teor de umidade de equilíbrio (kg/kg).

Admitindo que a umidade e/ou temperatura do sólido (θ) seja espacialmente uniforme em qualquer instante durante o processo transiente, isto é, que os gradientes de umidade e/ou temperatura no interior do sólido sejam desprezíveis, todo o fluxo de massa e/ou calor recebido e gerado, difundirá instantaneamente através do mesmo. Isto acontece quando Γ^ϕ (uma propriedade qualquer de transporte, por exemplo, a condutividade térmica ou o coeficiente de difusão de massa) for suficientemente alta ($\Gamma^\phi \rightarrow \infty$). Embora esta condição não seja fisicamente possível, ela será bem aproximada se a resistência aos fluxos de calor e/ou massa no interior do sólido for muito menor que a resistência à transferência de calor e/ou massa entre o sólido e a sua vizinhança.

Este método admite uma distribuição uniforme de umidade e/ou temperatura dentro do sólido em qualquer instante, de modo tal que, a temperatura ou teor de umidade do sólido possa ser expressa, exclusivamente em função do tempo, ou seja, $M = M(t)$ e $\theta = \theta(t)$.

Aplicando um balanço de massa e energia na superfície do sólido apresentado na Figura 2.5, em qualquer sistema de coordenadas, assumindo propriedades termo-físicas constantes e variações dimensionais desprezíveis, têm-se as seguintes equações para massa e energia, respectivamente:

$$V \frac{dM}{dt} = -M''S + M'''V \quad (2.1)$$

$$V\rho \frac{d\theta}{dt} = -\frac{q''}{c_p}S + \frac{q'''}{c_p}V \quad (2.2)$$

onde S representa a área superficial do sólido homogêneo (m^2), ρ a densidade do sólido homogêneo (kg/m^3), t o tempo (s), M'' o fluxo de massa por unidade de área ($kg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}/m^2$), M''' é o termo proveniente da geração de massa por unidade de volume ($kg \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}/m^3$), q'' o fluxo de calor por unidade de área (W/m^2), q''' a geração de calor por unidade de volume (W/m^3) e θ a temperatura do sólido homogêneo (K) ou ($^{\circ}C$).

As quantidades M'' , M''' , q'' e q''' , podem ser positivas ou negativas, podendo também, serem constantes ou dependentes do tempo. Particularmente com respeito à energia, a quantidade q'' pode ser convectiva, radiativa, evaporativa e/ou aquecimento de vapor. A hipótese de ausência de gradientes de θ ou M internamente ao sólido não é apenas uma simplificação matemática, mas também uma forma simplificada para tratamento de problemas mais complexos (mais realista fisicamente).

A presente formulação pode ser aplicada em regiões de transferência de calor e massa simultânea. O caso particular ocorre quando os dois fenômenos são completamente independentes. Os dois fenômenos são acoplados quando adsorção ou dessorção na região são acompanhadas de efeitos térmicos.

Num caso mais geral, se a temperatura ou teor de umidade na superfície de um sólido for alterado repentinamente, e o valor de Γ^{ϕ} não for suficientemente alto, então o valor do teor de umidade e/ou temperatura no interior do sólido varia com o tempo. Passa-se algum tempo antes que seja atingida a distribuição de M ou θ estacionárias. Como ambas variam de acordo com o tempo e com a posição, torna-se difícil, determinar tal distribuição.

Para se determinar a dependência da distribuição de M e/ou θ no interior do corpo em relação ao tempo, durante o processo, inicia-se pela resolução da forma apropriada da equação da difusão (Lei de Fick para massa e lei de Fourier para calor) (Gebhart, 1993).

Para condições em que os gradientes de M ou θ no interior do sólido são pequenos, pode-se empregar o procedimento do método da capacitância global, como mencionado.

- Validade do método da capacitância global (análise concentrada).

O significado físico do número de Biot de transferência é tido como a relação numérica entre a resistência de condução no interior do corpo e uma resistência à convecção na superfície do mesmo.

$$Bi = \frac{R_{Cond}}{R_{Conv}} = \frac{\left(\frac{L}{\Gamma^{\varphi}S}\right)}{\frac{1}{hS}} = \frac{hL}{\Gamma^{\varphi}} \quad (2.3)$$

onde L é um comprimento característico pré-determinado que pode variar com a geometria do corpo. Na Equação (2.3), R_{cond} é a resistência à condução e R_{conv} é a resistência à convecção.

O número de Biot tem um papel fundamental nos problemas de difusão que envolve efeitos convectivos nas fronteiras. Para $Bi \ll 1.0$, os resultados experimentais sugerem supor uma razoável distribuição uniforme de temperaturas e/ou massas ao longo do corpo, em qualquer instante t , do processo transiente. Logo a resistência de condutividade no interior do sólido é muito menor do que a resistência convectiva através da camada limite no fluido (Lima, 1999).

Para a análise de um problema de difusão, deve-se calcular o número de Biot e, uma vez sendo este inferior a 0.1, o erro associado à capacitância global é pequeno, entretanto, este valor é dependente da forma com que este parâmetro é definido (Lima, 1999; Lima e Nebra, 2000). Para se ter idéia, Parti (1993) reporta que os modelos empíricos e semi-empíricos podem ser utilizados desde que os números de Biot de transferência de massa e calor sejam menores que 10 e 1,5 respectivamente. Lima (1999), reporta os valores máximos de número de Biot de 0,05 para elipsóide ($L_2/L_1=2,0$) e de 0,005 para esfera ($L_2/L_1=1,0$), onde o comprimento característico L usado na Equação (2.3) é dado por $L = (L_2^2 - L_1^2)^{1/2}$ e L_2 e L_1 são os semi-eixos, maior e menor do elipsóide, respectivamente. Ressalta-se, portanto, que o valor do número de Biot depende da forma com que este é calculado (Lima, 1999).

a) Modelos empíricos e semi-empíricos

Os modelos empíricos, que são modelos baseados numa análise concentrada, consistem em uma relação direta entre o teor de umidade e o tempo de secagem. O modelo semi-empírico, por sua vez, baseia-se na validade da lei de Newton do resfriamento, assumindo uma proporcionalidade de diferença entre o teor de umidade do produto e o seu respectivo teor de umidade de equilíbrio (Lima, 1999).

O uso de modelos matemáticos para secagem em camada fina é muito comum, sendo usado por vários autores para o estudo de secagem de grãos e frutas. Tais trabalhos trazem na sua grande maioria estudos baseados na equação de Page, dada por:

$$\frac{\bar{M}^* - \bar{M}_e}{\bar{M}_0 - \bar{M}_e} = \text{Exp}(-k_1 t^{k_2}) \quad (2.4)$$

onde k_1 e k_2 são parâmetros da equação.

Particularmente, para corpos homogêneos com forma arbitrária, Lima (2001) e Silva (2002), apresentam uma modelagem matemática para descrever a transferência de calor e massa em sólidos homogêneos com forma arbitrária, baseando-se numa análise concentrada. As seguintes equações são fornecidas:

- Massa (teor de umidade)

$$\bar{M}^* = P^* + (1 - P^*) \text{Exp}(-S^* \text{Bi}_m \text{Fo}_m) \quad (2.5)$$

- Calor (temperatura)

$$\bar{\theta}^* = \left[\left(\frac{P^* - 1}{V^* - R^*} \right) + Q^* + 1 \right] \text{Exp}(-S^* \text{Bi}_c \text{Fo}_c) - \left(\frac{P^* - 1}{V^* - R^*} \right) \text{Exp}(-S^* \text{Bi}_m \text{Fo}_m) - Q^* \quad (2.6)$$

onde os parâmetros: $\bar{\theta}^*$ é a temperatura média adimensional do corpo; P^* relaciona a geração interna de massa com a perda de massa pela convecção; S^* mostra a influência da forma do corpo na cinética da secagem; V^* relaciona um certo fluxo de calor que entra no corpo com a energia necessária para evaporar todo o líquido do seu interior; Q^* representa a relação entre, o calor gerado no interior do sólido, um comprimento específico e a energia necessária para evaporar a água na superfície do sólido; R^* é a energia armazenada pelo sólido no início do processo necessária para evaporar toda a umidade (água) do corpo, Bi_c número de Biot de transferência de calor, Fo_c o número de Fourier de transferência de calor, Bi_m o número de Biot de transferência de massa e Fo_m o número de Fourier de transferência de massa.

De acordo com Almeida (2003), considerando-se um corpo heterogêneo, obtém-se uma melhor análise no processo de secagem, com resultados mais concretos e mais reais, para sistemas concentrados (número de Biot de transferência baixo), caracterizando uma secagem lenta.

Neste contexto, o seguinte modelo matemático é apresentado por Almeida (2003):

- Teor de umidade:

$$M_1^* = \left(\frac{b_2}{b_2 - b_1} \right) e^{b_1 t} + \left(\frac{-b_1}{b_2 - b_1} \right) e^{b_2 t} \quad (2.7)$$

$$M_2^* = \left(\frac{b_2}{b_2 - b_1} \right) \left(1 + \frac{b_1}{X_1} \right) e^{b_1 t} + \left(\frac{-b_1}{b_2 - b_1} \right) \left(1 + \frac{b_2}{X_1} \right) e^{b_2 t} \quad (2.8)$$

- Temperatura:

$$\theta_1^* = \frac{\{32B_1 e^{H_2 t} F_2 [(b_1^2 H_{10}) + b_1 (b_2^2 H_6 + b_2 H_1 H_6 + B_1 H_{11}) + B_1 b_2^2 H_{12}]\} - \theta_\infty}{\theta_0 - \theta_\infty} \quad (2.9)$$

$$\theta_2^* = \frac{\left[\theta_1 + \left(\frac{d\theta_1}{dt} \right) / B_1 \right] - \theta_\infty}{\theta_0 - \theta_\infty} \quad (2.10)$$

onde os valores das constantes são dados na referência citada.

Em vários processos industriais, equações empíricas foram propostas por alguns autores para descrever a secagem. No entanto, um número considerável de pesquisadores tem usado solução em séries da equação de difusão para calcular a cinética de secagem como segue:

$$\bar{M}^* = \sum_{i=1}^N A_i \exp^{-k_i t} \quad (2.11)$$

Os termos destas séries convergentes diminuem com um aumento de N e t. Varias aproximações e variações do modelo de difusividade foram usadas para prever a taxa de secagem de muitos sólidos. Porém, relativamente poucos estudos são relacionados a materiais cerâmicos. Neste sentido, foi proposta uma forma aproximada da Equação (2.11) quando apenas três termos das séries infinitas são usadas (Batista e Nascimento, 2007). Desta maneira, pode-se escrever:

$$\bar{M}^* = A_1 \exp^{-k_1 t} + A_2 \exp^{-k_2 t} + A_3 \exp^{-k_3 t} \quad (2.12)$$

onde A_i e K_i são constantes que são determinadas ajustando esta equação aos dados experimentais para cada condição de secagem.

Outros modelos podem ser encontrados na literatura sendo apresentados na Tabela 2.2 (Ozdemir e Devres, 1995; Yaldiz et al., 2001; Basunia e Abe, 2001), onde K_i e B_i são os coeficientes das equações e a_w é a atividade da água.

Tabela 2.2- Modelos empíricos e semi-empíricos.

Equação	Nome do Modelo
$\bar{M}^* = \text{Exp}(-k_1 t)$	de Newton
$\bar{M}^* = \text{Exp}(-k_1 t^{k_2})$	de Page
$\bar{M}^* = \text{Exp}(-(k_1 t)^{k_2})$	de Page modificado
$\bar{M}^* = B_1 \text{Exp}(-k_1 t)$	de Henderson e Pabis
$t = B_1 \ln(\bar{M}^*) + B_2 \ln(\bar{M}^*)^2$	de Thompson
$\bar{M}^* = B_1 \text{Exp}(-k_1 t) + B_2$	Logarítmico
$\bar{M}^* = B_1 \text{Exp}(-k_1 t) + B_2 \text{Exp}(-k_2 t)$	de dois termos
$\bar{M}^* = B_1 \text{Exp}(-k_1 t) + (1 - B_2) \text{Exp}(-k_2 B_1 t)$	de dois termos exponenciais
$\bar{M}^* = 1 + B_1 t + B_1 t^2$	de Wang e Singh

Fonte: Almeida (2003).

2.4.2.2 Modelos baseados no método de análise distribuída

a) Modelos difusivos

São modelos baseados na difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto, descrevendo as taxas de transferência de calor e massa como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem, considerando as resistências aos fluxos de calor e massa (Lima, 1999).

A secagem envolve o movimento da água do interior para a superfície do sólido por meio de mecanismos distintos. Vários autores têm proposto que o principal mecanismo de transporte de água seja a difusão líquida (Fortes e Okos, 1980; Geankoplis, 1983). A difusão ocorre nos sólidos de estrutura fina e nos capilares, nos poros e nos pequenos orifícios cheios de vapor. Contudo, a teoria de difusão não considera o encolhimento, apesar de estudos mais recentes incorporarem esse fenômeno (Barbosa e Cánovas, 2000).

Segundo Brooker et al. (1992), na teoria da difusão líquida, a segunda lei de Fick tem sido utilizada para estabelecer a difusão da água em função do gradiente de concentração:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.13)$$

em que M é o teor de água do produto, decimal (b.s.), D o coeficiente de difusão líquida e t o tempo.

Durante a modelagem e simulação dos processos de secagem de produtos agrícolas, diversos autores correlacionaram satisfatoriamente o coeficiente de difusão com os coeficientes dos modelos ajustados aos parâmetros de secagem, principalmente temperatura, umidade relativa e vazão do ar (Madamba et al., 1996; Afonso Júnior e Corrêa, 1999; Ozdemir e Devres, 1995; Azzouz et al., 2002, Mohapatra e Rao, 2005; Doymaz, 2005a; Doymaz, 2005b, Resende et al., 2005).

O mecanismo da difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Os dados disponíveis na literatura para o coeficiente de difusão apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção.

A concepção de difusão líquida como único mecanismo de transporte de umidade tem sido causa de várias discussões, apresentando constantemente discordâncias entre os valores

experimentais e teóricos, Berger apud Alvarenga et al. (1980); Fortes e Okos (1980); Mariz (1986); Keey (1992). Os principais questionamentos podem ser atribuídos à consideração do coeficiente de difusão constante, condições de contorno inadequadas e não consideração da ocorrência de encolhimento do material, conforme constatado por Lima (1999).

A solução analítica da equação de difusão de massa em coordenadas esféricas prolata considerando os coeficientes de difusão, constantes e condição de contorno convectiva, usando o método da separação de variáveis, são apresentados em Oliveira (2001). A metodologia é aplicada para prever o teor de umidade médio e a distribuição do teor de umidade, de um sólido esférico prolato (elipsóide de revolução), durante o processo de secagem.

O fenômeno físico do encolhimento ocorre simultaneamente com a perda de umidade do produto. Este fenômeno pode ocasionar um efeito considerável no coeficiente de difusão de massa, e conseqüentemente na taxa de secagem.

Apesar das discussões, a teoria da difusão líquida tem ganhado, ao longo do tempo, a preferência dos pesquisadores. Para frutas e grãos, podem-se citar os trabalhos de Brooker et al. (1974); Steffe e Singh (1980); Sokhansanj (1984); Dalpasquale et al. (1985); Parti (1990); Brooker et al. (1992); Zogzas e Maroulis (1996); Sarker et al. (1994); Queiroz (1994); Rovedo et al. (1995a); Ben Mabrouk e Belghith (1995); Alsina e Brasileiro (1997); Carmo, (2000); Oliveira (2001) e Farias (2002). Para materiais cerâmicos, cita-se Hasatani e Itaya (1992), Nascimento (2002), Cadé (2004), Lucena et al. (2005), Nascimento et al. (2005), Batista e Nascimento (2007), e Silva (2007).

b) Modelos baseados na termodinâmica dos processos irreversíveis

Baseiam-se na validade das relações recíprocas de Onsager, no princípio de Curie e na existência de um equilíbrio termodinâmico local no interior do produto.

Considerando os vários fluxos envolvidos em uma mistura de ar, vapor, líquido e sólido, Luikov (1966), guiando-se através de trabalhos anteriores de Prigogine (1947), DeGroot, (1951),

Luikov e Mikhailov (1965), tomou por base os princípios da termodinâmica de não-equilíbrio e sugeriu a utilização de um modelo para expor o processo de secagem de produtos capilares porosos baseados nos mecanismos de difusão, efusão, convecção de vapor e difusão e convecção de água no interior do meio poroso. O processo é descrito por um sistema de equações diferenciais parciais acopladas para a temperatura, umidade e pressão (em casos de secagem).

Outras discussões sobre estes dois modelos de secagem podem ser encontradas em Fortes e Okos (1980), Alvarenga et al. (1980), Fortes (1982), Parry (1985), Mariz (1986), Kee (1992), Parti (1993), Lima (1995), Lima (1999), Oliveira, (2001), Oliveira, (2006), Oliveira e Lima (2009), dentre outros.

2.5 Processos de secagem em materiais cerâmicos

2.5.1 Informações gerais

A secagem é uma etapa essencial da produção cerâmica, e que demanda uma grande quantidade de energia térmica para evaporar a água adicionada durante o processo de extrusão das peças. As relações existentes entre as etapas de extrusão, secagem e queima das peças são bastante complexas e quaisquer mudanças nestas etapas do processo produtivo afetam toda a seqüência da produção. No entanto, esta complexidade é muitas vezes negligenciada durante a produção e existem muito poucos estudos publicados sobre o tema.

O calor contido no ar quente é utilizado para aquecimento da massa de produtos a secar, da massa estática do secador, para evaporar a água de umidade dos produtos e compensar as perdas inevitáveis em todo o sistema. Entretanto, 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 a evaporação da água, a umidade pode vir a ficar presa no interior dos poros da argila. Isto ocorre quando a superfície da peça seca muito rapidamente e os poros ainda cheios de água, mas muito estreitos, não fornecem umidade a uma taxa compatível com a da evaporação. A parte seca da peça sofre então uma

contração, dificultando ainda mais a difusão da umidade do interior do poro para a superfície, o que limita assim a velocidade de secagem da argila. 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 (Hartke, 2004).

De acordo com Hartke, (2003), pode-se dizer, em termos gerais, que o processo ideal de secagem é dividido em quatro fases distintas: adaptação do produto ao ambiente ao qual é submetido, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial. Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura e pressão), nas quais será efetuada a secagem. Em seguida evapora a água coloidal e ocorrem variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação dos grãos da sua microestrutura. Ainda nesta fase a água constantemente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que então evapora, tomando 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.

Uma das regiões, no interior dos materiais, que está bastante relacionada com a secagem e a queima de produtos cerâmicos por compactação de pós são os poros. 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.

Conhecer sobre as propriedades do ar é de grande importância para se entender o fenômeno da secagem, particularmente em materiais cerâmicos. O ar atua como elemento

condutor de calor e transportador de vapor de água produzido. Para a água se evaporar, ela consome calor e assim passa do estado líquido para o estado de vapor. Esse consumo de energia faz com que a temperatura na superfície do corpo cerâmico diminua. O ar nas proximidades fica saturado de vapor d'água, e isso interrompe o processo de secagem. O ar aquecido circula pela peça, fornecendo calor à mesma, remove-se a umidade que a envolve dando continuidade ao processo de secagem. Temperaturas do ar de secagem elevada e umidades relativas baixas implicam numa secagem mais rápida do material. Este efeito é, por sua vez, mais acentuado que os gerados pelas relações área/volume e teor de umidade inicial (Batista, 2006).

O processo de secagem consome boa parte do combustível utilizado na fabricação dos produtos cerâmicos. Em geral esta etapa deve estar sincronizada com o processo de queima, evitando deficiência na qualidade do produto final e na sua produção. Curiosamente são poucos os trabalhos encontrados na literatura, dirigidos para o problema da secagem na indústria cerâmica, com ênfase, por exemplo, na secagem de peças extrudadas. Daí surge a necessidade de uma avaliação experimental das principais variáveis envolvidas nesse processo, que servirá como ferramenta de projetos e análises de secadores, buscando possíveis soluções para alguns problemas relacionados (Santos, 2001).

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 (Santos, 2001).

Para massa cerâmica, observa-se que a eficiência deste processo está ligada tanto às questões termodinâmicas quanto às questões morfológicas do meio poroso. As condições de secagem dos materiais cerâmicos são relativamente críticas quanto à integridade dos mesmos. A velocidade de secagem deve ser condicionada à velocidade do fenômeno da migração da água, que é relativamente lento. Isto visa evitar que a secagem superficial seja mais rápida e leve a fissuras na peça (Lehmkuhl, 2004).

A secagem natural se classifica como sem produtividade e processo demorado, que gera má qualidade nos produtos acabados. Já no processo artificial, a secagem é rápida, uniforme, programada, tem melhor custo benefício, ótima qualidade dos produtos acabados e redução de refugos. A principal fonte de calor para a secagem artificial é o reaproveitamento do ar proveniente dos fornos (ar de resfriamento) e também de geradores de calor auxiliar.

Em geral a secagem, seja ela natural ou artificial, requer grandes quantidades de ar para cumprir três funções básicas: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor de água produzido e a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça. Sob o aspecto termodinâmico, analisa-se a influência da temperatura e da umidade relativa do ar no processo. A umidade relativa do ar é uma relação entre a pressão parcial do vapor contido neste ar e a pressão de saturação do vapor na sua temperatura (Nicolau et al., 2004).

A pressão de saturação do vapor de água no ar aumenta com a temperatura e quanto mais distante estiver a pressão de saturação da pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver o vapor de água. Portanto, a capacidade do ar em absorver vapor de água cresce com a temperatura. Além disso, quando o ar está mais quente diminui-se o volume de ar necessário à secagem, reduzindo a potência dos exaustores e circuladores de ar, diminuindo-se os custos de secagem (Kawaguti, 2004).

A Figura 2.6 contém o perfil de umidade de uma peça verde (úmida), sujeita ao fluxo de ar em ambos os lados. A secagem começa no tempo ($t_i = 0$) com uma quantidade de água distribuída uniformemente no produto. Com a continuação do processo, a peça verde evidencia um perfil de umidade aproximadamente parabólico. O interior da peça contém um maior conteúdo de água em relação à área exterior. Isso significa que a retração progrediu mais externamente do que internamente. O exterior da peça tende a contrair-se, mas é impedido pelo interior. Conseqüentemente, ocorre tensão de compressão no interior e tensão de tração no exterior. A peça verde é muito mais sensível a tensões de tração do que as de compressão (Hartke, 2003; Kawaguti, 2004).

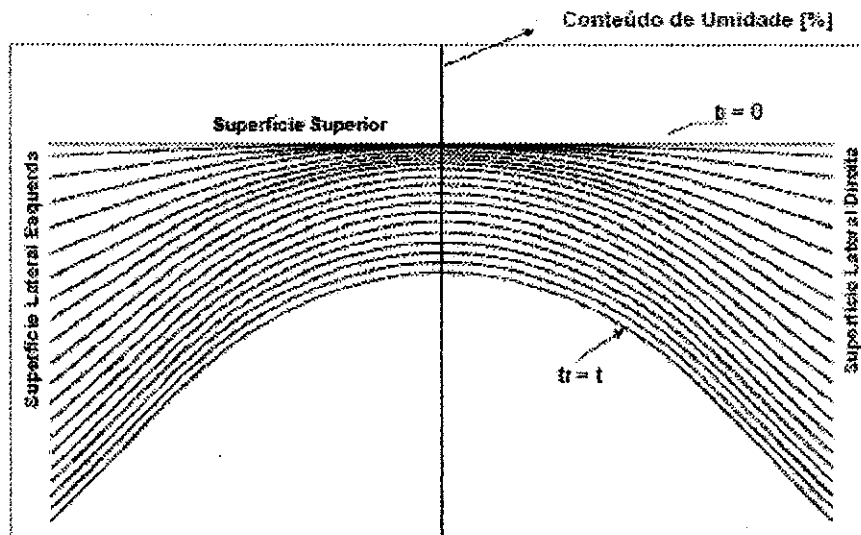


Figura 2.6 — Gradiente de umidade na seção transversal da peça. Fonte: Telljohann (2003).

Se as tensões ultrapassam o limite de resistência a ponto de não poderem ser absorvidas pelas forças de ligação da massa, as trincas de secagem ocorrem como indicado na Figura 2.7. Para evitá-las, portanto, é importante que o material apresente a menor diferença de umidade e temperatura possível.

De acordo com Lehmkuhl (2004), para materiais extrudados a quente, as temperaturas internas permanecem maiores do que aquelas da superfície até quase se atingir o teor de umidade crítico. Neste caso, os gradientes de umidade são notavelmente inferiores àqueles das peças extrudadas a frio.

Os tempos necessários para a secagem, em igualdade de temperatura, de umidade ambiente e de matéria-prima, são teoricamente proporcionais (Lehmkuhl, 2004):

- à espessura do produto, no primeiro estágio;
- à espessura elevada a uma potência próxima de dois, no segundo estágio.

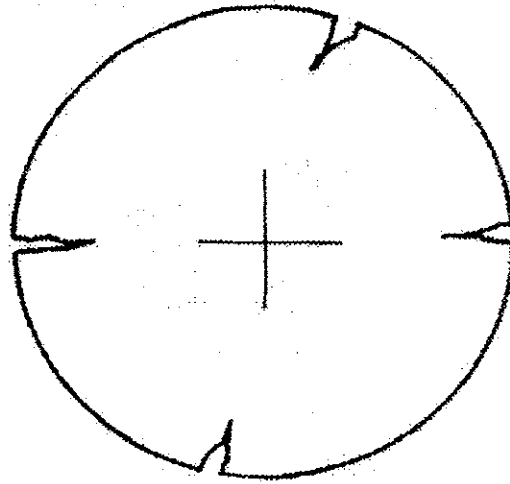


Figura 2.7 — Trincas na zona de maior retração. Fonte: Facincani (1992).

2.5.2 Fases da secagem

De um espelho de água livre que mantenha a sua extensão superficial em contato com um fluxo de ar à temperatura e umidade relativa constantes, evaporam quantidades iguais de líquido, em períodos iguais de tempo. O mesmo fenômeno se manifesta na superfície de uma peça extrudada à úmido, enquanto esta esteja molhada, mas os limites e o desenvolvimento do fenômeno são diferentes:

- se a evaporação ocorre muito lentamente, uma vez atingido um determinado teor de umidade (umidade crítica), se interrompe o fluxo de líquido do interior para a superfície, e cessa aí o regime constante de evaporação;
- se a evaporação superficial é acelerada além de certo limite, o fluxo de líquido para a superfície se interrompe, e o chamado teor de umidade crítico aumenta. Termina, então, o período de evaporação constante das camadas superficiais.

O teor de umidade crítica (ou ponto crítico) é o ponto a partir do qual a velocidade de evaporação decresce e as quantidades evaporadas se reduzem no tempo. Se o fenômeno ocorre com regularidade e sobre produtos de pequena espessura, a retração consequente à perda de água se efetua somente durante a primeira fase de secagem (Kawaguti, 2004).

Na primeira fase da secagem, o transporte interno de água ocorre graças a forças capilares. Se essas forças não forem mais suficientes para garantir esse transporte, a frente de evaporação considerada será a do interior da peça. Neste momento, a segunda fase da secagem inicia-se – esta fase não é correspondente com a segunda fase de retração. Então a velocidade de secagem sofre uma queda progressiva. Na terceira fase de secagem, a peça verde apresenta um comportamento higroscópico. O produto em secagem alcança um equilíbrio do teor de umidade correspondendo às condições climáticas externas.

A primeira fase de secagem é de grande importância. Mais de 60 % da umidade do produto é liberada nesta fase. Nesse período ocorre também retração, processo de grande interferência na qualidade da peça. As trincas não são causadas pela retração em si, mas graças às diferenças de retração. Em algumas ocasiões as trincas são causadas mais por baixa resistência mecânica do que por pequenas contrações. Supondo-se que a secagem efetua-se em condições exteriores constantes (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar), ela pode ser definida como mostra a Figura 2.8.

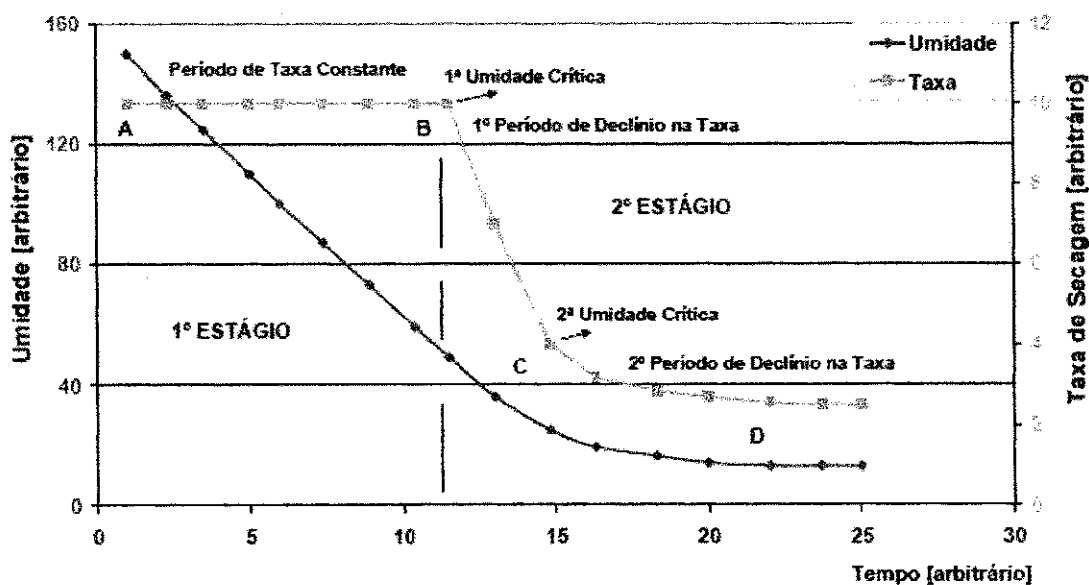


Figura 2.8 – Fases da secagem: Curva de secagem e diagrama de Scherwood. Fonte: Brosnan e Robinson (2003).

Em 1921, Bigot decreveu a secagem em três fases, após um período de indução, que é o período de adaptação do produto com as condições nas quais se efetuará a secagem, como segue:

1ª Fase (A-B): Diminuição de volume proporcional à água eliminada. A velocidade de secagem é constante. Nesta fase a resistência de convecção controla o processo. Ocorrem variações sensíveis nas dimensões da peça, devido à aproximação das partículas, pela saída da água coloidal. Nesta fase da secagem, a água migra até a superfície da peça, formando uma película e daí, é evaporada. Este período é dito constante porque, à medida que a água evapora, esta é repostada pela difusão do interior da peça. A velocidade com que a água de superfície do sólido é eliminada é igual à velocidade com que chega do interior do mesmo. Desta maneira a superfície do material mantém-se com umidade constante. A temperatura na interface é constante e o calor que chega é consumido integralmente para evaporar o líquido. Assim a velocidade de secagem é determinada pela velocidade de evaporação. O período de velocidade constante termina quando se atinge o ponto crítico, isto é, quando a peça começa a mudar de cor pelo desaparecimento do filme de água (Kawaguti, 2004). Durante o período de taxa de secagem constante, a temperatura do sólido permanece constante e igual a temperatura de bulbo úmido do ar.

2ª Fase (B-C): Esta fase é de pouca duração; ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Neste período da secagem, a quantidade de água que se desloca por capilaridade ou por difusão para a interface é cada vez menor em consequência da formação de vazios no interior da peça. A água evaporada decresce gradativamente, correspondendo a uma contração não proporcional. Durante o período de taxa de secagem decrescente, a temperatura do sólido aumenta gradativamente até atingir o equilíbrio térmico.

3ª Fase (C-D): Esta fase é caracterizada pela expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial. A velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero. Esta fase é controlada pela permeabilidade. A última fase da secagem nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos fornos de queima.

2.5.3 Retração

A Figura 2.9 mostra um esboço do comportamento de uma massa cerâmica no processo de secagem. No início da secagem, todas as partículas de argila da massa estão cercadas de água por todos os lados. Com a liberação da água, as partículas aproximam-se e a massa retrai. Na primeira fase da retração, a variação do volume do produto úmido é proporcional ao decréscimo do volume de água. No decorrer da secagem, as partículas aproximam-se progressivamente até, finalmente, encostarem-se (Lehmkuhl, 2004).

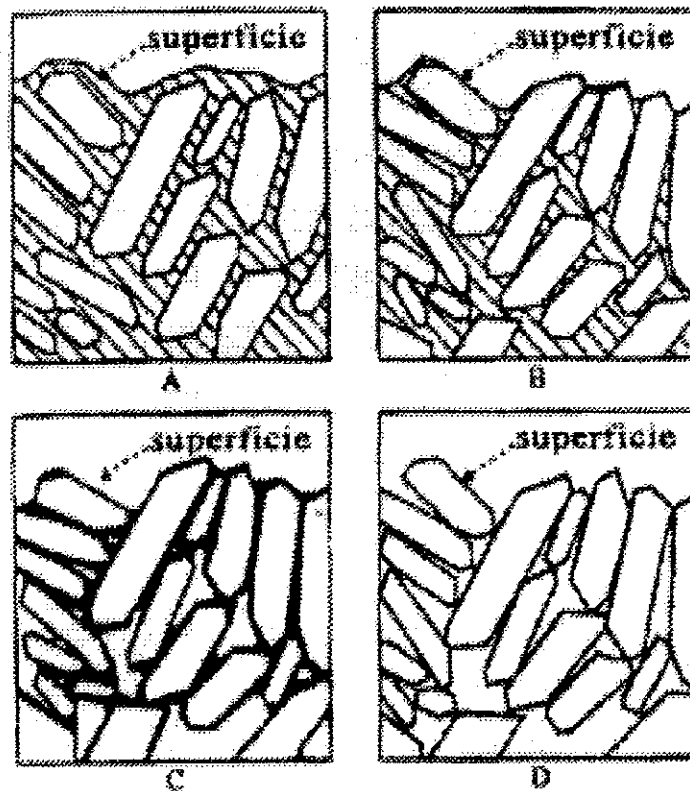


Figura 2.9 – Fases da retração. Fonte: Lehmkuhl (2004).

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. A relação existente entre a

perda de água de uma massa e sua retração é evidenciada pela Figura 2.10 denominada curva de Bigot (Oller, 1981; Abajo, 2000; Vieira et al., 2003). Nele são visíveis três zonas bem definidas (Lehmkuhl, 2004):

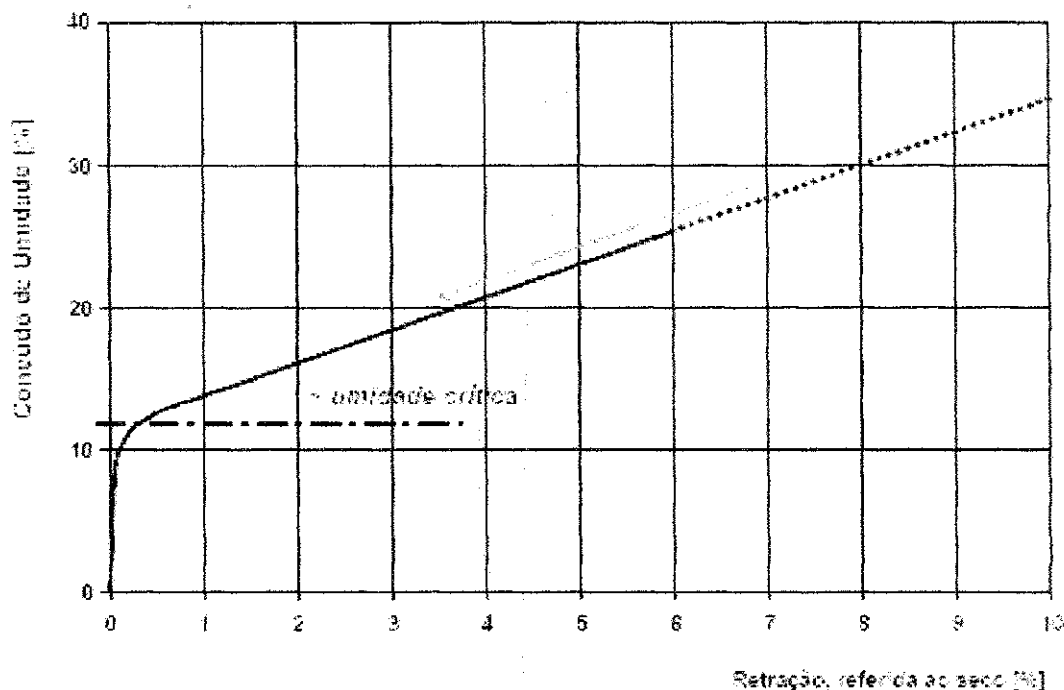


Figura 2.10 — Curva de Bigot: perda de água e retração. Fonte: Facincani (1992).

1ª) Teores mais elevados de umidade, na qual se nota uma estreita proporcionalidade entre o percentual de água evaporada e o percentual de retração linear (a retração linear, teoricamente, é igual à raiz cúbica da retração volumétrica), ambas referida às condições finais de secagem. A água perdida é denominada de água de retração. Neste campo é possível avaliar rigorosamente que valores assumiriam a retração ao variarem-se às quantidades de água de conformação para uma determinada matéria-prima (parte tracejada da Figura 2.10);

2ª) Teores intermediários de água, as perdas de água continuam, mas a retração decresce rapidamente;

3ª) com teores mais baixos de umidade, a água pode ser evaporada, e a retração se modifica muito lentamente (água de porosidade).

Na Tabela 2.3, tem-se intervalos característicos nos teores de umidade para os três tipos de massa diferentes.

Tabela 2.3 – Teores de umidade para diferentes tipos de massas.

Tipos de massas	%H ₂ O conformação	%H ₂ O ponto crítico
Pouco plástica e granulometria grossa	17-22	8-12
Meio plástica e de granulometria fina	22-28	8-13
Muito plástica e de granulometria finíssima	26-34	10-16

Fonte: Facincani (1992)

Vieira et al. (2003) apresenta em seu trabalho uma avaliação das etapas de secagem de cerâmica vermelha, através da curva de Bigot (Figura 2.11). Nesse estudo, usa-se uma massa cerâmica industrial para fabricação de tijolos aparentes (maciços), composta pela mistura de três argilas plásticas cauliníticas e areia quartzosa. Esse estudo oferece informações relacionadas a influência da adição de areia na redução de água na massa e conseqüentemente a redução da retração linear dada em função do teor de umidade (curva de Bigot). De acordo com Vieira et al. (2003), a curva de Bigot (Figura 2.11) descreve a evolução da retração de secagem em função da perda de água de conformação. 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.

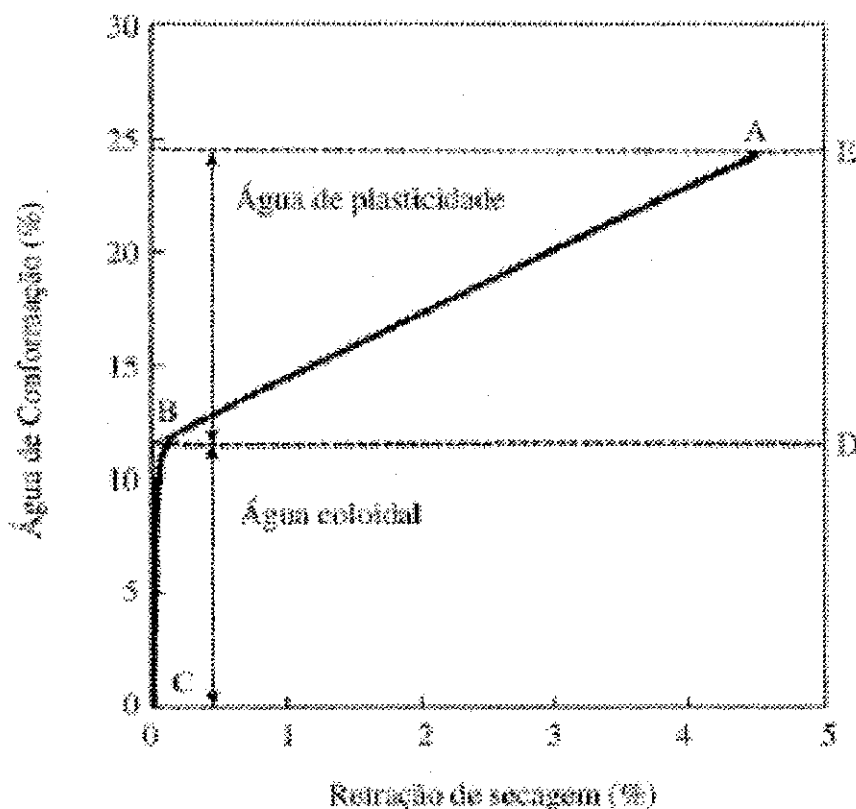


Figura 2.11 – Variação da retração em função da água de conformação. Fonte: Vieira et al. (2003).

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).

O gradiente de umidade no interior da peça possui um ponto ideal. Acima deste ponto é muito provável ocorrer fissuras e quebras nas peças cerâmicas. Podem-se destacar como fatores principais em relação à velocidade de escoamento da água:

- Aumentar o gradiente de umidade;
- Aumentar a permeabilidade;
- Diminuir a viscosidade da água;
- Diminuir o comprimento do percurso.

2.5.4 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. As trincas devem ser evitadas em todos os produtos; sua presença e a ocorrência de escórias dependem, em boa medida, das condições de secagem. Através de um controle preciso, esses problemas podem ser prevenidos ou, no caso das escórias secas, substancialmente reduzidas.

O trabalho de Telljohann (2003) explora as causas das trincas e da descoloração de secagem e apresenta maneiras de evitá-las. Reduzir a velocidade de secagem e aumentar a temperatura do produto verde a um valor abaixo da temperatura crítica da matéria-prima são técnicas sutis, a fim de se obter produtos que não apresentem trincas e descolorações.

2.5.5 Suscetibilidade às fissuras de secagem

Graças às forças de capilaridade, o líquido evaporado na superfície é repostado do interior da peça verde. O transporte por capilaridade da água é descrito conforme a seguinte equação (Telljohann, 2003):

$$\frac{dM}{dt} = -\alpha \rho_s \frac{dM}{dz} \quad (2.14)$$

onde:

$\frac{dM}{dt}$ - taxa de secagem;

α - coeficiente de condutividade hidráulica;

ρ_s - densidade relativa da substância seca;

$\frac{dM}{dz}$ - gradiente de umidade.

O gradiente de umidade dM/dz prevalecendo na secagem do produto é responsável pela tendência da formação de fissuras. A Equação (2.14) demonstra que o gradiente de umidade, responsável pelo risco de trincas, pode ser reduzido com a diminuição da velocidade de secagem. A tendência da peça trincar, também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade de umidade da peça (Telljohann, 2003).

Na primeira fase de secagem, a velocidade de secagem depende das condições externas, isto é, das condições do ar de secagem, da transmissão de calor, como também, da geometria do produto verde. Isto pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{h_c A}{h_{fg}} (\theta_s - T_\infty) \quad (2.15)$$

onde:

m - massa de água evaporada;

h_c - coeficiente de transmissão de calor por convecção;

$(\theta_s - T_\infty)$ - diferença psicrométrica de temperatura;

h_{fg} - entalpia de evaporação da água;

A - área da região considerada.

A velocidade de evaporação da água pode ser reduzida através de um menor coeficiente de transmissão de calor h_c ou pela diminuição da diferença psicrométrica de temperatura ($\theta_s - T_\infty$). A diferença psicrométrica ($\theta_s - T_\infty$) de temperatura é a diferença entre a temperatura do tijolo verde e a temperatura do ar, a ser determinada pelas condições do secador. O coeficiente de transmissão de calor varia com a velocidade do ar. Quanto menor a diferença psicrométrica de temperatura, menor será o coeficiente de transmissão de calor (Telljohann, 2003).

Entretanto, uma redução da velocidade de secagem não é geralmente desejada. As trincas podem ser evitadas também ao se aumentar o coeficiente de condutividade hidráulica. Quanto maior a condutividade de umidade na peça verde, menores serão as diferenças locais do teor de umidade e, conseqüentemente, menores as tensões causadas pelos diferentes estados de retração. O coeficiente de condutividade hidráulica é a medida da mobilidade da água no sistema capilar do produto verde, como segue:

$$\alpha(M, T) = \frac{\sigma(T)}{\mu(T)} f(M) \quad (2.16)$$

onde

$\sigma(T)$ - tensão superficial;

$\mu(T)$ - viscosidade dinâmica da água;

M — teor de umidade.

O coeficiente de condutividade hidráulica é proporcional à tensão superficial σ e inversamente proporcional à viscosidade dinâmica μ da água, ambas dependentes da temperatura. Além disso, esse coeficiente é dependente do teor de umidade M. Com a diminuição brusca da viscosidade dinâmica ao elevar-se a temperatura, o quociente entre a tensão superficial e a

viscosidade dinâmica aumenta, apesar de uma desprezível redução da tensão superficial (Figura 2.12). Assim, com o aumento da temperatura, um aumento significativo da condutividade de umidade pode ser alcançado. Com o aumento da velocidade de migração da água através do sistema capilar, obtém-se um melhor balanço do teor de umidade dentro do produto verde. Então, temperaturas maiores na peça verde durante a secagem podem reduzir as tensões internas e, conseqüentemente, o risco de trincas (Telljohann, 2003).

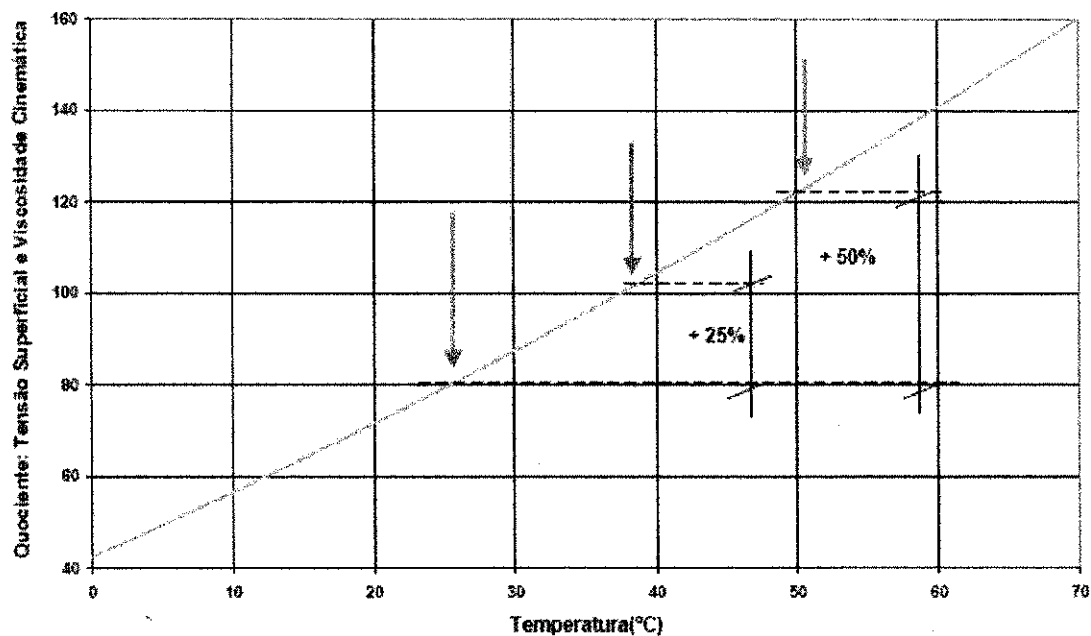


Figura 2.12 — Quociente da tensão superficial e viscosidade cinemática em função da temperatura. Fonte: Telljohann (2003).

Segundo Telljohann (2003), uma temperatura limite de resfriamento de 25°C seria classificada como muito baixa, mas é, não obstante, encontrada em várias olarias. O valor numérico do quociente da tensão superficial e da viscosidade cinemática apresenta-se, neste caso, em torno de 80. Ao se aumentar a temperatura limite de resfriamento para 39°C, o quociente cresce para 105, correspondendo a um acréscimo de aproximadamente 25%. Conseqüentemente, a condutividade da umidade cresce 25%. Aumentando-se a temperatura limite de resfriamento de 25°C para 52°C, eleva-se a condutividade de umidade em até 50%. A velocidade de migração da

água é consideravelmente aumentada e, então, uma menor suscetibilidade às trincas pode ser esperada.

Devido a uma maior temperatura, a primeira fase de secagem é também ampliada, não necessariamente no tempo, mas na ocorrência de uma menor média do teor de umidade no produto de secagem. Considerando menores gradientes de umidade presentes, uma menor média do teor de umidade no produto de secagem pode ser alcançada, sem que o transporte de água para a superfície da peça à verde seja exaurido.

Reduzir a sensibilidade às trincas através da elevação da temperatura do produto verde implica, porém, em algumas restrições. O aumento da temperatura do produto verde na primeira fase de secagem traz vantagens apenas até certo limite.

As máximas temperaturas dependem da matéria-prima utilizada. Se a temperatura máxima do produto verde é ultrapassada, o risco de trincas cresce, apesar da mobilidade da água na peça ser melhorada e de ter, assim, um efeito benéfico no balanceamento da umidade. Se a temperatura selecionada para um produto verde é muito alta, a peça está propícia à formação de fissuras mais rapidamente. Em uma linha de produção de tijolos de parede aparente, por exemplo, determinou-se que, com a temperatura limite de resfriamento de 50°C, as primeiras trincas ocorrem logo depois de 63% do tempo de secagem, em comparação à temperatura de 40°C. Telljohann (2003) relata que o acréscimo da suscetibilidade às trincas pela perda de resistência da massa, com aumento da temperatura foi, em casos especiais, até superior.

Ao se permanecer abaixo do estado crítico de temperatura, dependendo da matéria-prima, a sensibilidade à trinca decresce, mesmo com o aumento da temperatura limite de resfriamento. Isto pode ser visto na Figura 2.13, na qual a temperatura cresce de 35° C para 45° C e o tempo até a primeira formação de trinca é acrescida de 43 % para a massa A e, ainda, 20 % para a massa B. Isso é o mesmo que dizer que uma umidade relativa do ambiente um pouco maior, diminui a suscetibilidade a trincas (Telljohann, 2003).

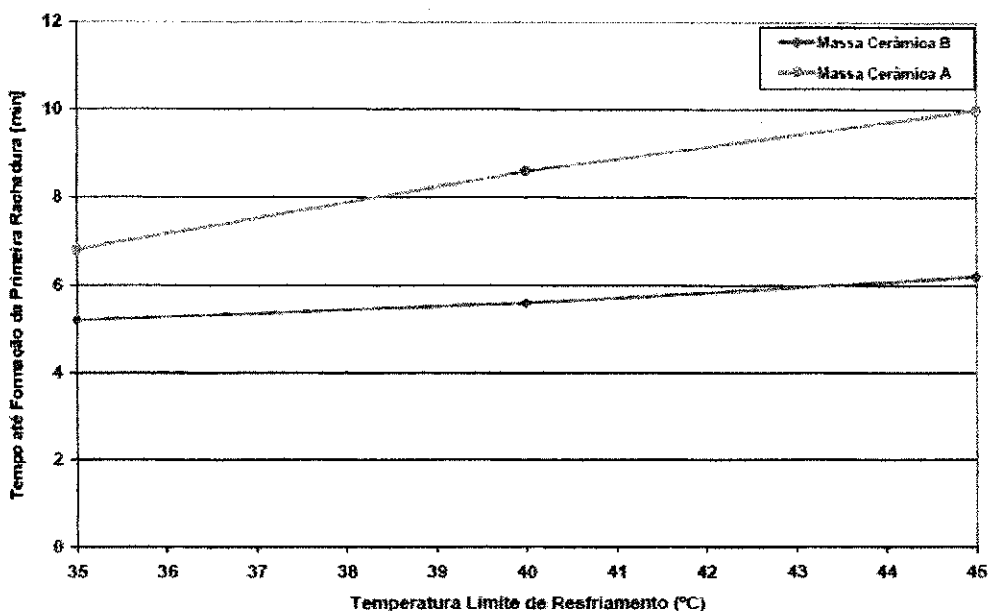


Figura 2.13 — Tempo de secagem até a formação da primeira trinca em função da temperatura-limite de resfriamento. Fonte: Telljohann (2003).

2.5.6 Estado da arte sobre secagem da matéria-prima para cerâmica vermelha

A secagem é uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de materiais cerâmicos. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças que são perceptíveis somente após queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem permite, por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los. O objetivo da secagem é o de eliminar a água, utilizada na etapa de conformação, necessária para a obtenção de uma massa plástica.

Como já apresentado, a eliminação de água ocorre por evaporação através do aporte de calor, efetuado mediante uma corrente de ar. Sabe-se que quando se mistura uma argila com certa quantidade de água, obtém-se uma massa coesiva que pode ser moldada com facilidade. Esta propriedade é característica dos minerais argilosos e denomina-se plasticidade (Vieira et al., 2003).

Pouca informação sobre as características e propriedades de materiais argilosos tem como consequência produtos de baixa qualidade. Assim, é muito importante a sua caracterização a fim de se ter um perfeito entendimento das suas características, gerando conhecimentos que contribuam para a obtenção de produtos de melhor qualidade (Luz et al., 2008).

Na literatura, pode-se encontrar vários trabalhos que mostram a preocupação prévia, de estudiosos em analisar quimicamente e mineralogicamente, a matéria-prima utilizada na fabricação de tijolos, no sentido de tomar decisões para otimizar, quantificar e qualificar o produto final. A importância das análises térmicas no controle das matérias-prima é enfatizada por (Nascimento et al., 2008). O trabalho mostra a aplicabilidade destas análises além de nomear as análises, técnica diferencial e termogravimétrica, como marcantes na caracterização das matérias-primas empregadas na cerâmica.

O processo de secagem de um sólido pode ser influenciado por condições internas e externas do processo bem como pelo mecanismo de migração de umidade dentro do material. Neste sentido, alguns autores, tais como Elias (1995), Fricke (1981) e Hasatani e Itaya (1992) afirmam que durante a secagem de argila, o mecanismo de migração de umidade dominante é o transporte por difusão líquida. No entanto, outros pesquisadores como van der Zanden et al. (1996) e van der Zanden (1997), consideram que o mecanismo dominante é o transporte por difusão de líquido e vapor. Estes autores usaram em seus trabalhos um modelo matemático que considera a existência de transporte de líquido e vapor, e obtiveram um bom ajuste entre dados experimentais e teóricos. Eles afirmaram que o transporte de umidade nas argilas é dominado pelo transporte de líquido, e somente para pequenos teores de umidade é que o transporte de vapor tem significativa contribuição.

Silva (2007) mostra resultados da cinética de secagem em membranas cerâmicas na forma geométrica de tubos cilíndricos. O estudo oferece uma equação de difusão em regime transiente escrita em coordenadas generalizadas. Além disso, encontra-se, neste trabalho, o desenvolvimento de um software para a solução da equação de difusão em sólidos com forma arbitrária.

Ketelaars et al. (1992a) desenvolveram um estudo numérico uni e bidimensional, com o objetivo de analisar a influência do encolhimento na cinética de secagem e tensões internas, em um material cerâmico argiloso. Assumiram diferentes tipos de considerações: encolhimento unidirecional, encolhimento isotrópico e sem encolhimento. Concluíram que a taxa de secagem é influenciada pelo tipo de encolhimento, sendo maior para um encolhimento unidimensional, e que as tensões que podem provocar trincas e deformações, crescem com o aumento dos níveis de encolhimento.

Ketelaars et al. (1992b) desenvolveram um modelo numérico utilizando a teoria da difusão líquida para analisar o transporte de umidade em materiais cerâmicos argilosos. O objetivo do trabalho foi analisar o efeito da variação do coeficiente de difusão com o teor de umidade. Os resultados demonstram um decréscimo do coeficiente de difusão durante a secagem.

Hasatani e Itaya (1992) desenvolveram uma metodologia numérica para descrever a transferência simultânea de calor e massa em materiais cerâmicos argilosos na forma de um paralelepípedo, considerando condições de contorno convectivas na superfície do sólido. Os autores usaram a teoria da difusão líquida, aplicada a um problema tridimensional transiente, considerando coeficiente de difusão variável e encolhimento. O estudo demonstra uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. O efeito da temperatura no processo de deformação também foi analisado, evidenciando que maiores níveis destas, aumentam sensivelmente a deformação do material durante o processo de desidratação do mesmo. É reportado também, que existem maiores níveis de tensões trativas na superfície do produto, sobretudo nos vértices do paralelepípedo estudado.

Gorini e Correia (1999) reportam que na indústria cerâmica, a secagem por atomização, por exemplo, atua na remoção da água adicionada no processo de moagem das argilas, elevando acentuadamente os custos energéticos. No entanto, esse processo de produção, conhecido como via úmida, é preferido em relação ao via seca (que não utiliza água na moagem dos materiais) pela maioria das empresas, aproximadamente 60%, pois as características do produto final são melhores.

Itaya et al. (1997) estudaram a secagem de materiais cerâmicos argilosos, usando a teoria da difusão líquida, num estudo numérico tridimensional transiente. Os efeitos dos parâmetros adimensionais como os números de Biot e de Lewis, foram analisados, com o objetivo de se obter uma ótima condição de secagem. Os autores evidenciaram que os gradientes de umidade e as máximas tensões que geram trincas no material são mais significativos com os acréscimos destes parâmetros. Evidenciaram também aumentos nas tensões termomecânicas com o aumento do número de Biot e encolhimento.

Cadé (2004) e Lucena et al. (2005), enfatizam que, durante o processo de secagem, elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido podem causar defeitos irreversíveis no mesmo, com a perda da qualidade do produto final, ou sua perda total, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais. Neste contexto, é fundamental conhecer 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.

Um estudo experimental realizado por Batista e Nascimento (2005), apresenta a influência da temperatura e a forma do corpo na cinética de secagem de tijolos cerâmicos. Resultados relacionados à cinética de secagem e alterações volumétricas em amostras de forma de paralelepípedo são mostrados e analisados. São apresentados equações, com ótimos resultados, para retração volumétrica e para cinética de secagem.

Resultados experimentais da análise das propriedades, físico-mecânica de placas, submetidas à secagem em estufas, com diferentes temperaturas (60, 80 e 110°C) e queima nas temperaturas de 900 e 950°C, são encontrados em Santana (2006). Curvas da cinética de secagem e de encolhimento dos corpos de provas são apresentadas e discutidas. Verifica-se que quanto menor a taxa de aquecimento na secagem melhor são as propriedades físico-mecânicas dos corpos estudados, bem como os corpos de provas com bordas retas possuíram melhores propriedades, do que os corpos com bordas arredondadas.

Nascimento et al., (2008), apresenta um estudo experimental da secagem, queima e choque térmico de amostras de tijolos cerâmicos maciços e vazados de argila para cerâmica vermelha, com diferentes dimensões e umidades iniciais. São oferecidas técnicas numéricas, analítica e experimental a problemas específicos envolvendo transferência de calor e massa, retração volumétrica e tensões oriundas de gradientes térmicos e de umidade, direcionadas ao desenvolvimento de sistemas de secagem, particularmente a secagem de materiais cerâmicos com forma paralelepípedica (tijolos cerâmicos) nos níveis de partícula e de equipamento industrial (secador).

2.6 Secadores e fornos

2.6.1 Combustíveis

Inúmeros trabalhos são realizados ao longo do tempo no setor da indústria cerâmica, com vistas a experimentações e mudanças referentes à política energética, principalmente quando o combustível utilizado é proveniente do petróleo. A partir desta realidade, aumentou-se o interesse em buscas de alternativas que visem à otimização no funcionamento de secadores e fornos utilizados nas empresas do setor.

Nos últimos anos, foi dada grande ênfase à necessidade de otimizar os recursos energéticos em sistemas de altas temperaturas, funcionando com combustíveis fósseis, como secadores, fornos e caldeiras, uma vez que existe uma preocupação crescente com os efeitos sobre as condições climáticas do planeta. A utilização de combustíveis alternativos vem tendo uma atenção especial por parte dos ceramistas e estudiosos, de forma que sejam adequados aos custos na produção e também que seja viável a realidade do mercado consumidor, evitando a falência da indústria (Santos, 2001).

As indústrias mais desenvolvidas, por fabricarem produtos de alto valor agregado, como os produtos esmaltados, necessitam de um combustível “limpo”. Este fato justifica o uso de GLP por estas indústrias, sendo que nestas o gás natural vem ganhando espaço.

Com a chegada do gás natural na região sul do Brasil, através do gasoduto Bolívia-Brasil, viu-se a possibilidade do desenvolvimento da indústria de cerâmica vermelha no país. Sabe-se que, neste setor da indústria, o gás natural é usado em grande escala nos países desenvolvidos, enquanto no Brasil seu uso está em fase de desenvolvimento. A utilização do gás natural é uma tendência mundial, por ser um combustível mais nobre, menos poluente e por estar no estado gasoso, tem facilitado o controle de sua queima.

Vale salientar a importância de conhecer as características de funcionamento e comportamento térmico dos secadores e fornos frente à conversão para o uso de combustíveis mais nobres como o gás natural, de modo que se possa analisar a viabilidade deste processo de substituição.

De acordo com Terada (1998), alguns aspectos devem ser focalizados quanto a um programa de conservação e uso eficiente de energia no setor cerâmico. O gás natural, imaginado por muitos como a solução definitiva para o setor cerâmico, requer uma análise cuidadosa de sua conveniência, com a necessidade de novos equipamentos, e principalmente novos conceitos de gerenciamento como manutenção preventiva, a automação, o que pode não ser a solução mais econômica para muitos setores, em particular a cerâmica.

No setor de cerâmica vermelha o gás natural vem tendo uma dificuldade muito grande de inserção, motivada principalmente pelo custo muito baixo da lenha, que é usada intensivamente nas empresas (Schwob, 2005). Em algumas empresas onde houve ou há o uso do gás, foram identificados alguns problemas técnicos típicos de conversões inadequadas. Os secadores e fornos empregados foram dimensionados originalmente para combustíveis sólidos e/ou líquidos, e quando há a adaptação para o gás natural, têm ocorrido com frequência, problemas de incidência muito localizada de chamas e de temperatura excessivamente alta ou baixa em alguns pontos. Contribuem para o agravamento desta situação, a ausência de dispositivos de monitoramento e controle, como também a inexistência de recuperação de calor para secagem de produtos, entre outros (Schwob, 2005).

Todos estes aspectos reunidos trazem perda de produtividade e, por vezes, afetam negativamente a qualidade dos produtos e afastam as empresas potencialmente usuárias do gás natural (Tapia, 2002). Além disso, para a utilização desses combustíveis alternativos são necessários investimentos considerados altos, como exemplo, pode-se citar a conversão dos secadores e/ou fornos, manuseios, estocagem, que obviamente variam com o tipo de combustível a ser utilizado. Este ponto é crítico por tratar-se de um investimento que, em função da instabilidade econômica ou disponibilizada do combustível, surge apenas como solução por um período de tempo considerado curto. Com isto os ceramistas ficam mais conscientes em relação as mudanças e a uma política energética eficiente e duradoura.

A Tabela 2.4 exemplifica a diversidade de desempenhos energéticos com o emprego do gás natural no segmento. As variações passam de 70% e comprovam a possibilidade de desenvolvimento de soluções para aumento da eficiência.

Tabela 2.4. Consumo de combustíveis dos principais fornos empregados no setor de cerâmica vermelha.

Tipo de Forno (capacidade)	Consumo Específico (kcal/kg)
Túnel (2 milhões peças/mês)	350 a 400
Túnel — médio (900 mil peças/mês)	450 a 600
Túnel — pequeno (400 a 600 mil peças/mês)	600 a 650
Hoffmann s/secagem (600 a 900 mil peças/mês)	350 a 400
Hoffmann c/secagem (600 a 900 mil peças/mês)	500 a 600

Fonte: Schwob (2005).

Para a utilização do gás natural na indústria cerâmica, são necessários investimentos, para conversão dos sistemas térmicos (secadores e fornos) bem como o manuseio e estocagem, que variam com o tipo de combustível a ser utilizado. Este ponto é crítico por tratar-se de um investimento sem garantias de estabilidade em longo prazo ou incertezas na disponibilidade do combustível. É viável apenas por um curto período de tempo. Problemas como estes fazem com que o ceramista fique mais cético em relação a qualquer mudança, já que historicamente não existe uma política energética, eficiente e duradoura. Com a introdução do gás natural na matriz

energética do país principalmente com a construção do gasoduto Bolívia-Brasil, via-se uma alternativa aparentemente estável, porém, os últimos acontecimentos em relação a essa pareceria vem mostrando resultados insatisfatórios e sem credibilidade para os investidores do setor.

2.6.2 Tipos de fornos

Os fornos empregados para a queima das peças na indústria de cerâmica vermelha podem ser contínuos ou intermitentes, acarretando níveis de eficiência diferenciados (Wittwer e Faria, 1997).

2.6.2.1 Fornos intermitentes

Podem ser dos tipos Caieira, Chama Reversível ou Forno Circular, Paulistinha/Abóbada e Plataforma. Nestes fornos o processo de queima se dá sob a forma de bateladas. Apresentam as seguintes vantagens:

- Conceção simples;
- Construção fácil e rápida;
- Baixo custo de construção.

As desvantagens são:

- Não há controle dos gases;
- Aquecimento irregular;
- Grande consumo específico;
- Difícil aproveitamento dos gases de exaustão.

2.6.2.2 Fornos contínuos

Podem ser dos tipos Anular (Hoffmann) e Túnel. Nestes fornos o processo de queima se faz de forma contínua, sem interrupção para descarga ou carregamento das peças. Enquanto um lote de peças está chegando ao final da queima, outra quantidade igual ou semelhante está sendo iniciada, sem descontinuidade do processo. Apresentam as seguintes vantagens: menor consumo específico, baixo ciclo de queima, controle e aproveitamento dos gases de exaustão e aquecimento mais homogêneo. As desvantagens são: concepção mais complexa, construção mais demorada e de custo mais elevado que os intermitentes.

Os fornos contínuos tipo túnel (Figura 2.14) são fornos mais modernos e eficientes no uso de energia. Possuem três seções, pré-aquecimento, queima e resfriamento, havendo o aproveitamento de calor de uma seção para outra.

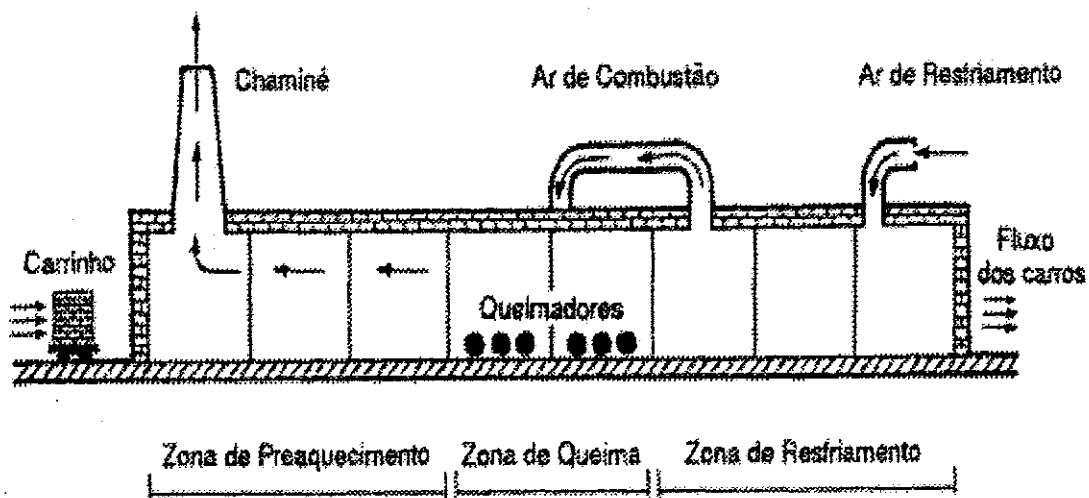


Figura 2.14 — Esquema de funcionamento de um forno túnel. Fonte: Henriques Jr. et al. (1993).

O ar quente que sai da zona de resfriamento é injetado na zona de queima e serve como ar de combustão. Os gases de combustão que deixam a zona de queima são dirigidos à zona de pré-aquecimento, aproveitando-se o calor residual. O transporte do material é realizado por meio de

carrinhos ou esteiras móveis, acionados através de sistema automático. Este tipo de forno é bastante utilizado na cerâmica branca. Entretanto, devido as suas vantagens de baixo consumo específico, baixo custo de mão-de-obra, pequena perda de rejeitos e melhor qualidade do produto, vêm sendo empregados com sucesso também em empresas de cerâmica vermelha.

2.6.3 Balanços de energia e exergia nos fornos e secadores

2.6.3.1 Conservação de energia

A energia utilizada nos fornos é fornecida pela queima de combustíveis. Essa energia é destinada para aquecer a carga, evaporar a umidade e fornecer o calor necessário para a decomposição e cristalização dos componentes químicos do material cerâmico.

Em termos gerais, para realizar o balanço energético nos fornos e secadores, deve-se levar em consideração o seguinte:

- Aquecimento da carga;
- Evaporação da umidade;
- Reações químicas;
- Perdas para aquecimento da estrutura do forno (fornos intermitentes);
- Perdas por radiação e convecção para o ambiente;
- Perdas devido a infiltrações de ar por aberturas e frestas;
- Perdas associadas às massas inertes, como carrinhos e suportes das peças;
- Perdas pelos gases de exaustão.

Os valores percentuais para cada um destes itens são variáveis, dependendo do tipo de equipamento, capacidade do mesmo, eficiência de operação, eficiência de combustão, entre outros.

Valores para o balanço térmico em alguns fornos podem ser encontrados em Queiroz (1988), Henriques Jr. et al. (1993) e em Wittwer e Faria (1997), demonstrando sensíveis discrepâncias nos percentuais de energia. Para os fornos/secadores túnel, as perdas para aquecimento da estrutura tornam-se negligenciáveis quando o forno entra em regime permanente de operação. O objetivo, neste caso, deve se concentrar na redução do percentual do calor associado aos gases na chaminé, ao produto e ao carrinho na saída do equipamento térmico e na minimização das perdas por radiação e convecção para o ambiente.

Para a realização de conversão de combustíveis, ou seja, substituição do uso de um combustível utilizado atualmente por um forno por outro combustível, por exemplo, gás natural, requer uma análise prévia do processo de queima e do balanço térmico do forno como também uma análise econômica antes da conversão para constatar a viabilidade desta conversão. Medições em campo e ferramentas de simulação que modelem o funcionamento do forno são muito úteis nessa análise.

Uma avaliação energética do funcionamento dos fornos/secadores para fabricação de materiais cerâmicos, além de promover esforços para o uso eficiente deste equipamento, pode ser um ponto de partida para ações que racionalizem os custos de produção, priorizem a qualidade do produto e aumentem sua produtividade, economizando energia ao mesmo tempo.

Em alguns casos, a conversão do combustível utilizado não é recomendável, além de ser economicamente inviável. Portanto, alterações no funcionamento do forno/secador podem representar fatores importantes na economia de energia utilizada no processo, mantendo a qualidade do produto.

Dentro do contexto da racionalização do uso de energia, a análise do desempenho térmico de fornos/secadores cerâmicos tem relevante importância, já que este processo é um consumidor intensivo de energia térmica, ao redor de 1.700 kJ/kg. Assim, no estudo dos fornos túneis, por

exemplo, uma das maiores dificuldades presentes é a determinação experimental da distribuição de temperaturas no interior da carga (Dadam et al., 2005).

O maior desafio reside na instrumentação, uma vez que o ciclo é bastante longo e os sensores devem acompanhar a carga durante todo o trajeto no interior do forno que, não raro, alcança extensões superiores a 100m, com seus cabos de ligação submetidos à temperaturas superiores a 300°C (Dadam et al., 2005).

Um estudo realizado por Dadam et al. (2005), mostra uma análise térmica em um forno tipo túnel pertencente à Cerâmica Heinig, localizada no município de Brusque-SC. O forno possui comprimento total de 90 metros com largura interna do túnel de 1,3 metros. Ao longo do comprimento do forno, podem-se identificar três zonas distintas: pré-aquecimento, queima e resfriamento, sendo o combustível utilizado, o gás natural, queimado em 10 queimadores distribuídos em fornalhas ao longo da zona de queima (Figura 2.15).

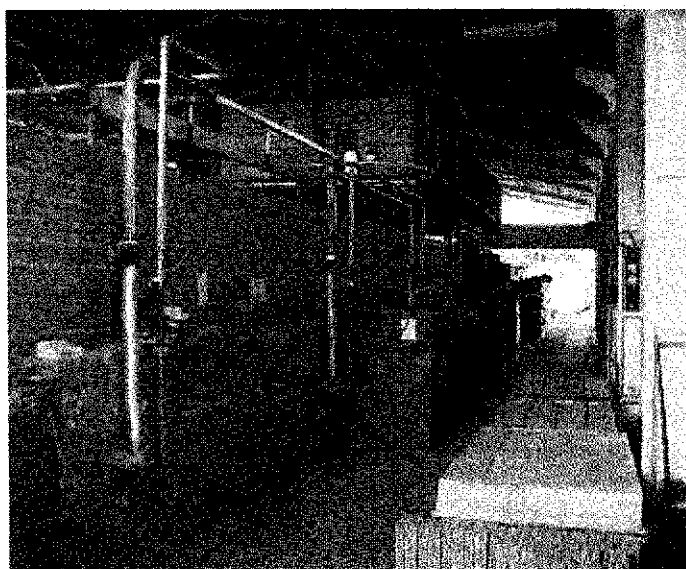


Figura 2.15 - Queimadores de gás natural, distribuídos ao longo da zona de queima. Fonte: Dadam et al., (2005).

Para a medição da temperatura no interior da carga foram escolhidos termopares do tipo K, de bitola 14AWG, com separadores do tipo miçanga feita em mulita, que se estendiam desde a

posição a ser medida até uma posição abaixo da plataforma do carro que serve de apoio à carga (Figura 2.16).

Os dados das temperaturas obtidas para cada um desses termopares, ao longo do forno, são mostrados na Figura 2.17. Percebe-se uma variação brusca de temperatura em relação à posição do forno e dos termopares da carga, possibilitando uma análise coerente e ações que visem a otimização do forno em seu funcionamento e desempenho, em relação a energia necessária.

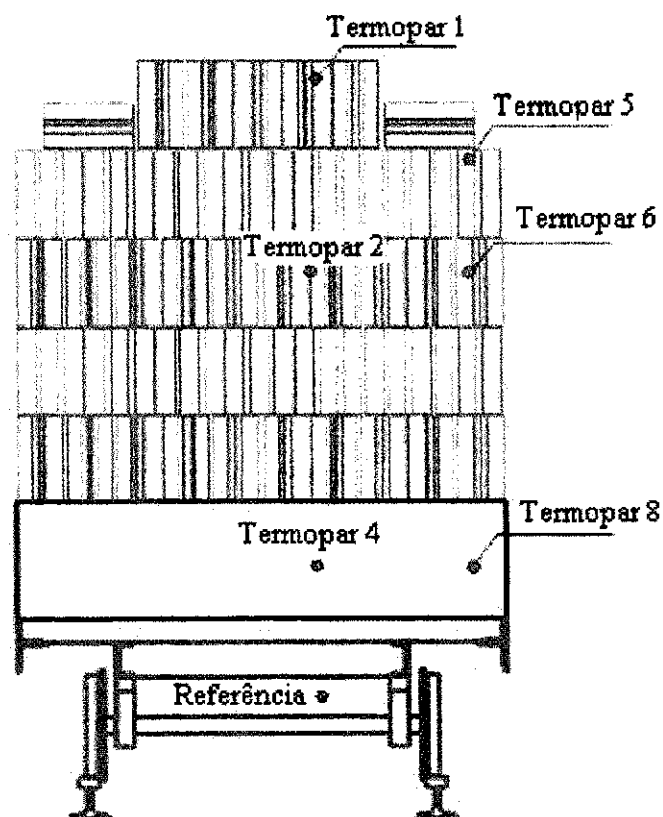


Figura 2.16 — Instalação dos termopares na carga e vagão. Fonte: Dadam et al. (2005).

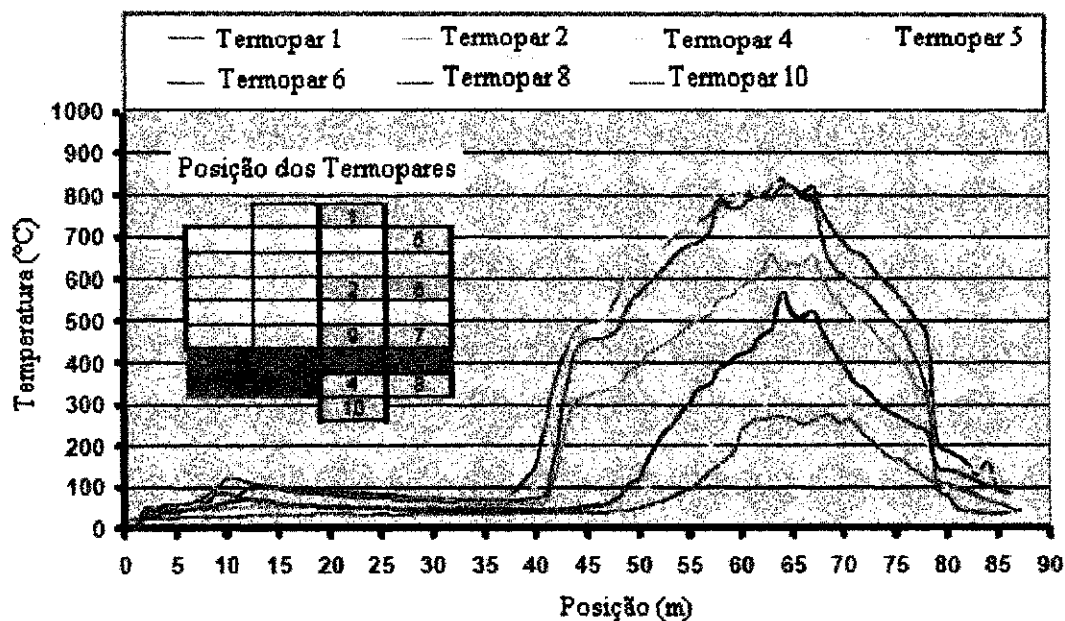


Figura 2.17 – Temperaturas da carga ao longo do forno túnel. Fonte: Dadam et al. (2005).

Na literatura, encontram-se vários trabalhos mostrando que fornos tipo túneis são tidos como os mais racionais no consumo de energia. O fato de seu funcionamento ser contínuo, ou seja, sem pausas entre uma etapa de fabricação e outra, dispensa o re-aquecimento da estrutura e assim, economiza energia, na etapa seguinte, diferente do que ocorre em fornos intermitentes. Na maioria dos fornos tipo túneis, o processo ocorre em um ciclo com pré-aquecimento, queima e resfriamento.

No caso do forno túnel, as perdas maiores ocorrem pelos gases que saem pela chaminé, mas estes já circulam pelo interior do forno, na região de pré-aquecimento, sendo eliminados já a uma temperatura mais baixa do que no caso dos fornos intermitentes. Também se perde energia que está associada à carga e vagoneta que deixam o forno. As perdas também ocorrem pelas paredes, mas de forma reduzida se houver um bom isolamento térmico. Infiltrações de ar exterior também são caracterizadas como consumidores de energia.

Alguns resultados servem para balizar o consumo de energia, sendo muito comum a expressão de um consumo específico, dado pela razão entre a taxa de energia produzida pelo combustível e a produção de material queimado, geralmente expressa em kcal/kg de produto

queimado. Alguns trabalhos fornecendo valores para esta relação podem ser encontrados na literatura, tais como o trabalho de Tapia e Villar (2000), que indicam um consumo de energia entre 258 e 426 kcal/kg (1080 a 1780 kJ/kg), sendo o último valor relativo a um forno túnel, com temperatura de queima de 750°C. Por sua vez, Facincani (1992) apresenta uma ampla faixa de valores que variam de 300 a 800 kcal/kg (1256 a 3349 kJ/kg), incluindo o consumo de energia para a secagem do material. Esta associação queima-secagem é bastante pertinente, pois se torna interessante aproveitar o calor recuperado do material no processo de resfriamento dentro do forno túnel, evitando-se a necessidade de uma nova fonte de calor para o secador. De acordo com Nicolau et al. (2002), há um consumo de 1975 kcal/kg, utilizando-se óleo combustível e de 1730 kcal/kg para o consumo de gás natural em um mesmo forno intermitente, que sofreu conversão. Este consumo elevado deve-se à elevada temperatura de queima, 1100 °C, ao tempo de glasura do material e as enormes perdas inerentes ao processo.

Especificamente na secagem, o cálculo das perdas de massa da água do produto, retirada pela secagem é feita por um método simples. No início do processo de secagem, a massa de produto úmido a um teor de umidade inicial M_o (b.u) é \dot{m}_{pi} . Após a secagem o teor de umidade final M (b.u) será \dot{m}_{ps} . A massa \dot{m}_{ps} de matéria seca não varia durante a secagem e é igual a:

$$\dot{m}_{ps} = \dot{m}_{pi} \left(\frac{1 - M_o}{1} \right) = (\dot{m}_{pi} - \dot{m}_{perdida}) \left(\frac{1 - M}{1} \right) \quad (2.17)$$

e

$$\dot{m}_{perdida} = \dot{m}_{pi} \left(\frac{M_o - M}{1 - M} \right) \quad (2.18)$$

onde $\dot{m}_{perdida}$ é a perda d'água relativa à massa do produto úmido.

Supondo que a secagem seja uma operação que conserva integralmente a matéria seca, pode-se escrever $\dot{m}_{pi} = \dot{m}_{pf} + \dot{m}_{perdida}$, permitindo obter a massa m_{pf} em qualquer tempo. No caso

do ar, a evolução das suas propriedades psicrométricas em função do nível do teor de umidade do produto, durante o fenômeno de secagem, não pode ser observado senão por ocasião de experiência em secagem estática, como consequência, considera-se como dado, o valor médio das propriedades do ar de saída durante a experiência.

O secador contínuo apresenta, em regime permanente, as seguintes propriedades para o ar:

- a) Na saída do ventilador / entrada do aquecedor (ar ambiente) T_{ao} e h_{ao} ;
- b) Na entrada do secador, após aquecimento (ar aquecido) T_{ai} , h_{ai} , x_{ai} e \dot{m}_{ai} ;
- c) Na saída do secador (ar de exaustão) T_{af} , h_{af} , x_{af} e \dot{m}_{af}

onde x é a umidade absoluta; h é a entalpia; T_a é a temperatura do ar e \dot{m}_{ai} é o fluxo da massa inicial do ar.

A energia térmica fornecida ao ar, considerado como gás perfeito, pelo aquecimento elétrico ou outra fonte de energia é dado por:

$$\frac{\dot{q}}{\dot{m}_{ai}} = (h_{ai} - h_{ao}) = c_a (T_{ai} - T_{ao}) \quad (2.19)$$

onde c_a é o calor específico do ar, à pressão constante. Se η' é o rendimento de primeira lei do sistema de aquecimento, então a energia específica referente à fonte geradora de energia será:

$$\frac{\dot{q}}{\dot{m}_{ai}} = \left(\frac{h_{ai} - h_{ao}}{\eta'} \right) \quad (2.20)$$

O fluxo de massa evaporada e que é absorvida pelo ar é igual a:

$$\dot{m}_{perdida} = \dot{m}_{ai} (x_{af} - x_{ai}) \quad (2.21)$$

Várias definições de eficiência energética de secadores convectivos podem ser encontradas na literatura. Lasseran (1978) relaciona a energia térmica fornecida ao ar e o fluxo de massa evaporada, denominando esta razão de consumo térmico específico (por kg de água retirada do produto), grandeza característica do desempenho energético do secador, como segue:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ai}(h_{ai} - h_{ao})}{\dot{m}_{ai}(x_{af} - x_{ai})} \quad (2.22)$$

Esta equação apresenta resultados, não-realista, sob o aspecto energético, uma vez que não computa explicitamente nenhuma perda de energia, o que dificulta a sua comparação com outros resultados de eficiência determinada de forma diferenciada. Strumillo e Kudra (1986) apresentam uma equação matemática que determina a eficiência energética de secadores convectivos baseado na primeira lei da termodinâmica, dada por:

$$\eta = \frac{\left[\text{Energia requerida para evaporar a umidade na temperatura de alimentação do produto} \right]}{\left[\text{Energia total fornecida ao secador} \right]} = \frac{\dot{m}_{ai}(x_{af} - x_{ai})h_{fg \text{ a } T \text{ de alimentação}}}{\dot{m}_{ai}(h_{ai} - h_o)} \quad (2.23)$$

Através desta equação, percebe-se que a eficiência não apresenta resultado satisfatório, haja vista que não considera a energia necessária para elevar a temperatura do produto até a temperatura de evaporação, resultando em valores superiores ao real, uma vez que o calor latente de vaporização decresce com a elevação da temperatura.

Freqüentemente o termo rendimento do combustível é utilizado em substituição à eficiência energética e relata a energia real utilizada na secagem, porém, não explicita claramente a energia de combustível, dificultando a sua interpretação (Strumillo e Lopes-Cacicedo, 1987). Este rendimento é definido por:

$$\eta = \frac{\text{Energia requerida para evaporar a água livre na temperatura de secagem}}{\text{Taxa de energia de combustível usada pelo secador}} \quad (2.24)$$

Uma definição para a eficiência energética, apresentada por Helvaci e Peker (1989), para secadores do tipo cascata é dada por:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ai} t_{rt} (x_{af} - x_{ai}) h_{fg}}{\dot{m}_{pi} t_{ra} (M_o - M)} \quad (2.25)$$

Esta definição leva em consideração o calor de desorção da água, que não é uma indicação direta do desempenho do secador. Algumas vezes, uma eficiência energética ideal é definida para um secador perfeitamente isolado completo de sólido de capacidade calorífica específica desprezível. Neste caso a ineficiência do secador é representada pela perda de energia na exaustão da corrente de ar. Desta forma pode-se definir a eficiência energética evaporativa por (Ashworth e Carter, 1980):

$$\eta = \frac{\left(\begin{array}{l} \text{Energia requerida para evaporar a} \\ \text{umidade na temperatura de secagem} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{l} \text{Energia requerida para evaporar a} \\ \text{umidade na temperatura de secagem} \end{array} \right) + (\text{Perda de energia na exaustão de ar})} \quad (2.26)$$

ou ainda:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{ai} (x_{af} - x_{ai}) h_{fg \text{ a } T \text{ de secagem}}}{\dot{m}_{ai} (x_{af} - x_{ai}) h_{fg \text{ a } T \text{ de secagem}} + \dot{m}_{af} h_{af}} \quad (2.27)$$

Esta equação é consideravelmente realista já que penaliza corretamente a operação de secagem em altas temperaturas.

Corzo et al. (2008) na otimização de secagem de fatias de coroba em camada fina, define eficiência energética como sendo uma razão entre a energia disponível e a energia utilizada para a evaporação:

$$\eta = \frac{\text{Energia necessária para a evaporação no tempo } t}{\text{Energia do fluxo de ar no tempo } t} = \frac{(\dot{m}_{ai} - \dot{m}_{at})h_{fg}}{\dot{m}_{as}(h_{as} - h_{at})} \quad (2.28)$$

onde h_{fg} é o calor latente de vaporização de água na temperatura média do alimento úmido, \dot{m}_{as} é o fluxo de massa do ar seco, h_{as} e h_{at} são as entalpias específicas do ar seco e inicial num tempo t , respectivamente. A entalpia do ar de secagem pode ser determinada como:

$$h_a = c_a(T - T_{ref}) + h_{fg}x \quad (2.29)$$

onde c_a é o calor específico do ar, T a temperatura do ar, T_{ref} a temperatura de referência e x a umidade absoluta do ar.

Syahrul et al. (2002) realizando um estudo da eficiência da secagem de partículas úmidas em leito fluidizado definiu o potencial, para a utilização de secadores em leito fluidizado, de eficiência energética. Nesta seção, dois métodos para determinar a eficiência da secagem em leito fluidizado são descritos. Um deles é a eficiência energética baseada na Primeira Lei da Termodinâmica. Neste caso, a eficiência energética do secador pode ser obtida por meio de um balanço energético. A eficiência térmica do processo de secagem pode ser definida como (Botteril, 1975):

$$\eta = \frac{\text{Energia transmitida ao produto}}{\text{Energia incorporada ao ar na secagem}} \quad (2.30)$$

A eficiência térmica também pode ser expressa em termos da eficiência energética, utilizando a seguinte equação:

$$\eta = \frac{\dot{m}_a [h_{fg}(M_{pi} - M_{pf}) + c_p(T_p - T_{pi})]}{\dot{m}_a (h_i - h_{ref})\Delta t} \quad (2.31)$$

onde m_s é a massa do material seco (kg), h_{fg} o calor latente de vaporização da água $J.(kg \text{ água})^{-1}$, M_{pi} e M_{pf} são os teores de umidade inicial e final da partícula, respectivamente, em base seca (kg água/kg de sólido), c_p é o calor específico do produto ($J.kg^{-1}.K^{-1}$), T_p e T_{pi} são as temperaturas do produto na saída e na entrada, respectivamente, \dot{m}_a é o fluxo de massa do ar de secagem, h_i e h_{ref} são as entalpias de entrada e de referência, respectivamente e Δt a variação do tempo (s ou min).

Ceylan et al. (2007) numa análise da eficiência de um secador de madeira auxiliado por uma bomba de calor, usou a seguinte equação geral de conservação de energia:

$$\dot{Q}_c - En = \sum \dot{m}_a \left(h_a - h_{ai} + \frac{\dot{V}_a^2 - \dot{V}_{ai}^2}{2} \right) \quad (2.32)$$

onde o calor utilizado durante a secagem tem seguinte equação:

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_a (h_{ai} - h_a) \quad (2.33)$$

O calor liberado no condensador \dot{Q}_c e o fluxo de massa do ar de secagem \dot{m}_a , foram estimados utilizando os valores experimentais de itens como:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_a c_a (\bar{T} - \bar{T}_i) \quad (2.34a)$$

$$\dot{m}_a = \rho_a c_a (\bar{T} - \bar{T}_i) \quad (2.34b)$$

onde \dot{m}_a é o fluxo de massa do ar, En a energia utilizada, \dot{V}_a e \dot{V}_{ai} são a vazão volumétrica do ar, na saída e na entrada, respectivamente, ρ_a a densidade do ar, \bar{T} e \bar{T}_i são a média das temperaturas do ar saindo e entrando do condensador, respectivamente (Jia et al., 1990).

No processo de secagem ideal, a umidade absoluta e a umidade relativa do ar aumentam, e é mantida constante a entalpia do ar úmido. Sendo assim, a secagem é teoricamente um processo isentálpico. As perdas no processo de secagem são originadas por difusão de calor para a estrutura do secador; elevação da temperatura do produto e convecção e radiação de calor para a vizinhança. Admitindo que o secador esteja suficientemente aquecido, podem-se desprezar as perdas por difusão.

Desta forma, as perdas por aquecimento do produto e transferência de calor para a vizinhança, são dadas por:

$$\dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{Rad.}} + \dot{m}_{\text{pi}} c_p (T_{\text{pf}} - T_{\text{pi}}) = \dot{Q}_{\text{Perdas}} \quad (2.35)$$

ou ainda:

$$\dot{m}_{\text{ai}} (h_{\text{ai}} - h_{\text{af}}) = \dot{m}_{\text{pi}} c_p (T_{\text{pf}} - T_{\text{pi}}) + \dot{Q}_{\text{conv.}} + \dot{Q}_{\text{Rad.}} \quad (2.36)$$

O gasto de energia térmica perdido pelo ar e que provoca a evaporação da água é acompanhado por um resfriamento do ar, isto é, sua temperatura é reduzida. Esta diminuição da temperatura é devido à absorção do vapor d'água fornecida pelo produto, possibilitando que o balanço térmico global das trocas se anule. Sendo assim, o ar recupera sua energia sob a forma de vapor, o que perdeu sob forma de calor sensível, e que proporcionou a evaporação da água e o aquecimento do produto.

Vale salientar que, mesmo úmido e com sua temperatura reduzida, na saída do secador, permanece quente e úmido o suficiente para reter ainda certa quantidade de água, a menos que o limite de saturação tenha sido alcançado ou se esteja próximo dele.

Aghbashlo et al. (2008) fazendo uma análise de desempenho de um secador contínuo semi-industrial na secagem de fatias de cenoura, determinou a energia utilizada, usando o princípio da conversão de energia, com a equação:

$$En = \frac{\dot{m}_{ai}h_{ai} + \dot{m}_p h_p - \dot{m}_{as}h_{af} - \dot{m}_{ps}h_{ps} - \dot{Q}_{cf}}{\dot{m}_{ai}(h_{ai} - h_{\infty})} \quad (2.37)$$

onde En é a energia utilizada (kJ/s), \dot{m}_{ai} é o fluxo de massa que entra, h_{ai} é a entalpia específica do ar de entrada, \dot{m}_p é o fluxo de massa do produto (kg/s), h_p é a entalpia específica do produto, \dot{m}_{as} fluxo de massa de ar na saída, h_{af} é a entalpia específica do ar na saída, \dot{m}_{ps} fluxo de massa do produto seco, h_{ps} é a entalpia específica do produto seco, \dot{Q}_{cf} é a eficiência do fluxo de calor no secador (kJ/s) e h_{∞} a entalpia específica do ambiente.

2.6.3.2 Balanço de exergia

Como mencionado, a operação unitária de secagem tem relevante importância em várias áreas do conhecimento e consiste, resumidamente, em reduzir a quantidade de líquido (geralmente água) de um material sólido, através de evaporação. Em geral, a secagem é realizada por intermédio de ar quente, como fluido de trabalho, que atravessa o material a secar. Essa corrente de ar quente fornece energia, sob a forma de calor, ao material, transformando a umidade em vapor, o qual é arrastado pela própria corrente de ar. A temperatura do ar quente é limitada pela natureza do material a ser seco. Sendo assim, o fenômeno de secagem é essencialmente dinâmico e corresponde a uma dupla transferência de energia e de massa, regidas por leis físico-químicas.

A otimização do processo de secagem está diretamente ligado ao equipamento utilizado, devendo este ser projetado e selecionado de modo que uma combinação favorável de custo e qualidade final do produto biológico seja atendida. Várias pesquisas foram feitas no sentido de melhorar a eficiência energética de secadores. Uma extensa revisão da literatura concernente a este assunto pode ser encontrada em Strumillo e Lopez (1987). Boa parte desses estudos, entretanto, restringe-se as análises 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 pela 2ª Lei da Termodinâmica

(análise exergetica). Todos os fenômenos naturais são irreversíveis, dentre eles a secagem. Esses fenômenos causam perda de exergia, contribuindo desta forma para a redução do efeito útil do processo. As desvantagens da análise energética são descritas e discutidas por vários autores (Kotas, 1985; Zhang e Wang, 1992).

Exergia termodinâmica é um conceito que mede a quantidade máxima de trabalho útil que podem ser extraídas quando o sistema é posto em equilíbrio (térmico, mecânico e químico) reversivelmente com condições ambientais ($T_o = 298,15K$, $P_o = 1,013$ bar) (Flynn et al., 1984). Como consequência do seu grande potencial para a otimização de sistemas e processos, nas últimas décadas, a análise exergetica tem recebido uma atenção crescente na literatura. Dentre vários trabalhos, pode-se citar (Flynn et al., 1984; Alkidas, 1988; Rakopoulos et al., 1993; Rakopoulos, 1997; Nakonieczny, 2002).

A disponibilidade ou exergia de um sistema em um determinado estado é definida como o máximo trabalho reversível que pode ser produzido através da interação do sistema com o seu entorno, uma vez que atingem os equilíbrios térmicos, mecânicos e químicos (Bejan, 1988; Boehm, 1987; Gyftopoulos e Beretta, 1991; Moran e Shapiro, 1992).

Uma análise energética permite estimar as perdas de energia ou calor, mas não dá informações sobre a melhor conversão de energia. Ao contrário, a Segunda Lei de Termodinâmica mostra que nem toda a energia consumida em um sistema pode ser convertida em trabalho útil. Por isso, fornecem a base para a definição de parâmetros que facilitem a avaliação do valor máximo atingido em trabalho por um determinado sistema, com diferentes fontes de energia (Utlu e Hepbasli, 2007).

Para qualquer estado particular, de qualquer corrente, o fluxo de exergia é calculado baseado em três variáveis que são pressão, temperatura e potencial químico, adicionada da exergia devido às energias cinética e potencial, quando estas forem levadas em consideração. Nestes termos, o fluxo de exergia para um dado estado será descrito por:

$$\dot{E}x_f = \dot{E}x_f^{AT} + \dot{E}x_f^{AP} + \dot{E}x_f^{Ch} + \dot{E}x_f^K + \dot{E}x_f^P \quad (2.38)$$

onde $\dot{E}x_f^{AT}$ é a exergia de fluxo devido a diferença de temperatura, $\dot{E}x_f^{AP}$ é a exergia de fluxo devido a diferença de pressão, $\dot{E}x_f^{Ch}$ é a exergia química, $\dot{E}x_f^K$ é a exergia de fluxo devido a energia cinética, $\dot{E}x_f^P$ é a exergia de fluxo devido a energia potencial. A exergia de fluxo é igual ao trabalho máximo que pode ser obtido quando o fluxo de massa é trazido de seu estado inicial até o estado de equilíbrio inativo, em um processo que envolve interação apenas entre o fluxo de massa e o ambiente (Kotas et al., 1995). Considerando um volume de controle sobre o qual é penetrado um fluxo de massa \dot{m} , transferência de calor q e fluxo de trabalho (Potência) \dot{W} , e admitindo que:

- o regime de escoamento dos fluxos de massa é permanente;
- o ar já se encontra aquecido na entrada do volume de controle (VC), na superfície de controle (SC) ou fronteira. Neste caso o calor fornecido ao ar não atravessa a fronteira do sistema e, portanto, a exergia referente ao mesmo é nula;
- o ar já se encontra na entrada do VC, com velocidade e pressão, as quais foram geradas pelo trabalho fornecido ao ventilador (sendo então não considerada a exergia devido a este trabalho de eixo, uma vez que o mesmo não atravessa a SC);
- não existe variação apreciável de altura com relação a um nível de referência (sendo então bastante razoável negligenciar a variação da energia potencial do processo, e com ela, a variação da exergia potencial);
- a variação da exergia química dos tijolos seja desprezível (existem dificuldades quando se deseja determinar a exergia química do produto para o qual a composição química na saída do secador não é conhecida); pode-se então fazer uma análise exérgica do processo de secagem no volume de controle considerado.

O sistema térmico é caracterizado pelo uso de um potencial de secagem, imposto ao produto na forma de diferença de temperatura e concentração de água no ar, estabelecida por uma exergia proveniente de uma fonte de calor. Aplicando a 2ª Lei da termodinâmica ao volume de controle (VC), o balanço de exergia será:

$$\dot{E}x^Q + \sum_c (\dot{E}x_c) = \frac{dEx}{dt} + \sum_s (\dot{E}x_s) + \dot{W}_{v\dot{v}lq} + \dot{I} \quad (2.39)$$

Considerando as hipóteses admitidas tem-se:

$$\dot{E}x^Q + \sum_c (\dot{E}x_c) = \sum_s (\dot{E}x_s) + \dot{W}_{v\dot{v}lq} + \dot{I} \quad (2.40)$$

sendo

$$\dot{I} = (\dot{E}x_{ac} - \dot{E}x_{as}) + (\dot{E}x_{pc} - \dot{E}x_{ps}) - \dot{W}_{v\dot{v}lq} + \dot{E}x^Q \quad (2.41)$$

onde $I = T_0 S_g$ é a Taxa de geração de entropia e S_g é a geração de entropia.

Nas análises, energética e exergetica, é importante compreender a diferença entre eficiência energética e exergetica. Isto é essencial para analisar a qualidade e quantidade da energia utilizada para atingir um determinado objetivo de fato. Os conceitos de exergia, energia disponível e disponibilidade são essencialmente semelhantes. Os conceitos de perda de exergia, irreversibilidade e perda de trabalho também são essencialmente semelhantes. Para qualquer processo de fluxo constante em um sistema, durante um intervalo de tempo, o balanço de exergia pode ser escrito como segue (Utlu e Hepbasli, 2005):

$$\text{Exergia de entrada} - \text{Exergia de saída} - \text{Exergia consumida} = \text{Exergia acumulada} \quad (2.42)$$

A eficiência exergetica (segunda lei) pode ser definida da seguinte forma:

$$ex = \text{Exergia no produto} / \text{Total de exergia de entrada} \quad (2.43)$$

A eficiência exergetica (ex), frequentemente, dá uma melhor compreensão do desempenho do que a eficiência energética (η).

Diferentes maneiras de formular a eficiência exergética (segunda lei da eficácia, ou eficiência racional), são propostas na literatura: Cornelissen (1997), para as mais variadas aplicações e, Hepbasli e Akdemir (2004) para um sistema de bomba de calor. A definição da eficiência racional por Reistad (1975) e Kotas (1985) como a razão entre a exergia desejada que sai e a exergia utilizada é como sugere:

$$\epsilon_X = \frac{Ex_{desejada}}{Ex_{usada}} \quad (2.44)$$

onde $Ex_{desejada}$, é a transferência de toda a exergia para o sistema, que deve ser considerada como a exergia de saída, além de qualquer subproduto que é produzido pelo sistema, enquanto é exigido a exergia de entrada para o processo ser executado.

A eficiência exergética também pode expressa como segue (Torres e Gallo, 1998):

$$\epsilon_X = \frac{\text{Efeito exergético desejado}}{\text{Exergia utilizada para conduzir o processo}} = \frac{\text{Produto}}{\text{Combustível}} \quad (2.45)$$

Para definir a eficiência exergética, tanto o produto como o combustível para o sistema é identificado e analisado. O produto representa o resultado desejado para o sistema (potência, vapor de água, algumas combinação de energia e vapor, etc.). Assim, a análise do produto deve ser coerente com a finalidade de comercialização e do uso do sistema. O combustível representa os recursos gastos para produzir o produto e não é necessariamente restrito a ser um combustível (gás natural, óleo ou carvão). Tanto o produto quanto o combustível podem se expressos em termos de exergia (Moran, 1999).

Corzo et al. (2008) define a eficiência exergética como sendo a relação de exergia utilizada na secagem do produto pela exergia do ar de secagem fornecida ao sistema.

$$\varepsilon_x = \frac{\text{Exergia do fluxo} - \text{Exergia perdida}}{\text{Exergia do fluxo}} = 1 - \frac{\text{Exergia perdida}}{\text{Exergia do fluxo}} \quad (2.46)$$

Os valores da exergia foram calculados, usando a média das características do trabalho, a partir de um balanço energético da primeira lei da termodinâmica. Para esta finalidade, a forma geral da equação da exergia aplicável para sistemas de fluxo constante (Midilli e Kucuk, 2003) foi empregada como:

$$Ex = m_{\text{perdida}} c_a \left[(T - T_{\text{ref}}) - T_{\text{ref}} \ln \frac{T}{T_{\text{ref}}} \right] \quad (2.47)$$

onde Ex é a exergia, m_{perdida} é a massa que é perdida, T é a temperatura de entrada ou saída e T_{ref} é a temperatura de referência. Aplicando a equação anterior, a exergia do fluxo de entrada e saída pode ser determinado em função da temperatura de entrada ou saída na secagem.

O procedimento básico para análise exérgica da secagem é calculado para valores de exergia em leito fixo e fluxo constante como (Akpınar, 2004; Akpınar et al., 2005 e 2006; Ceylan et al., 2007; Corzo et al., 2008):

$$Ex = \dot{m} c_p \left[(T - T_{\infty}) - T_{\infty} \ln \left(\frac{T}{T_{\infty}} \right) \right] \quad (2.48)$$

onde c_p é o calor específico do produto (kJ/kg°C).

Além disso, devido à perda de calor, a exergia pode ser identificada como se segue (Syahrul et al., 2002; Dincer e Sahin, 2004; Colak e Hepbaslı, 2007):

$$Ex_{\text{perdida}} = \left(1 - \frac{T_{\infty}}{T_{\text{perdida}}} \right) \dot{Q}_{\text{perdido}} \quad (2.49)$$

onde $\bar{T}_{perdida}$ é o valor médio da perda de temperatura.

A eficiência exergética pode ser calculada através da equação:

$$\varepsilon_x = \frac{\sum Ex_i - \sum Ex_{perdida}}{\sum Ex_i} = 1 - \frac{\sum Ex_{perdida}}{\sum Ex_i} \quad (2.50)$$

onde Ex_i é a exergia na entrada e $Ex_{perdida}$, a exergia perdida.

Segundo Syahrul et al., (2002), a eficiência exergética do secador baseado na Segunda Lei da termodinâmica pode ser obtida utilizando um balanço de equação. Essa eficiência prevê uma verdadeira medida do desempenho do sistema de secagem do ponto de vista termodinâmico. Na definição de eficiência exergética, é necessário analisar tanto o produto quanto o combustível. Syahrul et al., (2002) informaram que o produto é a taxa de exergia na evaporação e o combustível é a taxa de exergia do ar de secagem que entra no secador. A eficiência exergética do secador pode ser definida como sendo a razão entre a exergia que sai pela exergia que entra:

$$\varepsilon_x = \frac{Ex_{evap}}{Ex_{ai}} \quad (2.51)$$

onde Ex_{evap} é a taxa de exergia na evaporação (kJ s^{-1}), Ex_{ai} é a taxa de exergia do ar de secagem na entrada (kJ s^{-1}).

A eficiência exergética pode ser definida como a razão de exergia utilizada no produto pela exergia que entra no secador. No entanto, pode ser definido como a razão entre a exergia de saída pela exergia de entrada no secador. Assim, a forma geral de eficiência exergética pode ser escrita como (Midilli e Kucuk, 2003):

$$\varepsilon_x = \frac{Ex_p}{Ex_i} \quad (2.52)$$

A eficiência pelo segundo princípio da Termodinâmica ou simplesmente eficiência exergética é definida por Kotas (1985) como:

$$\varepsilon_x = \frac{\text{Variação de exergia desejada}}{\text{Consumo de exergia necessário para que o processo se realize}} = \frac{\Delta Ex_d}{\Delta Ex} \quad (2.53)$$

Neste sentido, esta definição proporciona uma avaliação ou medida do processo real em termos da mudança de estado. Outra forma de determinação da eficiência exergética de um processo é dada por (Kotas, 1985):

$$\varepsilon_x = \frac{\text{Exergia na saída do volume de controle}}{\text{Exergia na entrada do volume de controle}} \quad (2.54)$$

ou ainda:

$$\varepsilon_x = \frac{\dot{Ex}_{ps} + \dot{Ex}^Q + \dot{Ex}_{as}}{\dot{Ex}_{pe} + \dot{Ex}_{ai} + \dot{W}_{vliq}} \quad (2.55)$$

onde v_{liq} representa o volume de controle líquido

Analisando o secador como um trocador de calor e massa, tem-se a seguinte definição para a eficiência exergética do mesmo:

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta Ex_p}{\Delta Ex_{mínima}} = \frac{\Delta Ex_p}{\dot{m}_{ai}(x_{af} - x_{ai})ex_w^{Ch}} \quad (2.56)$$

A primeira lei da termodinâmica lida com a quantidade de energia e assegura que a energia não pode ser criada ou destruída. A segunda lei da termodinâmica, contudo, trata da qualidade da energia. Mais especificamente, ela está interessada na degradação de energia durante um processo, a geração de entropia, e as perdas de oportunidades para realizar trabalho. Ela tem mostrado ser uma ferramenta muito potente na otimização de sistemas termodinâmicos complexos (Costa, 2007).

Segundo Costa (2007), quando uma nova fonte de energia é descoberta, a primeira coisa que se precisa conhecer é o seu potencial de trabalho, isto é, a quantidade de energia que pode ser extraída como trabalho útil. O resto da energia será eventualmente jogado fora como energia perdida e não é a merecedora de nossa consideração. Assim, é desejável ter uma propriedade que permita determinar o potencial de trabalho útil de uma dada quantidade de energia num dado estado especificado. Esta propriedade é a exergia, que é também chamada de disponibilidade ou energia disponível.

Nos processos de escoamento em regime permanente irreversíveis é convencionalizado que o transporte de massa, calor e trabalho que entra no volume de controle (VC), são positivos. O tipo de interação que ocorre entre um volume de controle e o ambiente depende das características da fronteira do mesmo, que é a separação que existe entre este e a vizinhança, no caso específico, o ambiente. Em alguns casos, pode-se admitir parede adiabática para o volume de controle, obviamente esta adoção é dada pelas suas características, com respeito ao seu estado inicial e final, e da taxa de dissipação produzida entre o mesmo e a vizinhança (Kestin, 1980).

O efeito do aumento da transferência de calor sobre o processo é o aumento da geração de entropia do processo. Além disso, nos processos de aquecimento, a difusão térmica através de um ΔT finito é um processo irreversível intrinsecamente e, portanto, ocorre com geração de entropia, destruindo parte da exergia (Berg 1980). De acordo com Bejan (1980), a transferência convectiva de calor em um meio quimicamente homogêneo é caracterizada por irreversibilidades termodinâmicas de dois tipos: devido a dissipação viscosa (atrito no fluido) e transferência de calor na direção de gradientes de temperatura finitos. Obviamente deve-se levar em consideração

a radiação térmica quando se trabalha com temperaturas elevadas. Nestes casos a transferência de calor radiativa é elevada, sendo então significativa a geração de entropia proveniente desse processo. Os processos químicos dentro do volume de controle são governados pela conservação da massa e pelas leis termodinâmicas Brzustowski (1980), e os processos de mistura são responsáveis por um aumento da destruição de exergia. Do exposto, pode-se concluir ser de extrema importância o conhecimento da variação da exergia do processo de secagem, a qual está ligada diretamente às irreversibilidades do mesmo.

Aproximadamente, há duas décadas, as simulações de secadores eram feitas de forma integral de modo que a influência de diversos parâmetros era difícil de ser avaliada. Atualmente, devido ao rápido e incessante aumento da capacidade de processamento dos computadores, tornou-se possível a utilização de modelos matemáticos refinados para simulação do processo de secagem, possibilitando a previsão dos perfis do ar (fase contínua) dentro do secador, bem como do material (fase dispersa) a ser seco no sistema, além da análise da influência de cada parâmetro na qualidade do produto seco. A simulação do processo pode ser então, utilizada como uma ferramenta em sua otimização, sendo o tempo computacional seu único custo.

Topic (1995) apresenta um modelo matemático para análise exérgica de um sistema industrial em alta temperatura usado na secagem de forragem. Esse modelo permite uma análise qualitativa dos componentes, bem como a utilização de uma linguagem de sistema usando um software. Apresenta a influência dos elementos básicos na variação da exergia com indicadores de qualidade, dependendo de parâmetros importantes.

Syahrul et al. (2003) em seu trabalho, mostram análises do processo de secagem de leite fluidizado úmido com partículas para otimizar as condições de entrada e saída. Eles utilizaram modelos de energia e exergia e estudaram os efeitos e condições hidrodinâmicas e termodinâmicas, tais como a temperatura do ar de admissão, velocidade de fluidização e o efeito da umidade inicial do solo sobre a eficiência energética e exérgica. Esta análise é realizada para diferentes materiais. Verificam-se ótimos resultados entre o modelo e os dados experimentais.

Utlu e Hepbasli (2007), por sua vez, mostraram um estudo sobre análise e avaliação da eficiência e da utilização energética pelos países. Segundo os autores, a primeira lei da Termodinâmica (ou a conservação de energia) avalia as opções energéticas. Segundo esta lei, a energia não é criada nem destruída em qualquer processo físico ou químico, mas apenas transformada de uma forma para outra. Devido ao fato de que a quantidade total de energia permanece constante, a energia perdida por um sistema durante todo o processo é igual à energia adquirida através do sistema.

Favalli et al. (2001), enfatizam a importância da modelagem e simulação no processo de secagem, como ferramenta no auxílio à otimização do processo, na redução de custos às indústrias de cerâmica vermelha e também na redução do tempo para obtenção de resultados em dados experimentais. Como otimização do processo de secagem de cerâmica vermelha, pode-se considerar um reaproveitamento da energia que, na maioria das vezes é desperdiçada para o meio ambiente depois de utilizada nos secadores e fornos de grande parte das indústrias desse setor. Análises, energética e exérgica, perdas térmicas, perdas de carga, viabilidade econômica e custos para implantação devem ser discutidos e analisados (Recco, 2008).

Na literatura, encontram-se inúmeros trabalhos voltados para a recuperação da energia do ar que é perdido para o ambiente no processo de secagem e queima. São muitas as atividades industriais que fazem uso de grandes quantidades de energia térmica, podendo ser frio ou calor. A necessidade de calor sempre é maior, sobretudo na agroindústria e na indústria de transformação, como açúcar e álcool, sucos de frutas, beneficiamento de arroz e de madeira, extração de óleo vegetal, papel e celulose, petroquímica, têxtil, tinturaria, cervejaria, cimento, vidro, cerâmica, produtos químicos e alimentos em geral. Como exemplo do uso da cogeração nas indústrias, pode-se explicitar um pouco mais de sua participação nas indústrias sucroalcooleira, de celulose e papel e de cerâmica.

O processo produtivo nas destilarias de etanol tem como insumos energéticos primários à energia térmica, na forma de calor, e energia mecânica para acionamentos diversos. As necessidades energéticas do processo são atendidas com a geração e distribuição de vapor tendo como combustível básico o bagaço resultante do processamento da cana-de-açúcar. O vapor

gerado nas caldeiras fornece o calor de processo, o trabalho mecânico em turbinas de processo e em turbinas para geração de energia elétrica. O acionamento dos diversos equipamentos é feito através de turbinas a vapor e de motores elétricos (Neto, 2001).

De acordo com Neto (2001), as destilarias são praticamente autônomas em termos do atendimento de suas necessidades energéticas, sendo pequena a parcela de energia elétrica consumida da rede das distribuidoras locais ao longo do ano, predominantemente nos períodos da entressafra. No ciclo a vapor, o bagaço proveniente da seção de extração com umidade da ordem de 50% alimenta a fornalha das caldeiras. O vapor primário produzido é empregado diretamente para o acionamento de equipamentos através de turbinas a vapor, normalmente de simples estágio e contrapressão, entre eles os picadores, os desfibradores, os termos da moenda, a bomba de alimentação da caldeira e os geradores de energia elétrica.

Os índices de produção e os consumos específicos de insumos energéticos para a produção de etanol em destilarias variam de acordo com a capacidade de produção total da planta, bem como, em função das tecnologias empregadas. Está entre os índices de maior relevância para este trabalho o calor, o acionamento mecânico e a energia elétrica requeridos.

As usinas de açúcar e álcool no Brasil, assim como em muitas outras regiões, apresentam consumos de vapor para os processos na ordem de 500 kg de vapor por tonelada de cana processada. Nestas condições quase todo o bagaço disponível é consumido com geração de vapor a 2,2 MPa e 300°C, pode-se produzir quase a totalidade da energia elétrica e mecânica requerida, com turbinas de contrapressão, para as necessidades da indústria (Oliveira, 2003). Ficam equilibradas a disponibilidade de combustível e os requerimentos de potência e energia térmica.

As cadeias produtivas do etanol são praticamente auto-suficientes em termos energéticos. 98% das suas necessidades energéticas são atendidas pelo bagaço da cana-de-açúcar, dividindo-se os 2 % restantes em diesel, álcool, lenha, energia elétrica comprada e gasolina. A lenha é utilizada nas partidas das caldeiras, o diesel, o álcool e a gasolina são utilizados no transporte da matéria-prima e a energia elétrica comprada para acionamento de motores e iluminação (Neto 2001).

Usinas de açúcar de beterraba e destilarias de álcool de milho são, em geral, muito mais eficientes na geração e uso de energia que as indústrias baseadas em cana-de-açúcar porque, não tendo o bagaço como combustível, consomem combustível externo (carvão, gás, óleo). Embora mais eficientes no consumo energético, no cômputo geral das emissões de carbono e outros estas usinas apresentam um benefício muito inferior que as unidades sucroalcooleiras brasileiras.

Sendo assim, segundo Oliveira (2003), simplesmente utilizando técnicas já disponíveis, com as adaptações adequadas, é possível reduzir muito o consumo de energia nas indústrias que processam cana-de-açúcar no Brasil e elevar ainda mais os benefícios ambientais desta cultura convertendo o desperdício em energia elétrica útil.

Um estudo realizado por Clementino (2001) mostra que, o segmento de papel e celulose apresenta características particularmente interessantes para a viabilização da cogeração, pois apresenta um elevado consumo de vapor de processo e eletricidade. Assim sendo, seu potencial de cogeração é expressivo, podendo as indústrias atingir a auto-eficiência ou mesmo gerarem excedentes, com as tecnologias disponíveis comercialmente no país. Durante o processo de fabricação de celulose, vários subprodutos na forma de biomassa (entre eles têm-se as cascas e a lixívia) são formados e, portanto, as indústrias produtoras de celulose apresentam uma maior porcentagem de eletricidade proveniente da cogeração, sendo praticamente auto-suficientes.

Para estas indústrias, foi avaliado o potencial de cogeração tanto com tecnologias disponíveis comercialmente como com tecnologias mais avançadas. Verificou-se que, neste caso, pode-se atingir a auto-suficiência energética ou mesmo gerar excedentes de eletricidade para venda à rede, sem necessidade de compra de combustível complementar (Clementino, 2001).

Na indústria de cerâmica, consome-se energia térmica nos atomizadores, secadores e fornos e energia elétrica nos moinhos, prensas e outros equipamentos. Sendo este um dos setores onde o custo da energia tem uma repercussão importante no produto final, a cogeração possibilita uma considerável melhoria na fatura energética e, como tal, uma maior competitividade nos mercados internacionais. Além disso, é um tipo de indústria onde os períodos de retorno do investimento são mais curtos, oscilando entre 1 e 3 anos (Oliveira, 2003).

É muito interessante a cogeração nos setores mais dinâmicos e em expansão do setor terciário, com escala compatível às tecnologias de cogeração. Da mesma forma, nos centros de grande densidade populacional e de controle ambiental mais crítico, aplicação das técnicas de cogeração em hotéis, hospitais, clubes, penitenciárias, aeroportos e demais estabelecimentos que consomem moderadamente energia sob a forma de calor (ou refrigeração) e eletricidade em volumes significativos, não somente se viabiliza como proporciona redução dos custos e melhoria da produtividade.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Metodologia experimental

3.1.1 Análise química e mineralógica

A matéria-prima investigada nesse trabalho é a argila utilizada na fabricação de tijolos cerâmicos da Indústria Cerâmica Cincera localizada na cidade de Santa Rita-PB.

A princípio, a argila foi secada em estufa a 100°C, desintegrada, peneirada em malha nº 200 e caracterizada, em termos de composição química e mineralógica, comportamento térmico e distribuição de tamanho de partícula. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Cerâmica da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

Para realização da caracterização granulométrica, foi realizado o ensaio por difração a laser de acordo com as instruções operacionais do granulômetro Cilas 1064 LD (2007). A amostra foi passada em peneira ABNT nº 200 e dispersa em 150 ml de água destilada com o defloculante hexametáfosfato de sódio na proporção indicada pela norma ABNT (1984). A preparação da dispersão foi realizada em agitador Hamilton Beach N5000 à velocidade de rotação de 17.000 rpm por 20 min. Em seguida, esta dispersão foi submetida a repouso por 24

horas; após este período a dispersão foi novamente agitada por 5 min e colocada no equipamento CILAS modelo 1064 (Figura 3.1), em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência.

A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser (Figura 3.1). Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.



Figura 3.1 - Granulômetro a laser. (CILAS 1064)

A análise por difração de Raios-X da amostra, na forma seca, foi realizada em equipamento XRD 6000 da Shimadzu (Figura 3.2). A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (cobre) (40kV/30mA); a velocidade do goniômetro foi de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$. As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Cerâmica da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais do CCT/UFCG, Campina Grande, PB.

As análises térmicas diferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) das amostras foram realizadas em equipamento BP Engenharia Modelo RB 3000 (Figura 3.3), operando a $12,5^\circ\text{C}/\text{min}$. A temperatura máxima utilizada nas análises térmicas foi de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.



Figura 3.2 - Difratômetro de Raio-X



Figura 3.3 - Equipamento utilizado para as análises térmicas

3.1.2 Experimentos de secagem em estufa

Visando verificar a influência da temperatura e umidade relativa do ar, na umidade e temperatura do tijolo e também outros efeitos nas suas principais propriedades durante a secagem, foram realizados experimentos em estufa, no Laboratório Experimental de Térmica e Fluido, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande-PB. Todos os procedimentos e descrições dos materiais e equipamentos utilizados são apresentados a seguir.

A princípio foi feita uma visita à Cerâmica Cincera, localizada na cidade de Santa Rita-PB para o acompanhamento de um período completo de secagem de tijolos furados (os mesmos utilizados neste trabalho), no secador industrial tipo túnel contínuo daquela empresa. Ao mesmo tempo, foram coletadas amostras dos mesmos tijolos, para secagem em estufa no Laboratório Experimental de Térmica e Fluido, na Universidade Federal de Campina Grande, com o intuito de obter dados para ajudar na simulação da secagem no secador industrial. A autorização para o acompanhamento da secagem, assim como a aquisição do material coletado (tijolos) foi gentilmente cedida pelo diretor da empresa Cerâmica Cincera, o Sr. Telêmaco de Assunção Santiago Neto.

⇒ **Procedimento e materiais**

Os materiais verdes, usados como amostras (tijolos), para a secagem na estufa têm dimensões 20x9x19cm (Figura 3.4) e características dos tijolos utilizados na secagem em secador industrial da Cerâmica Cincera.



Figura 3.4 - Tijolo cerâmico utilizado no experimento

Os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm (Figura 3.5);
- b) Balança digital KC-01 com precisão de aproximadamente 1 grama (Figura 3.6);
- c) Termômetro de infravermelho com escala de -50 a 1000°C TI 890 (Figura 3.7);
- d) Termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208 (Figura 3.8);
- e) Escalímetro com precisão de 1 mm;
- f) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura (Figura 3.9).

A Tabela 3.1 mostra detalhadamente a precisão com que atua o termômetro infravermelho.

Tabela 3.1 – Especificações do termômetro infravermelho.

Escala (automática)	Precisão
-50 ~ -20°C	$\pm 5^{\circ}\text{C}$
- 20 ~ 200°C	$\pm 1,5\%$ da leitura $\pm 2^{\circ}\text{C}$
201 ~ 538°C	$\pm 2\%$ da leitura $\pm 2^{\circ}\text{C}$
539 ~ 750°C	$\pm 3\%$ da leitura $\pm 5^{\circ}\text{C}$



Figura 3.5 – Paquímetro digital

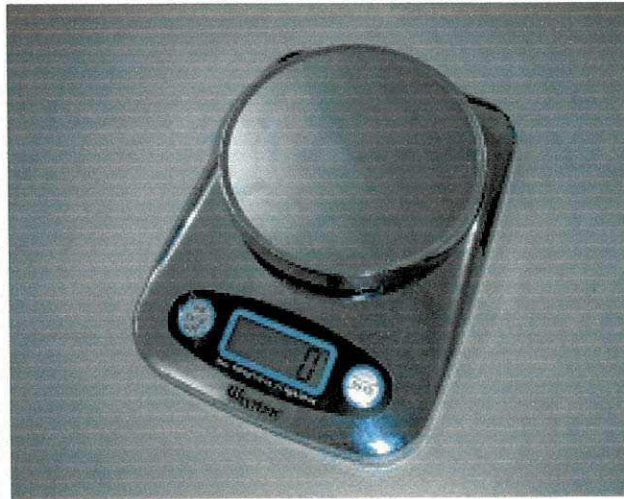


Figura 3.6 – Balança digital



Figura 3.7 – Termômetro digital, modelo TI – 890.

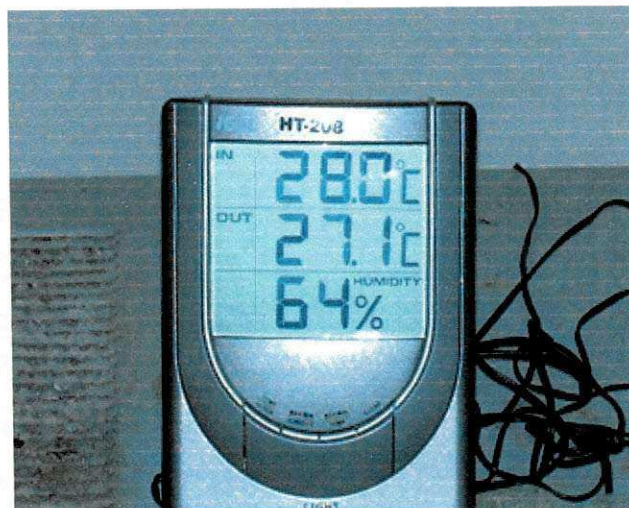


Figura 3.8 - Termohigrômetro digital



Figura 3.9 – Estufa com circulação de ar forçada

Os seguintes procedimentos foram adotados:

- a) Inicialmente, as dimensões, temperatura e massa do tijolo úmido, bem como a umidade relativa e temperatura do ar ambiente foram obtidas;
- b) Após o procedimento do item a, a amostra foi colocada no interior da estufa, que inicialmente foi ajustada numa temperatura de 50°C;
- c) Ao longo do tempo, aproximadamente 24 horas, em intervalos pré-determinados, foram quantificadas as dimensões, massa e temperatura do tijolo e temperatura e umidade relativa do ar ambiente externo à estufa. A temperatura da superfície externa do tijolo foi medida no vértice;
- d) Em intervalos pré-especificados, de acordo com a perda de umidade, a temperatura da estufa foi variada ao longo do tempo de secagem, desde 50°C, passando por 64°C, 78°C, 92°C e 100°C, e a partir daí, reduzida para 94°C, 88°C, 82°C e 80°C, num período de tempo entre 0 e 1440 minutos, tentando reproduzir as condições experimentais reais existentes no secador industrial da Cerâmica Cincera;
- e) Dentro da estufa foi colocado um recipiente com água, suficiente para manter a umidade relativa do ar no interior da estufa em torno de 85% no início do processo, condições estas próximas daquela existente no secador industrial.

Com o objetivo analisar a influência da temperatura e umidade relativa, foi realizado um experimento numa temperatura fixa de 100°C com umidade relativa de 1,5%, aproximadamente. Seguiram-se os mesmos procedimentos citados acima exceto o item d e o item e.

3.1.3 Experimentos de secagem em secador industrial

Para a secagem dos tijolos no secador industrial tipo túnel contínuo de fluxo cruzado da Indústria Cerâmica Cincera, foram coletados dados de 3 amostras, posicionadas no centro de três faces laterais do vagoneta, na quinta fileira de baixo para cima, conforme a Figura 3.10 e localizadas da seguinte forma: a) a amostra 1: na face que recebe diretamente o ar de secagem; b) amostra 3: na face oposta a que recebe o ar; c) amostra 2: na face frontal do vagoneta.

Os seguintes procedimentos foram adotados:

- a) Inicialmente as dimensões, temperatura e massa de três tijolos úmidos, bem como a umidade relativa e temperatura do ar ambiente foram obtidas;
- b) Após o procedimento do item a, as amostras foram colocadas no interior das vagonetas (carrinhos que servem para transportar os tijolos no interior do secador) em três posições distintas, e em seguida foram inseridas no secador, em posições estratégicas, conforme Figura 3.10;
- c) Foi medida a temperatura e velocidade do ar de secagem na entrada do secador. A velocidade do ar foi medida com um anemômetro de palhetas com leitura digital marca AMI 300 marca Instrutemp com precisão de leitura de $\pm 2\%$ (Figura 3.11);
- d) Na saída do secador (após 24 horas aproximadamente), foram quantificadas novamente a massa, a temperatura e as dimensões dos tijolos, bem como a temperatura do ar de secagem.

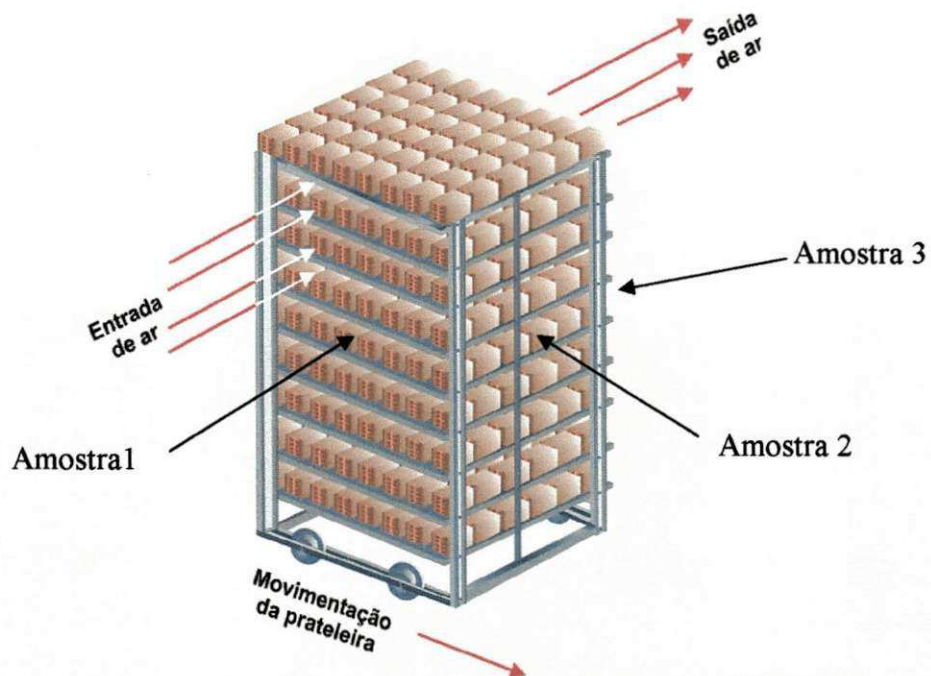


Figura 3.10 – Posição das amostras na vagoneta utilizadas nos experimentos no secador industrial.



Figura 3.11 – Anemômetro de palhetas com leitura digital

O secador industrial (Figuras 3.12 e 3.13) é do tipo túnel medindo $73 \times 3,30 \times 5,10\text{m}^3$ com dois ventiladores que auxiliam no direcionamento do ar de secagem ao produto, sendo a secagem controlada basicamente em função do teor de umidade do produto. A capacidade aproximada do secador é de 48 vagonetas (Figuras 3.12 e Figuras 3.14-3.17), sendo 24 em cada lado no interior do secador, ao longo de seu comprimento, usadas para transportar o produto através de trilhos e movidas por pistão. Essas vagonetas permanecem uma após a outra no secador conforme o controle da secagem.

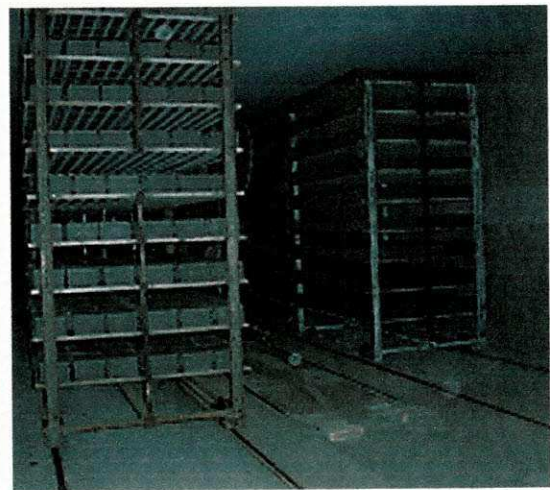
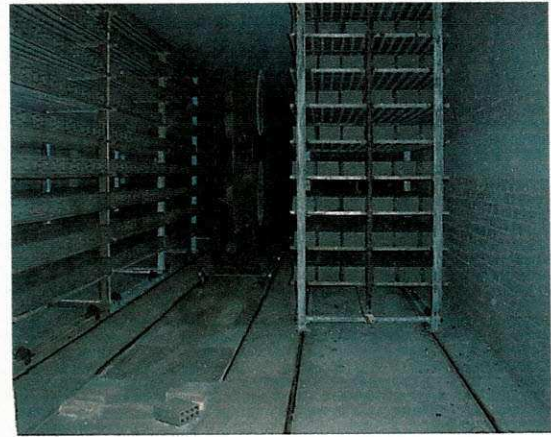


Figura 3.12 – Vagonetas usadas na secagem no secador industrial



Figura 3.13 – Vista externa do secador industrial.

As vagonetas têm em média 1008 tijolos, os tijolos têm a forma geométrica de um paralelepípedo com oito furos de formas semelhantes. Cada tijolo mede em média 19 cm de comprimento, 19 cm de altura e 9 cm de largura, dispostos na vagoneta da seguinte forma: 7 tijolos na largura, 16 ao longo de seu comprimento e 9 tijolos ao longo de sua altura. As vagonetas têm dimensões de 2,08 m de comprimento, 1,40 m de largura e 2,86 m de altura. Os ventiladores também são transportados através de uma vagoneta e impulsionados por pistão, deslocando-se com velocidade constante e sincronizada. Detalhes mais específicos do processo estão descritos no capítulo 4 deste trabalho.

3.2 Metodologia numérica

Esse item é direcionado à modelagem matemática e simulação numérica da secagem de materiais cerâmicos, em particular tijolos com furos em forma de paralelepípedo, em um secador de fluxos cruzados. Nessas condições, é apresentado um modelo melhorado baseado no modelo da Universidade Estadual de Michigan. A diferença está na realização dos 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 propriedades variáveis, porosidade e condensação do vapor de água no produto, fornecendo equações adequadas para descrever o processo de secagem. Além disso, o item traz ainda, equações que representam as eficiências, energética e exergética, do secador tipo túnel de fluxos cruzados.

3.2.1 Modelagem matemática

A fenomenologia associada ao processo de secagem leva em conta aspectos microscópicos da peça de argila juntamente com aspectos macroscópicos do ambiente ao qual esta está exposta, a modelagem matemática da secagem é complicada. Assim, uma série de hipóteses simplificadoras deve ser criteriosamente tomada a fim de garantir a “computacionabilidade” do problema e a qualidade da solução.

O secador apresentado recebe o ar para secagem, reutilizado do forno, com temperatura aproximada de 110°C que chega ao produto por canais internos e na direção de baixo para cima conforme mostra a Figura 3.14.

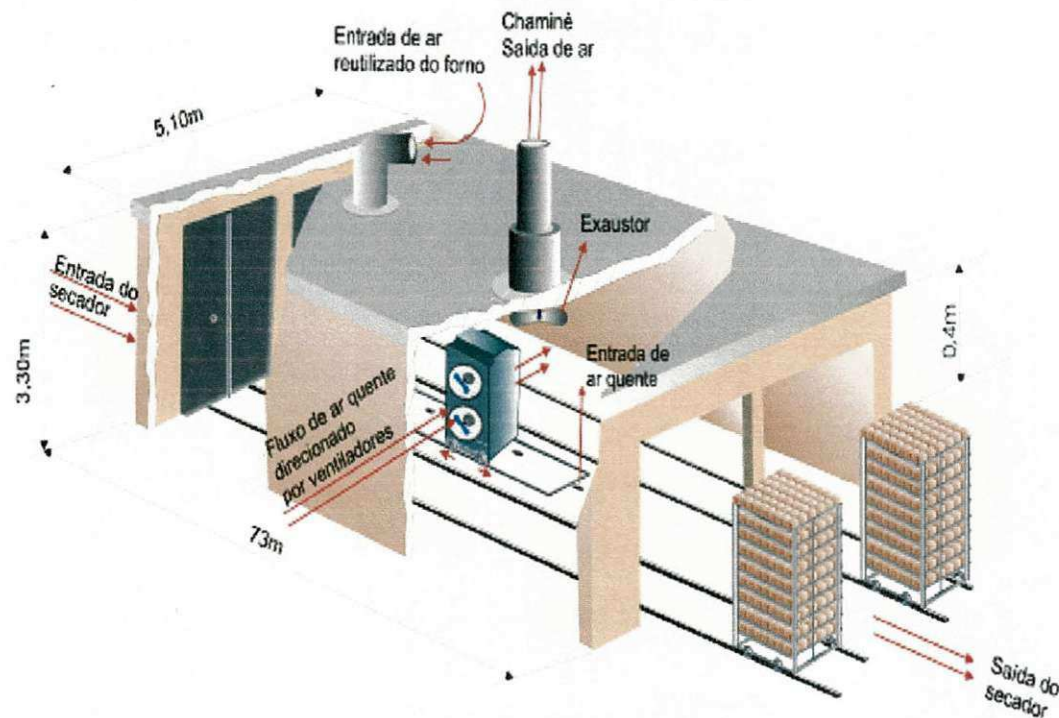


Figura 3.14 – Vista esquemática do secador industrial

Os tijolos são postos na entrada do secador e são transportados ao longo do secador através de vagonetas movidas por pistão e com mesma velocidade de deslocamento, formando uma fileira contínua. Estas vagonetas contendo tijolos (Figuras 3.15, 3.16 e 3.17) são submetidas a um fluxo de ar perpendicular oriundo de ventiladores, conforme Figuras 3.16 e 3.17. O tempo de secagem, a velocidade do ar e a velocidade da vagoneta são definidas de forma empírica a partir das condições finais do processo como, por exemplo, a umidade e a aparência do tijolo.

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

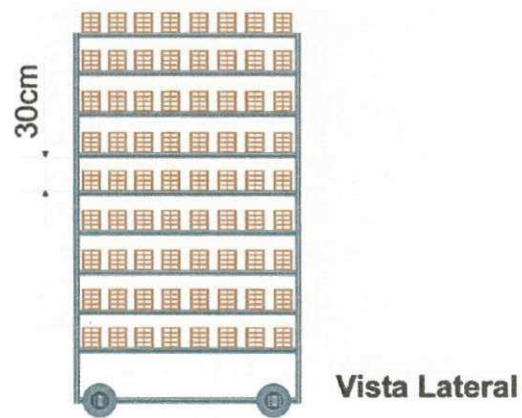
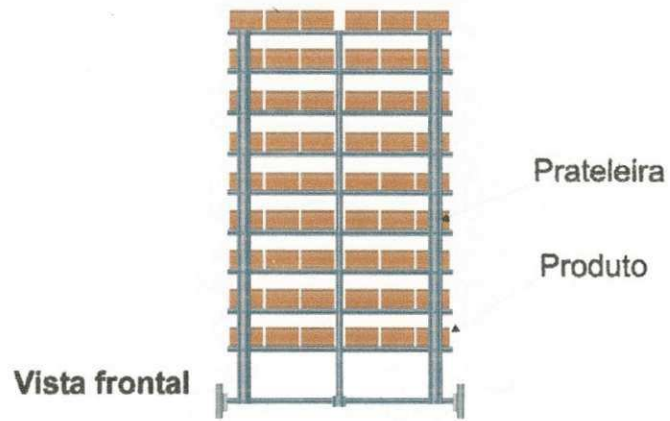


Figura 3.15 – Vistas frontal e lateral da vagoneta

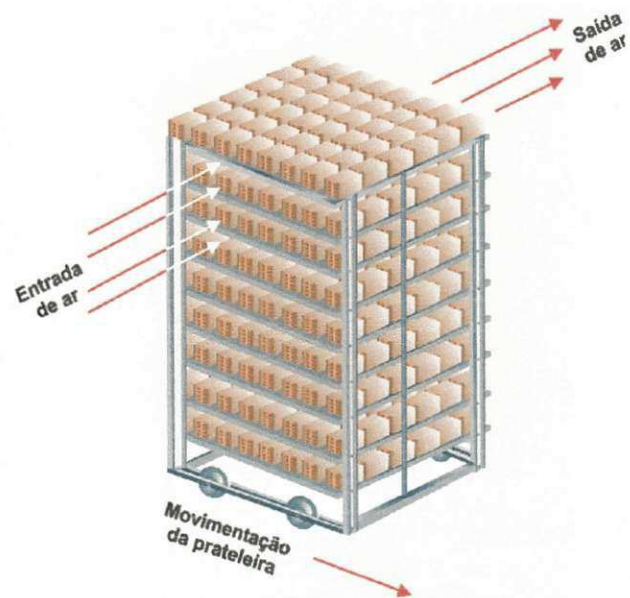


Figura 3.16 – Vista angular da vagoneta.

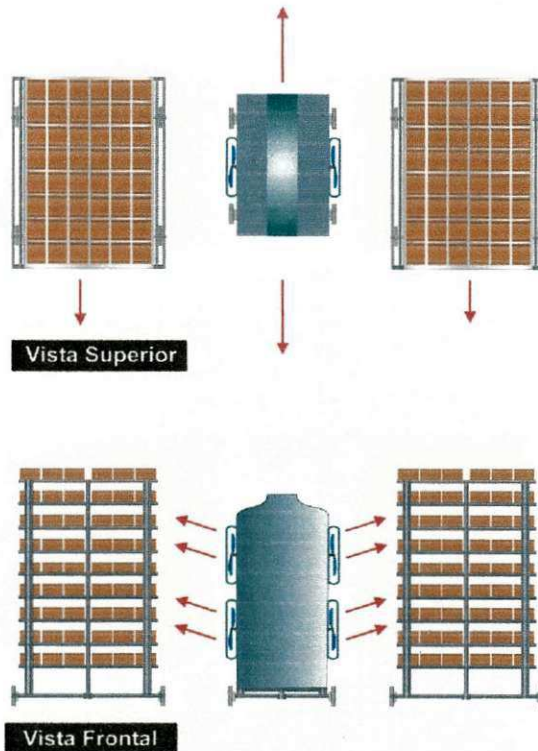


Figura 3.17 – Vista superior e frontal das vagonetas.

Para a modelagem matemática que define a transferência de energia e massa entre o produto e o ar no processo, são consideradas as Figuras 3.18 e 3.19. Na Figura 3.18, tem-se um esquema de um secador túnel tipo contínuo de fluxos cruzados e na Figura 3.19, tem-se uma fração volumétrica desse secador.

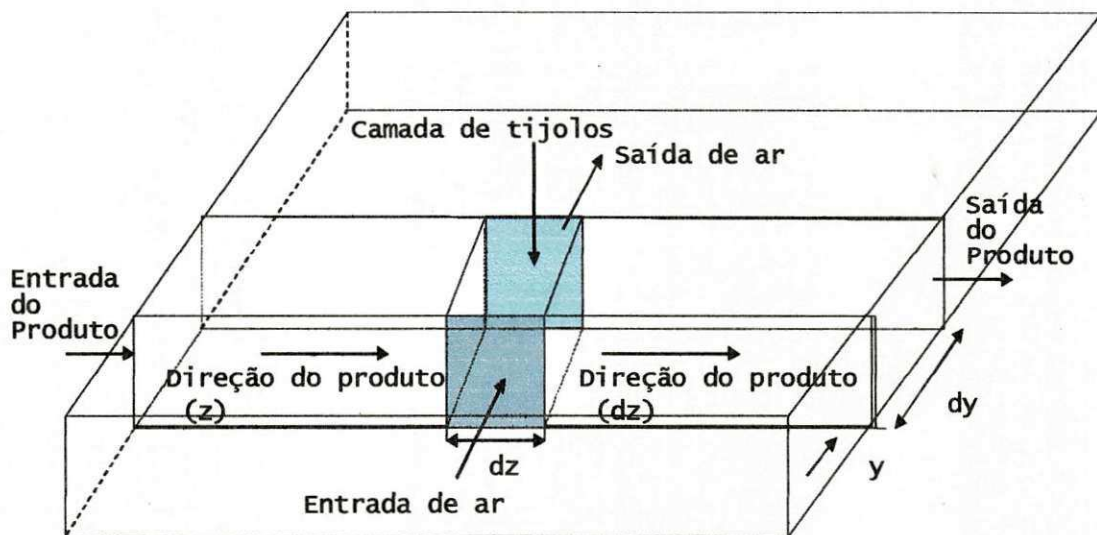


Figura 3.18 - Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado.

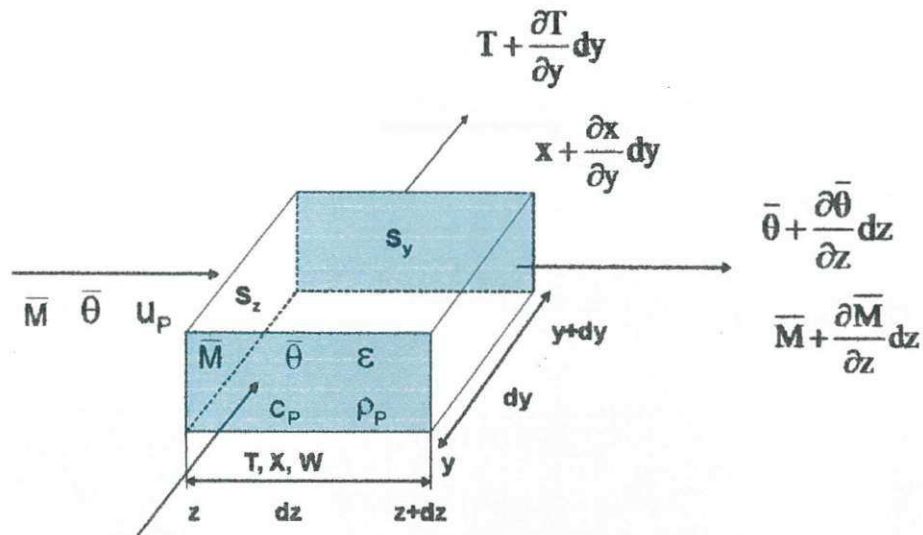


Figura 3.19 - Volume infinitesimal de sólido na camada.

Levando-se em consideração a Figura 3.19, podem-se obter as seguintes equações:

- **Balanco de energia para o ar**

A energia que entra na área S na posição y, menos a energia que sai da área S na posição y + dy, é igual à energia transferida ao produto, por convecção, mais a variação, com relação ao tempo da energia do ar nos espaços vazios. Desta forma, pode-se escrever:

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

simplificando a Equação (3.1), tem-se:

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

ou ainda,

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

logo

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

Pode-se ainda escrever a equação anterior da seguinte forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\vec{V}}{\varepsilon} T\right) = -\frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{\varepsilon (\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.5)$$

Para as equações seguintes, têm-se procedimentos semelhantes.

- **Balanco de energia para o produto**

A energia transferida por convecção, do ar para o produto, é igual à energia requerida para aquecer o produto, mais a energia requerida para evaporar a água do produto, adicionada a energia requerida para aquecer o vapor da água evaporada. Desta forma tem-se a seguinte equação:

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

ou ainda,

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} + \frac{[h^*_{fg} + c_v (T - \bar{\theta})]}{(\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M})} \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.7)$$

- **Balanco de massa para o ar**

A quantidade de vapor de água que entra na área S na posição y, menos a quantidade de vapor de água que sai da área S na posição y+dy, mais a variação da umidade do ar nos espaços vazios, são iguais à umidade cedida pelo produto. Tem-se a seguinte equação:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a x) + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{w}{\varepsilon} x \right) = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.8)$$

• **Balanco de massa do produto**

O teor de umidade do produto pode ser obtido usando-se uma equação empírica de camada fina, apropriada para cada produto. Neste estudo o tijolo cerâmico furado é o produto base para a pesquisa. Neste caso, utiliza-se a equação 3.9 reportada por Page (1949) em seus experimentos, por apresentar melhor ajuste para descrever a secagem do tijolo furado.

$$\bar{M} = M_o a_1 e^{-a_2 t^{a_3}} \quad (3.9)$$

Derivando a Equação (3.9), obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = -M_o a_1 a_2 a_3 t^{a_3-1} e^{-a_2 t^{a_3}} \quad (3.10)$$

onde os parâmetros a_i são obtidos a partir de dados experimentais.

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 assim definidos:

$$h_{fg} = 352,8(374,14 - T)^{0,33052} \text{ (kJ/kg) (Pakowski et al., 1991)} \quad (3.11)$$

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

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

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

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

$$A^* = \frac{A_p(1-\epsilon)}{V_p} = 40,34 \text{ m}^2/\text{m}^3$$

$$\epsilon = 0,864401$$

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

A Figura 3.20 representa um esquema do tijolo cerâmico vazado, com suas dimensões, utilizado nos experimentos de secagem em estufa e secador industrial.

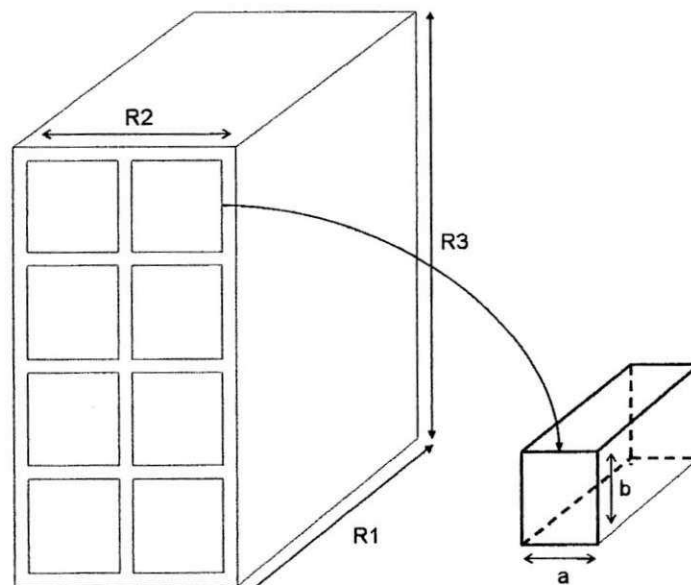


Figura 3.20 – Esquema do tijolo utilizado nos experimentos.

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:

$$A_c = A_L + A_I \tag{3.12a}$$

$$V = V_T - V_f \quad (3.12b)$$

onde A_L corresponde a 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) e V_f o volume dos furos.

O calor específico do ar (Jumah et al., 1996), densidade do ar, temperatura absoluta, constante universal do ar, umidade relativa, pressão de saturação de vapor e pressão atmosférica local (Rossi, 1987), são determinadas por:

$$c_a = 1,00926 - 4,04033 \times 10^{-5} T_a + 6,17596 \times 10^{-7} T_a^2 - 4,0972 \times 10^{-10} T_a^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.13)$$

$$\rho_a = \frac{P_{atm} M_a}{RT_{abs}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.14)$$

$$T_{abs} = T_a + 273,15K$$

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

$$UR = \frac{P_{atm} x_a}{(x_a + 0,622)P_{vs}} \quad (3.15)$$

$$P_{vs} = 22105649,25 \text{Exp}\{[-27405,53 + 97,5413T_{abs} - 0,146244T_{abs}^2 + 0,12558 \times 10^{-3} T_{abs}^3 - 0,48502 \times 10^{-7} T_{abs}^4] / [4,34903T_{abs} - 0,39381 \times 10^{-2} T_{abs}^2]\} \text{ (Pa)} \quad (3.16)$$

$$P_{atm} = 101325 \text{ Pa}$$

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

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \times 10^{-2} T_{abs} - 3,5047 \times 10^{-5} T_{abs}^2 + 3,6010 \times 10^{-8} T_{abs}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.17a)$$

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \times 10^{-3} T_{\text{abs}} + 0,84386 \times 10^{-6} T_{\text{abs}}^2 - 0,26966 \times 10^{-9} T_{\text{abs}}^3 \text{ (kJ/kgK)} \quad (3.17b)$$

A princípio foi usado, nas equações, um coeficiente de transferência de calor supondo o tijolo como placa plana. Este coeficiente é dado por (Incropera e De Witt, 2002).

$$h_c = (k_a/R_1)(0,023\text{Re}^{4/5}\text{Pr}^{1/3})(\text{W/m}^2\text{°C}) \quad (3.18)$$

onde $\text{Re} = \frac{\rho_a w_a R_1}{\mu_a}$ é o número de Reynolds, $\text{Pr} = \frac{c_a \mu_a}{k_a}$ o número de Prandtl e R_1 é o comprimento característico.

No entanto, alguns resultados, como por exemplo, o aquecimento do tijolo, mostrou-se fisicamente inadequados.

Na persistência da busca por resultados coerentes e fisicamente reais, utilizou-se a seguinte equação, que pode ser usada para dutos não-circulares de forma retangular, similar a geometria do tijolo furado, objeto de estudo do nosso trabalho:

$$h_c = (k_a/D_h)(0,023\text{Re}^{4/5}\text{Pr}^{1/3})(\text{W/m}^2\text{°C}) \quad (3.19)$$

onde D_h é o diâmetro hidráulico, comprimento característico do tijolo (em forma de paralelepípedo). A velocidade da vagoneta usada nas simulações foi $u_p = 0,00088$ m/s, baseando-se em dados experimentais obtidos em um secador industrial tipo túnel.

O diâmetro hidráulico (D_h) serve basicamente para cálculos no caso de tubo ou duto de seção não-circular. Nesse caso, considera-se uma seção circular com um diâmetro que faça o mesmo efeito da seção não-circular. Esse diâmetro pode ser determinado, conforme a seção transversal em estudo, por exemplo:

$$D_h = D \text{ (para dutos de seção circular);} \quad (3.20)$$

$$D_h = D_1 - D_2 \text{ (para dutos em forma de anel circular);} \quad (3.21)$$

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \text{ (para dutos em forma retangular, que é o caso de tijolo furado);} \quad (3.22)$$

$$D_h = \frac{D_1^2 - nD_2^2}{D_1 - nD_2} \text{ (para duto circular com n dutos menores e também circulares).} \quad (3.23)$$

onde D é o diâmetro do duto de seção circular, D_1 e D_2 diâmetros das seções externas e internas, respectivamente, a e b as dimensões da seção retangular e n o número de dutos internos.

A Figura 3.21 ilustra esquematicamente as seguintes condições iniciais e de contorno usadas:

$\bar{M}(y, z = 0, t = 0) = \bar{M}_0$	$\bar{\theta}(y, z = 0, t = 0) = \bar{\theta}_0$
$T(y = 0, z < L/23, t) = T_1$	$x(y = 0, z < L/23, t) = x_1$
$T(y = 0, L/23 \leq z < L/11, t) = T_2$	$x(y = 0, L/23 \leq z < L/11, t) = x_2$
$T(y = 0, L/11 \leq z < L/8, t) = T_3$	$x(y = 0, L/11 \leq z < L/8, t) = x_3$
$T(y = 0, L/8 \leq z < L/5, t) = T_4$	$x(y = 0, L/8 \leq z < L/5, t) = x_4$
$T(y = 0, L/5 \leq z < 12L/13, t) = T_5$	$x(y = 0, L/5 \leq z < 12L/13, t) = x_5$
$T(y = 0, 12L/13 \leq z < 24L/25, t) = T_6$	$x(y = 0, 12L/13 \leq z < 24L/25, t) = x_6$
$T(y = 0, 24L/25 \leq z \leq L, t) = T_7$	$x(y = 0, 24L/25 \leq z \leq L, t) = x_7$

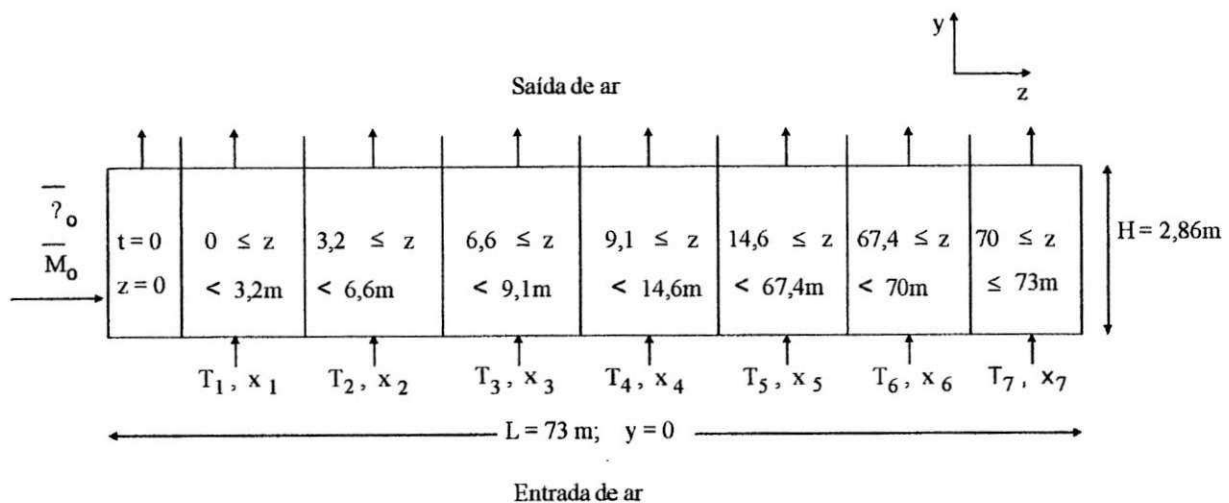


Figura 3.21 – Esquema das condições iniciais e de contorno no secador

3.2.2 Solução numérica

Métodos numéricos ou computacionais podem ser usados para resolver problemas, do mais simples ao mais complexo, com condições de contorno gerais. Esses métodos oferecem vantagens, como, redução no custo e no tempo do projeto, portanto, vem ganhando muito espaço no meio científico e industrial (Chawla et al., 2000; Wang, 2001; Gür et al., 2001; Tomba e Cavalieri, 2001; Wang et al., 2004; Xu et al., 2005; Yapici e Bastürk., 2005; Dogu et al., 2006).

Entretanto, em uma solução numérica, deve-se aceitar como uma das hipóteses, que a solução do problema será calculada com um número discreto de pontos, isto é, um número finito de pontos, logo, também se deve aceitar que a solução terá um determinado erro que pode ser controlado a partir desta quantidade de pontos discretos. Quanto maior for essa quantidade de pontos mais perto da solução analítica ficará a solução numérica. Porém, quanto maior o número de pontos, maior será o número de variáveis e maior será o número de equações. Portanto, maior será o esforço computacional para encontrar os valores procurados.

Dentro dos métodos numéricos os mais comuns 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). O MVF consiste em aproximar a equação que representa o fenômeno através da conservação da propriedade do material em um volume elementar. Isto pode ser feito fazendo um balanço da propriedade em questão no volume elementar ou volume de controle e também através da integração sobre o volume de controle, no tempo e no espaço, da equação na forma conservativa (Maliska, 2004).

O problema em regime transiente em estudo foi solucionado usando o método numérico de volumes finitos por (Pantankar, 1980; Maliska, 2004). Na Figura 3.22, pode-se ver o esquema numérico e o volume de controle analisados neste trabalho.

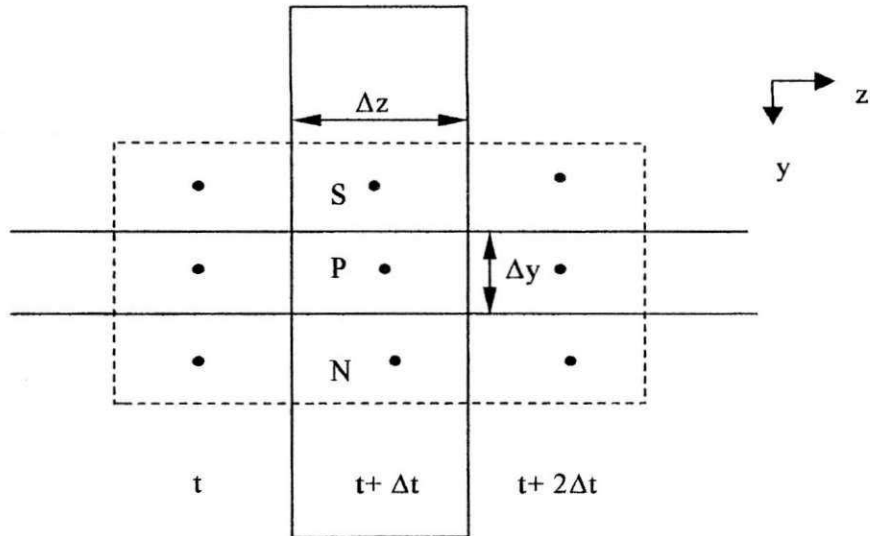


Figura 3.22 - Esquema numérico e o volume de controle utilizado.

- **Balço de energia para o ar**

Após a integração das equações diferenciais parciais, (Equações 3.1 – 3.5), no volume e no tempo, tem-se como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como segue:

A Equação (3.5) pode ser escrita na forma:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{w_a}{\varepsilon} \right) \frac{\partial T}{\partial y} = - \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.24)$$

Integrado no volume e no tempo, tem-se:

$$(T_P - T_P^o) \Delta x \Delta y \Delta z + \left(\frac{w_a}{\varepsilon} \right) (T_n - T_s) \Delta t \Delta x \Delta z = - \frac{A^* h_c (T_P - \bar{\theta}_P) \Delta x \Delta y \Delta z}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.25)$$

Para o esquema upwind, pode-se escrever a Equação (3.25) na forma:

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{W_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \right) T_P = \left(\frac{W_a}{\varepsilon} \right) T_S + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t} \right) T_P^o + \left(\frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \right) \bar{\theta}_P \quad (3.26)$$

Escrevendo numa forma geral, obtém-se:

$$A_p T_p = A_s T_s + A_p^o T_p^o + S_c^T \quad (3.27)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{W_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.27a)$$

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

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

$$S_c^T = \frac{A^* h_c \Delta y \bar{\theta}_p}{\varepsilon(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)} \quad (3.27d)$$

Para as equações seguintes, seguem-se procedimentos semelhantes.

• **Balço de energia para o produto (Equação 3.7)**

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

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{h_c A^* \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.28a)$$

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

$$S_c^{\bar{\theta}} = \frac{(h^*_{fg} + c_v T_p) \rho_p \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \Delta z + \frac{h_c A^* T_p \Delta z}{\rho_p c_p + \rho_p c_w \bar{M}} \quad (3.28c)$$

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

• **Balço de massa do ar (Equação 3.8)**

$$A_p x_p = A_s x_s + A_p^o x_p^o + S_c^x \quad (3.29)$$

onde:

$$A_p = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} + \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.29a)$$

$$A_s = \rho_a \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.29b)$$

$$A_p^o = \rho_a \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.29c)$$

$$S_c^x = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.29d)$$

• **Balço de massa do produto (Equação 3.10)**

$$A_p \bar{M}_p = A_p^o \bar{M}_p^o + S_c^{\bar{M}} \quad (3.30)$$

onde:

$$A_p = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.30a)$$

$$A_p^o = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.30b)$$

$$S_c^M = (M_o a_1 a_2 a_3 t^{a_3-1} e^{a_2 t^{a_3}}) \Delta z \quad (3.30c)$$

Como o processo acontece de forma contínua, ou seja, as vagonetas vão sendo introduzidos no secador, um a um, completando todo o seu comprimento, assumiu-se que todo secador se comporta como uma única vagoneta transportadora, disposta longitudinal e horizontalmente, e que os gradientes de umidade e temperatura do ar e produto ocorrem nas direções do fluxo de ar e saída do secador. Nenhuma mudança no ar e tijolo ocorre na direção perpendicular às direções citadas.

Nas equações 3.5 e 3.8 utilizou-se o esquema upwind como função de interpolação para os termos convectivos e um procedimento parabólico na direção z (Patankar, 1980; Maliska, 2004). Para a obtenção dos resultados, foi desenvolvido um código computacional em linguagem do programa Mathematica[®] que se encontra no Anexo 1. Todo o trabalho de simulação foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica / CCT / UFCG, em micro computadores Pentium 4 com a seguinte configuração: 2.80Ghz, 512Mb (DDR) de memória RAM e hard disk de 120Gb.

3.2.3 Simulação da condensação de água

Depois de \bar{M} , $\bar{\theta}$, T e 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, o seguinte procedimento é executado:

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

O novo valor de T é calculado por:

$$T = \frac{\frac{\rho_a w_a \Delta z}{u_p} (c_a + c_v x) T_{ant} + \rho_p \Delta y (c_p + c_w \bar{M}_{ant}) \bar{\theta}_{ant}}{\rho_a W_a \frac{dz}{u_p} (c_a + c_v x)} + \frac{-\rho_p \Delta y (c_p + c_w M_o) T_{ant} - \rho_a w_a \left(\frac{\Delta z}{u_p}\right) h^*_{fg} (x_{ant} - x)}{\rho_a w_a \frac{\Delta z}{u_p} (c_a + c_v x)} \quad (3.31)$$

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:

$$\bar{M} = \bar{M}_{ant} + \left(\frac{\rho_a W_a \Delta z}{\rho_p u_p \Delta y}\right) \cdot (x_{ant} - x) \quad (3.32)$$

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

3.2.4 Análises energética e exergética do secador

Com a finalidade de aperfeiçoar o funcionamento de um secador tipo túnel, contínuo, e de fluxos cruzados, são descritas a seguir, as formas de quantificar as eficiências, energética e exergética, do secador.

3.2.4.1 Análise energética e transferência de massa

Segundo Lima e Nebra (1997), em baixas temperaturas é recomendado incluir a energia do ventilador, já que representa uma grande proporção da energia total gasta no processo de secagem. Portanto, através destas informações e trabalhos encontrados na literatura, assim como a experiência adquirida neste sentido, entende-se que a demanda de energia de um secador convectivo industrial pode ser dividida em sete componentes distintos: A energia requerida para evaporação de umidade na temperatura de secagem; a perda de energia na corrente de exaustão; as perdas de energia pelas paredes do secador; a energia associada com o sólido aquecido quando é removido do secador; a energia requerida para a circulação do ar de secagem; a energia requerida para aquecer a estrutura do secador e finalmente, a energia para transportar o produto dentro do secador.

Para determinação da eficiência energética do secador, utilizou-se a seguinte equação (Lima e Nebra, 1997):

$$\eta = \frac{\dot{m}_{as} (x_{af} - x_{ai}) h_{fg \text{ a } T \text{ de secagem}}}{\dot{m}_{as} (h_{ai} - h_o) + \dot{W}_{\text{soprador}} + \dot{W}_{\text{transporte do produto}}} \quad (3.33)$$

onde \dot{m}_{as} é o fluxo de massa inicial do ar seco, x_{af} e x_{ai} as umidades absolutas do ar, h_{fg} é o calor latente de vaporização, h_{ai} entalpia do ar na entrada do leito e h_o é a entalpia de referência do ar.

No entanto, devido à falta de dados no secador industrial, as parcelas referentes ao transporte do ar e produto foram consideradas nulas.

3.2.4.2 Análise exergética do processo de secagem

A exergia de fluxo de massa, que é aplicada para o tijolo e o ar, na entrada e saída do secador é dada por:

$$\dot{E}x = [(h - h_o) - T_o(s - s_o) + ex^{ch} + \frac{V^2}{2}] \dot{m} \quad (3.34)$$

Os termos da exergia química de mistura, variações de entropia e entalpia para o ar são dadas, respectivamente, por:

$$\overline{ex}^{ch} = \sum x_i (\overline{ex}^{ch})_i + \overline{RT}_o \sum x_i \ln(\gamma_i x_i) \quad (3.35)$$

$$s_e - s_o = \Delta s = [c_p \ln(T_e/T_o) - R \ln(P_e/P_o)] \quad (3.36)$$

e

$$\Delta h = h_e - h_o = \int c_a dT \quad (3.37)$$

A exergia química do componente i (ex^{ch}) _{i} , é obtida de tabelas para o estado padrão a $T_o=298,15$ K e $P_o=101,325$ kPa, fornecidas em Kotas (1985) e $\gamma_i \approx 1$ para gases ideais. Já para o tijolo, as mesmas equações são:

$$\Delta Ex_i \cong 0 \quad (3.38)$$

e

$$s_e - s_o = \Delta s = - \int_{T_o}^{T_e} \frac{c_p}{T} dT \quad (3.39)$$

e

$$h_e - h_o = \Delta h = - \int_{T_o}^{T_e} c_p dT \quad (3.40)$$

Nos processos de secagem, as variações do calor específico com a temperatura são relativamente pequenas, de forma que se pode assumi-lo como constante para a faixa de temperatura considerada (Rossi e Roa, 1980). Nestes termos:

$$\Delta s = c_p \ln(T_e/T_o) \quad (3.41)$$

e

$$\Delta h = c_p (T_e - T_o) \quad (3.42)$$

A variação de exergia do tijolo úmido, a qual foi aplicada para as condições iniciais e finais do processo de secagem, foi obtida a partir de:

$$EX_p^{Ch} = \dot{m}_{ts} ex_{ts}^{Ch} + \dot{m}_a ex_a^{Ch} \quad (3.43)$$

$$\text{onde a } \overline{ex}_a^{Ch} = 3120 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol}} \text{ e } ex_w^{Ch} = \frac{\overline{ex}_w^{Ch}}{M_w} \quad (3.44)$$

A seguinte equação para determinar a eficiência exergética do secador, foi usada:

$$\epsilon_X = \frac{\Delta EX_{\text{mínima}}}{\Delta EX_a} = \frac{\dot{m}_{ai} (x_a - x_{ai}) ex_w^{Ch}}{\Delta EX_a} \quad (3.45)$$

A variação de exergia para realizar o processo de secagem é mínima quando a temperatura do produto na entrada do secador é igual à temperatura de saída do mesmo, sendo ambas iguais à temperatura de referência.

Os dados relacionados ao ar e ao produto, utilizados para obtenção da análise energética e exergética do secador, foram definidos, através de suas propriedades, algumas

delas, encontradas com o auxílio da simulação e do programa computacional CATT, e também dos experimentos realizados em estufa e secador. A seguir, estão descritos os procedimentos para cada propriedade:

- a) pressão do vapor (kPa): Produto entre a umidade relativa e a pressão do vapor saturado (obtida dos resultados da simulação) no início do processo;
- b) entalpia (h_{as}) (kJ/kg) e entropia (s_{seco}) (kJ/kg/K) do ar seco via: Software CATT, entrando com pressão ambiente e temperatura;
- c) entalpia (h_v) (kJ/kg) e entropia (s_v) (kJ/kg/k) do vapor de água: Software CATT, entrando com a temperatura;
- d) entalpia total (h) (kJ/kg_{ar seco}): Resultado da soma, entre, a entalpia do ar seco e o produto da umidade absoluta (x) com a entalpia do vapor (h_v);
- e) entropia total (s) (kJ/kg/k): Resultado da soma, entre, a entropia do ar seco e o produto da umidade absoluta (x) com a entropia do vapor (s_v);
- f) entalpia de vaporização da água (h_{fg}) (kJ/kg): A diferença entre entalpia do vapor a entalpia de líquido (obtidas do software (CATT));
- g) umidade absoluta (x) (kg/kg): Software CATT, entrando com a temperatura e umidade relativa;
- h) fluxo de massa de ar seco ($\dot{m}_{ar\ seco}$) (kg/s): Produto entre densidade do ar (ρ), velocidade do ar (v) e a área de contato do produto com o ar de secagem (A);
- i) fluxo de massa de vapor (\dot{m}_v) (kg/s): Produto entre a umidade absoluta (x) e o fluxo de massa de ar seco ($\dot{m}_{a\ seco}$);
- j) fluxo de massa de ar úmido (\dot{m}_a) (kg/s): soma entre o fluxo de massa de ar seco e o fluxo de massa de vapor.

Essas propriedades foram calculadas na entrada e na saída do secador, para o produto e para ar de secagem. Esses resultados serão apresentados e discutidos no capítulo 4 deste trabalho.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais

4.1.1 Caracterização da matéria-prima

Neste item apresentar-se-á as discussões e os resultados obtidos dos ensaios de caracterização química e mineralógica da matéria-prima utilizada nesta pesquisa.

4.1.1.1 Análise química

A Tabela 4.1 mostra a composição química da matéria-prima utilizada na confecção dos tijolos usados nos experimentos realizados em estufa e em um secador industrial tipo túnel de fluxo cruzado utilizado na Indústria Cerâmica Cincera. Analisando os resultados, verifica-se que a argila estudada apresenta teor de sílica (SiO_2) superior a 57% e teor de alumina (Al_2O_3) superior a 24%. Estes termos são típicos de argila caulinitica de elevada impureza.

Em relação a esta grande quantidade de sílica presente na argila, pode-se dizer que, trata-se de uma argila de porosidade elevada, e, portanto, esta característica diminui o tempo de secagem e, conseqüentemente, a retração volumétrica do material. Em relação ao teor de ferro (Fe_2O_3), superior a 9%, pode-se dizer que essa argila é típica de cerâmica vermelha.

Tabela 4.1 – Composição química da matéria-prima utilizada nos experimentos

Substâncias	Resultados
SiO ₂	57,054 %
Al ₂ O ₃	24,250 %
Fe ₂ O ₃	9,257 %
K ₂ O	2,879 %
MgO	2,789 %
CaO	2,049 %
TiO ₂	1,259 %
SO ₃	0,149 %
MnO	0,140 %
P ₂ O ₅	0,071 %
ZrO ₂	0,048 %
SrO	0,034 %
Rb ₂ O	0,021 %

Os óxidos alcalinos terrosos (MgO e CaO) e as demais substâncias que apresentaram menores resultados atuam como fundentes durante a etapa de queima. Esses óxidos reagem com fases amorfas e formam fases cristalinas que são mais estáveis frente à ação de umidade (Gomes, 1986).

4.1.1.2 Análise mineralógica

O difratograma de raios-X, (Figura 4.1), indica que a argila é constituída das seguintes fases mineralógica: caulinita, quartzo e feldspato. A caulinita é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com água e o quartzo é o responsável pelo aumento de porosidade, diminuição da retração volumétrica, teor de umidade e plasticidade. O feldspato tem como característica principal, diminuir o ponto de fusão.

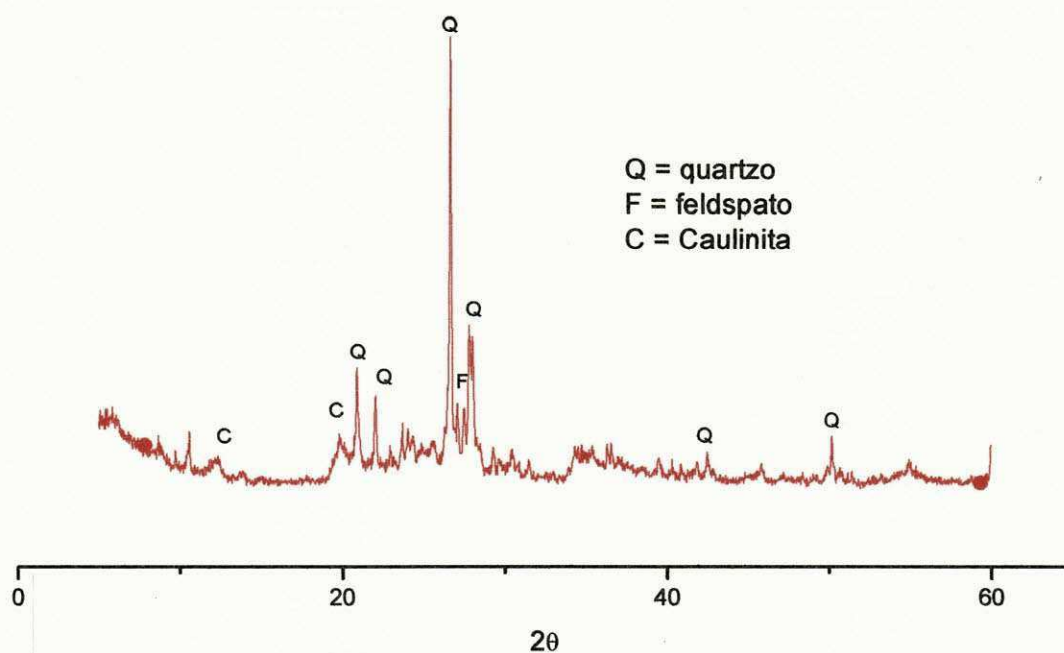


Figura 4.1 – Análise mineralógica via difratograma de Raios X da amostra estudada

4.1.1.3 Análise granulométrica

A Tabela 4.2 mostra os valores que representam a distribuição de tamanho de partículas da matéria-prima estudada. Analisando esses valores, verifica-se que a matéria-prima estudada apresenta em sua composição, elevados teores de silte e areia (87,04%) e fração de argila de 12,96%.

Tabela 4.2 – Distribuição de tamanho de partículas da matéria-prima estudada

Amostra	Fração Argila ($<2\mu\text{m}$)	Silte ($2 \leq X \leq 60\mu\text{m}$)	Areia ($60 \leq X \leq 100\mu\text{m}$)	Diâmetro médio (μm)
Argila	12,96	85,59	1,45	17,33

A Figura 4.2 mostra a curva de distribuição de tamanho da partícula da argila. Observa-se, através da distribuição granulométrica, uma grande concentração de partículas em torno dos 2-100 μm . A amostra estudada apresenta um tamanho médio de 17,33 μm e

D10, D50 e D90 de 1,55, 11,23 e 42,92 μm , respectivamente, representam os diâmetros da partícula com os devidos percentuais.

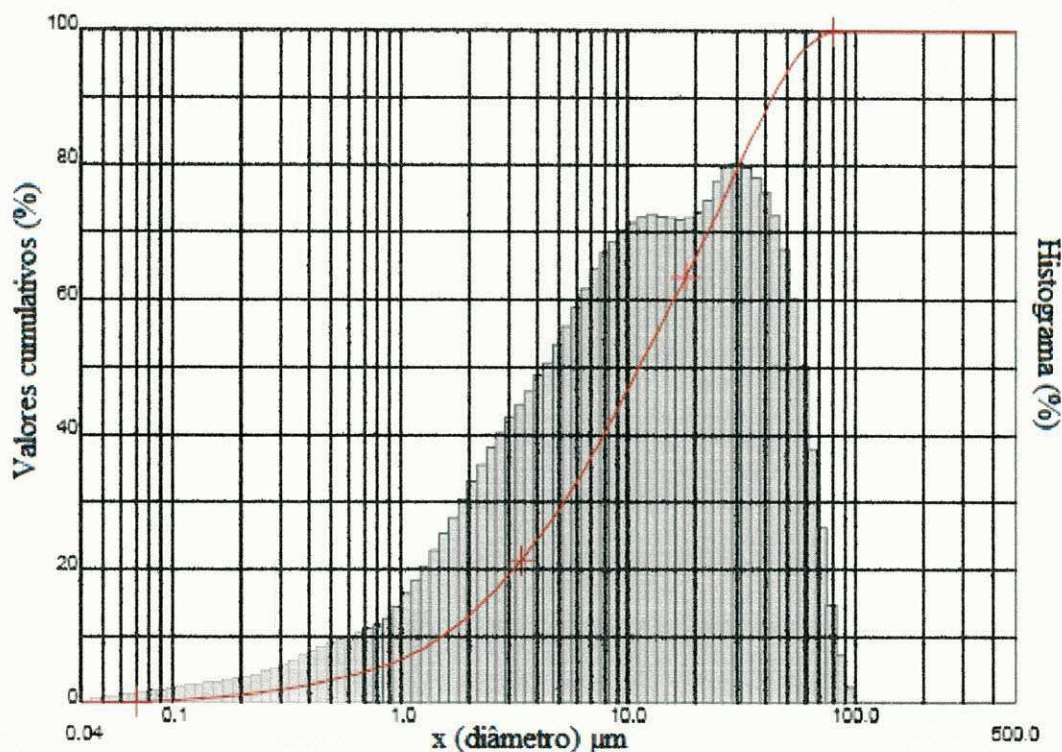


Figura 4.2 – Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila

4.1.1.4 Análises térmicas

A Figura 4.3 mostra a distribuição de temperatura e a perda de umidade da argila em função da temperatura. Analisando a temperatura na análise térmica diferencial (DTA), verifica-se um pico endotérmico a 110°C, caracterizando a presença de água livre; uma banda exotérmica entre 200 e 480 °C, caracterizando a presença de matéria orgânica; um pico endotérmico a 570°C caracterizado pela presença de hidroxila; a 900°C verifica-se um pico exotérmico correspondente a nucleação da mulita.

Em relação à curva da análise termogravimétrica (TGA), verifica-se uma perda de massa em torno de 5%, correspondente a água livre, a uma temperatura entre 0 e 180°C; cerca de 10% de matéria orgânica, a uma temperatura entre 180 e 540°C e perda de 10% de hidroxila, aproximadamente, a uma temperatura acima de 540°C.

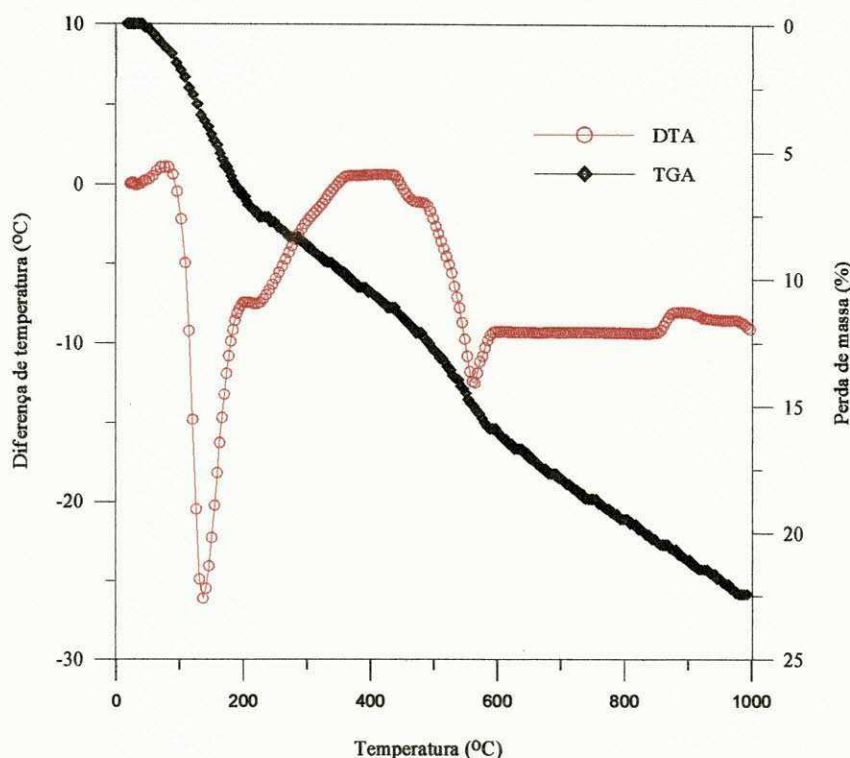


Figura 4.3 - Curva termogravimétrica (TG) e termodiferencial (DT) da matéria-prima

4.1.2 Secagem do tijolo

4.1.2.1 Secagem em estufa

Os valores experimentais oriundos da secagem do tijolo para a condição de temperatura do ar variável (de 50 a 100°C) e umidade relativa de 85% estão apresentados nas Figuras 4.4-4.8, Tabelas 4.3 e 4.4 (Anexo 2). Analisando os resultados, pode-se observar uma perda de umidade do produto de forma acentuada, atingindo o ponto de equilíbrio após 700 minutos, para uma umidade relativa do ar de 85%. Verificou-se uma forte influência da temperatura do ar no processo e também que o teor de umidade do tijolo decresce com o tempo, tendendo para o teor de umidade de equilíbrio, com o aumento da temperatura.

Na Figura 4.5, observa-se os valores da temperatura do tijolo em função do tempo de secagem. Analisando os valores do tempo e temperatura de secagem, verifica-se que a temperatura do tijolo cerâmico sofre uma grande influência da temperatura do ar no interior da estufa principalmente nos instantes iniciais do processo. A umidade relativa elevada faz com que a temperatura do produto atinja, de forma lenta, uma temperatura média próxima da

temperatura de bulbo seco do ar de secagem, estabilizando-se em seguida. Pode-se analisar que a temperatura do tijolo sofre um aquecimento crescente nos primeiros 500 minutos, permanecendo assim por um período conhecido por patamar de secagem, durante 700 minutos e em seguida sua temperatura decresce até 70°C, aproximadamente, nos minutos finais.

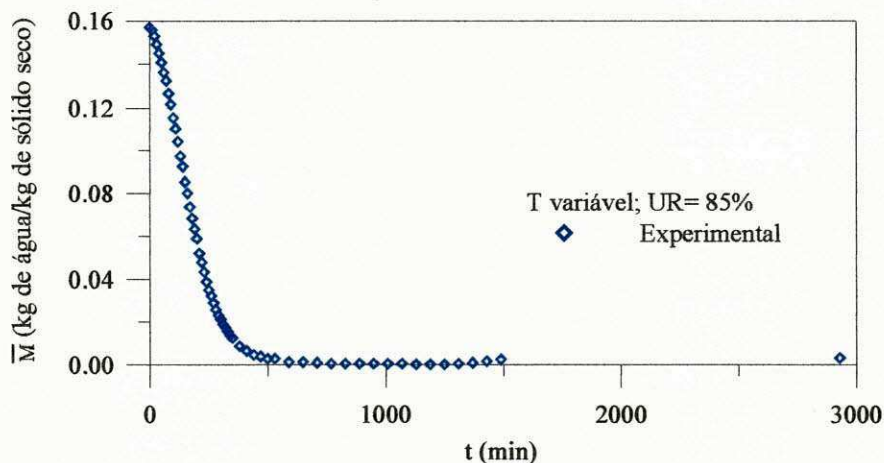


Figura 4.4 – Teor de umidade em função do tempo de secagem.

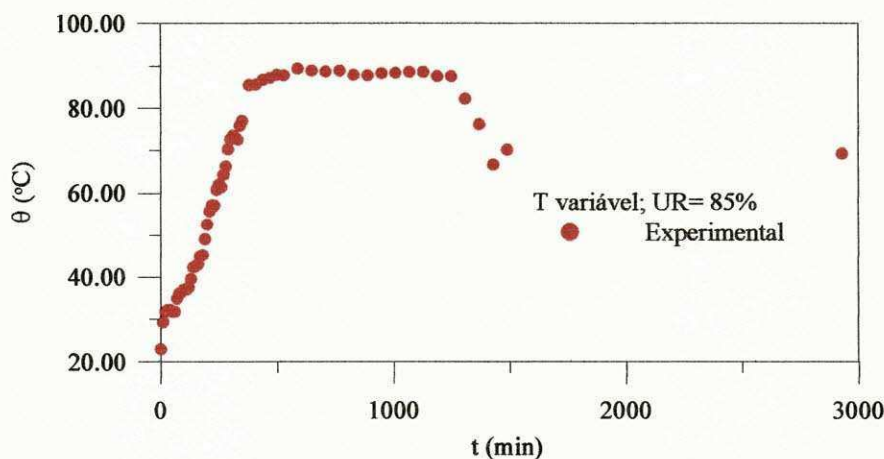


Figura 4.5 – Temperatura na superfície do tijolo (vértice) em função do tempo de secagem.

Verifica-se que a temperatura do ar de secagem acarreta variações na temperatura do produto, mais que no teor de umidade. Porém, o aumento da temperatura do ar aumenta a taxa de secagem e o tijolo alcança mais depressa a sua temperatura e umidade de equilíbrio. Esta situação pode causar danos à qualidade do tijolo (Nascimento, 2002).

São apresentadas, nas Tabelas 4.3 e 4.4, informações referentes ao experimento realizados na estufa do Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos. Informações estas

que se refere a parâmetros de secagem e variação das dimensões da amostra, bem como as variações de seu volume total.

Através das Figuras 4.6 e 4.7, podemos notar as variações da temperatura do ar de secagem e do volume do tijolo ao longo do processo de secagem, respectivamente.

Analisando os efeitos da secagem nas dimensões do material (Tabela 4.4), constatou-se um encolhimento quase que uniforme em relação as suas dimensões maiores. As diferenças devem-se ao fato das dimensões, comprimento e altura, estarem em contato mais direto com o ar de secagem do que a largura do produto, pela sua posição dentro da estufa.

Tabela 4.3– Parâmetros experimentais da secagem, do ar e do tijolo realizados na estufa.

	Tijolo					Ar		t (min)
	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	m (g)	θ (°C)	Ta (°C)	UR (%)	
Entrada	201	93,47	197	3052	22,9	26,0	70	0
saída	192	89,47	188	2638	87,5	25,9	74	1440

Tabela 4.4-Variação dimensional e volumétrica da amostra na estufa.

	Comprimento R ₁ (mm)	Largura R ₂ (mm)	Altura R ₃ (mm)	Dimensões dos furos (mm)			Volume (mm ³)
				a	b	R ₁	
				Entrada	201	93,47	
Saída	192	89,47	188	34,14	36,89	192	2987699,60
Variação	9	4	9	1,19	2,25	9	435485,93
Percentual	4,5%	4,2%	4,6%	3,37%	5,75%	4,5%	12,72%

Percebe-se, da Figura 4.6 que a temperatura do ar de secagem tem um comportamento parecido com a temperatura do tijolo, ou seja, tem-se um aquecimento nos primeiros 500 minutos, mantendo-se assim por um período constante durante 700 minutos até atingir o ponto de umidade crítica. A partir desse ponto a temperatura mostra-se decrescente nos minutos finais. Vale salientar que este comportamento foi imposto ao longo do processo, compatível com seu teor de umidade inicial.

Na Figura 4.7, observa-se a razão volumétrica do produto em função do tempo. Nota-se uma diminuição do volume do sólido nos primeiros 250 minutos do processo, a partir daí esse volume mostra-se constante até 1250 minutos, aproximadamente, até atingir a umidade de equilíbrio. Verifica-se uma redução de volume de aproximadamente 16% nos primeiros 250 minutos de processo.

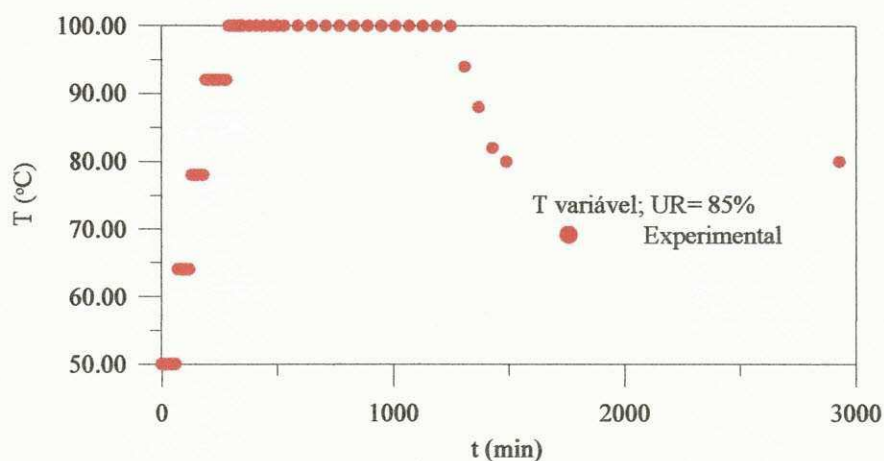


Figura 4.6 – Temperatura do ar de secagem no interior da estufa em função do tempo de secagem.

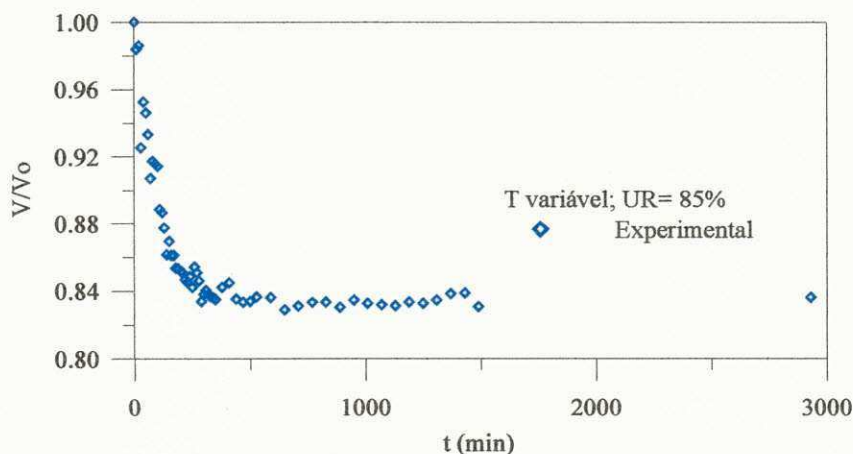


Figura 4.7 – Volume adimensional do tijolo em função do tempo de secagem.

Não são recomendados altos gradientes térmicos no tijolo porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmicas e mecânicas no interior do material, o que pode causar fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem. Uma secagem previamente controlada é de grande importância. Se a secagem não for uniforme, aparecerão distorções nas peças, mas, se for muito lenta, a produção tornar-se-á antieconômica (Kawaguti, 2004).

Devido a uma secagem inadequada, geram-se então tensão de sentido contrário entre a camada externa e a interna, e quanto maior a perda de água, maior também será a tensão dela resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com possibilidade de trincar (Cadé et al., 2005). Ainda segundo Cadé et al. (2005), alguns parâmetros têm uma importância significativa no fenômeno de tração e retração volumétrica como a composição estrutural da argila, a porosidade, a densidade, entre outros.

Para se ter uma secagem uniforme (gradientes de temperatura e umidade minimizados) é importante moderar adequadamente a intensidade da secagem, pelo controle da velocidade, umidade relativa e temperatura do ar de secagem, forma do corpo, particularmente a relação área/volume e a porosidade do material. Isto conduz a um produto industrial de qualidade aceitável comercialmente (Vieira et al., 2003).

Na Figura 4.8, tem-se o volume do tijolo em função do teor de umidade em base seca. Nota-se que a perda de umidade se dá de forma mais acentuada quando se tem um volume do sólido mais elevado, justamente quando o tijolo está mais úmido. Pode-se pressupor que ao aumentar a espessura das paredes do tijolo vazado, porém, mantendo-se as dimensões do mesmo, constantes, seu volume aumenta, e conseqüentemente a massa de água no seu interior também aumenta. Por isto, sob as mesmas condições de secagem, aumentando-se a espessura do tijolo vazado, o tempo de secagem também aumenta.

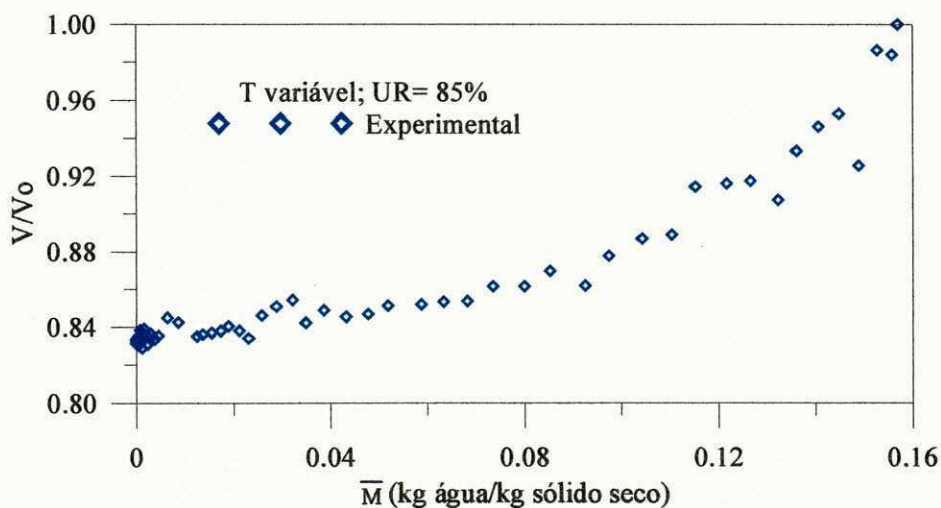


Figura 4.8 – Volume adimensional do tijolo em função do teor de umidade em base seca para o experimento em estufa a uma temperatura variável.

Comparando a Figura 4.8 com a curva de Bigot (Figuras 2.10 e 2.11), percebe-se uma semelhança no comportamento das curvas, porém, com valores diferenciados, ou seja, na Figura 4.8, tem-se certa proporção entre a perda de umidade e a variação volumétrica, enquanto nas Figuras 2.10 e 2.11, verificam-se curvas semelhantes, mas proporções diferenciadas. No caso das Figuras 2.10 e 2.11, a retração depende de parâmetros específicos ao produto estudado, tais como forma granulométrica e composição química da matéria-prima.

A Figura 4.9 evidencia as curvas do teor de umidade médio do produto em base seca e a variação da temperatura do tijolo para uma secagem realizada numa temperatura do ar de secagem constante de 100°C e umidade relativa de aproximadamente 1,5%. Percebe-se que o tijolo aquece mais rápido e, conseqüentemente, existe uma perda de umidade bem mais acentuada do que do que quando submetido a uma temperatura variável com uma umidade relativa alta (Figuras 4.4 e 4.8). Neste caso verifica-se que o produto atinge rapidamente seu ponto de equilíbrio. Esse processo, apesar de apresentar um tempo de secagem reduzido, pode gerar sérias conseqüências à qualidade do produto pós-secagem. Os dados para este experimento são reportados no anexo 2.

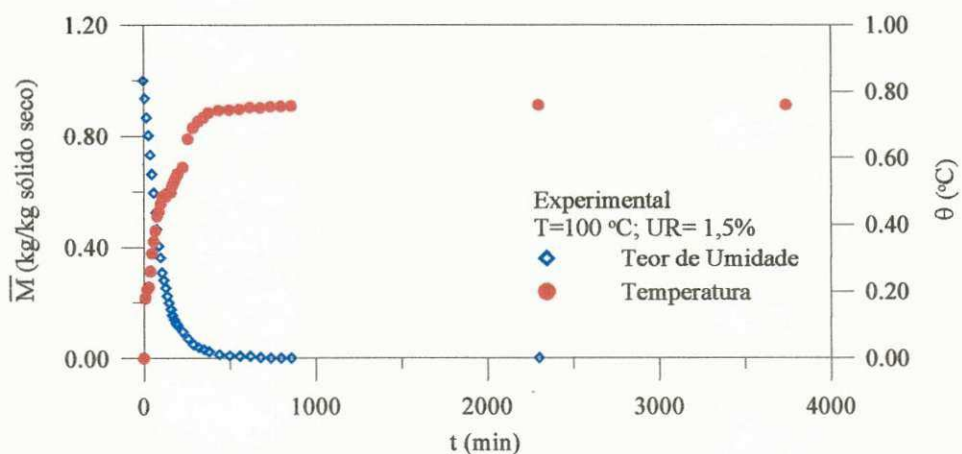


Figura 4.9 – Teor de umidade médio em base seca e temperatura do tijolo em função do tempo de secagem.

Percebe-se a variação volumétrica do tijolo em função do teor de umidade em base seca conforme a Figura 4.10. Comparando com a Figura 4.8, percebe-se certa semelhança no início do processo, porém, após o produto perder aproximadamente 10% de umidade, sua razão volumétrica aumenta e em seguida diminui até se estabilizar. Existem variações no

volume do tijolo, diferente dos resultados apresentado na Figura 4.8. Isso se deve ao fato do produto está submetido a uma temperatura constante com uma umidade relativa baixa, o que pode provocar uma variação volumétrica devido a diferentes tensões provocadas pelo aquecimento na superfície do tijolo e teor de umidade elevado no seu interior.

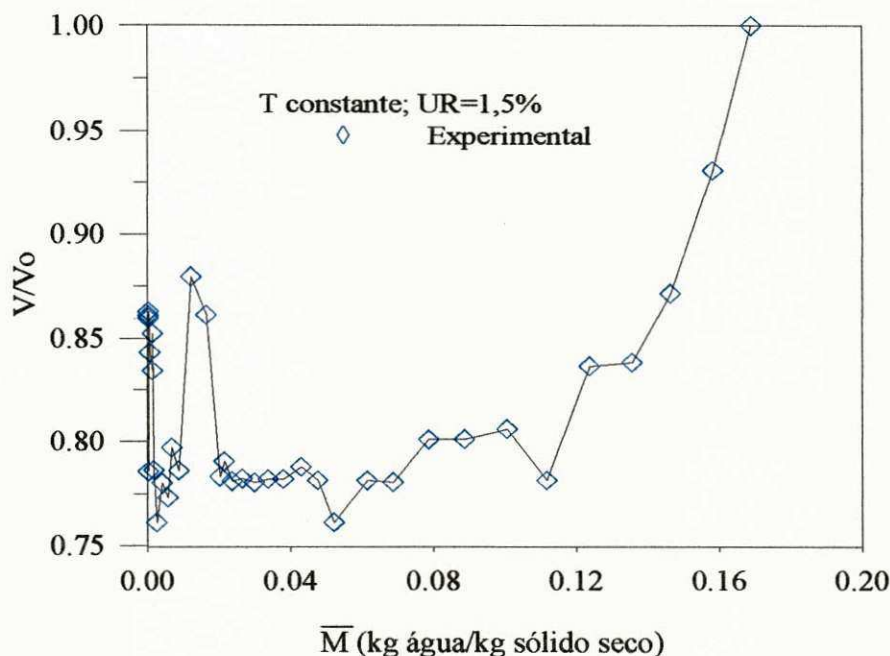


Figura 4.10 – Variação volumétrica em função do teor de umidade médio em base seca para o experimento em estufa a temperatura constante de 100°C.

A Figura 4.11 ilustra algumas faces do tijolo utilizado nos experimentos na estufa com temperatura variável e umidade relativa elevada, enquanto que as Figuras 4.12-4.14, referem-se ao tijolo submetido à secagem em estufa, na temperatura fixa de 100°C e umidade relativa aproximada de 1,5%.

A Figura 4.12 evidencia uma amostra antes de ser condicionada a uma secagem em estufa, ou seja, em $t = 0$, com temperatura constante de 100°C e uma umidade relativa consideravelmente baixa, aproximadamente 1,5%. O objetivo é analisar a influência da temperatura e a umidade relativa no processo, comparando os efeitos da secagem com a amostra submetida a temperaturas variadas e umidade relativa alta.

Percebe-se que as amostras condicionadas a uma secagem com umidade relativa elevada e temperaturas de 50°C até 100°C ao longo do tempo não apresentam fissuras ou trincas de forma acentuada.

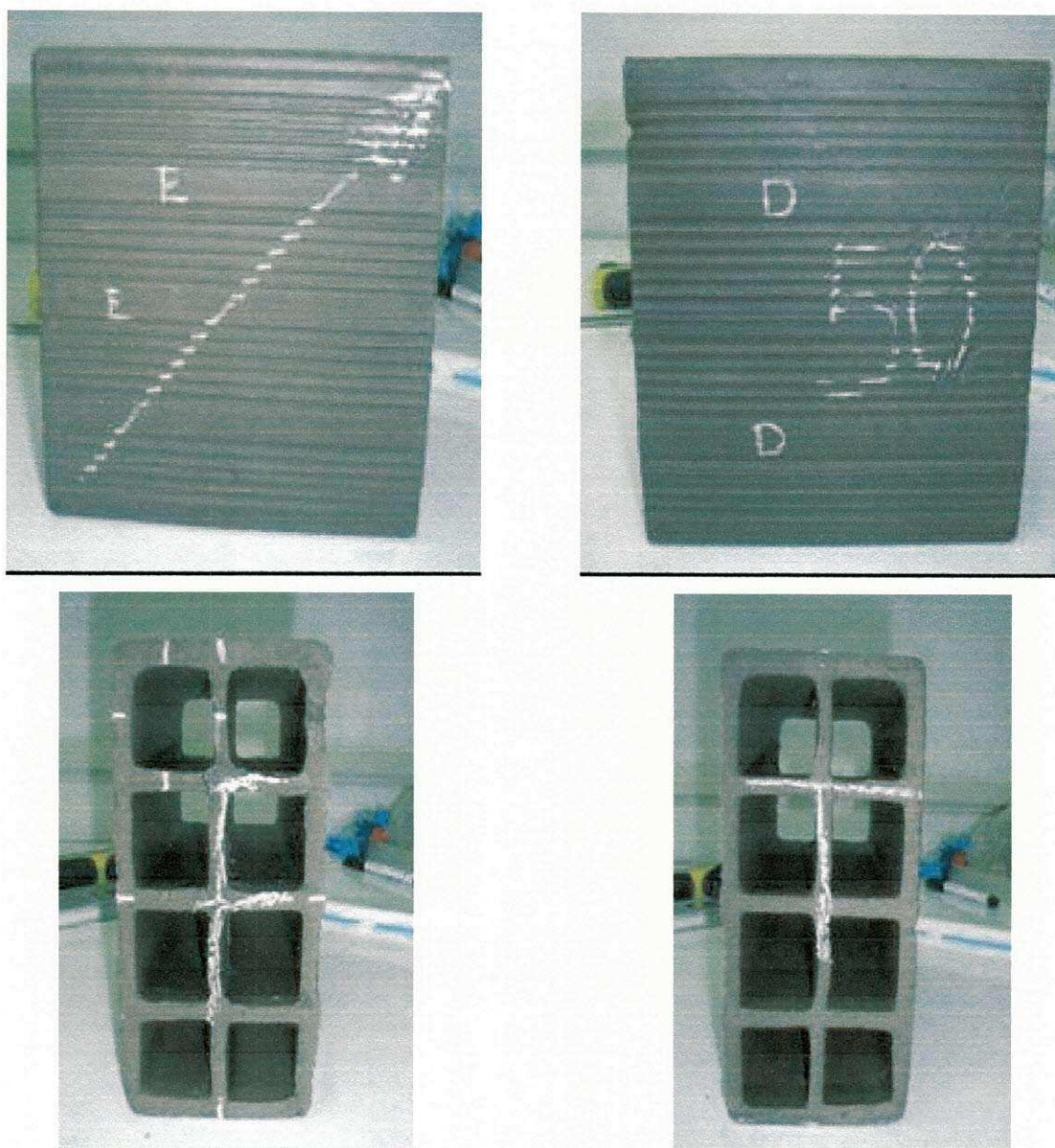


Figura 4.11 – Vistas da amostra utilizada nos experimentos em estufa com temperatura variável ($t = 180$ minutos).

Na Figura 4.13, observam-se fissuras bem acentuadas na amostra submetida à temperatura constante de 100°C e umidade relativa de 1,5% aproximadamente nos tempos iniciais do processo de secagem, ou seja, nos primeiros 80 minutos. Esse efeito pode ser visto com facilidade a olho nu. Isto ratifica a informação que secagem com temperatura constante elevada e umidade relativa baixa, pode ocasionar defeitos no produto ao final do processo de fabricação, tornando-se inaceitável comercialmente, podendo até provocar sua perda total.

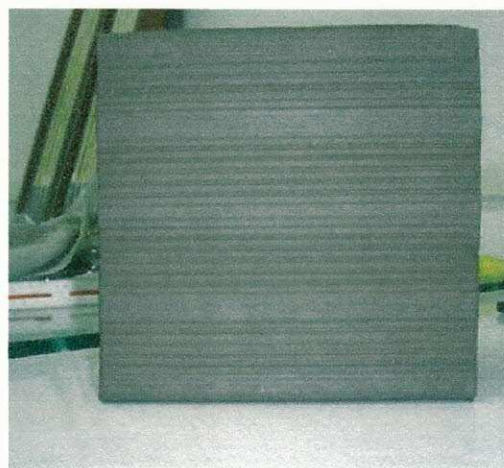
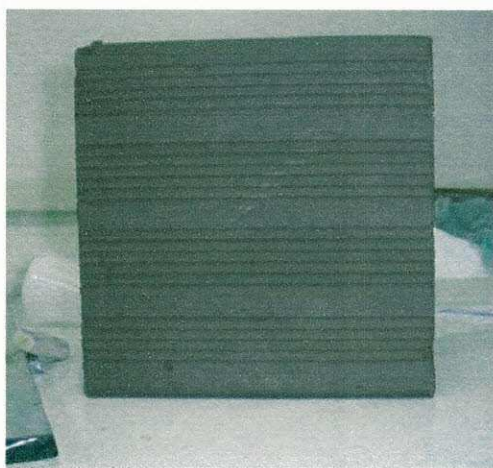
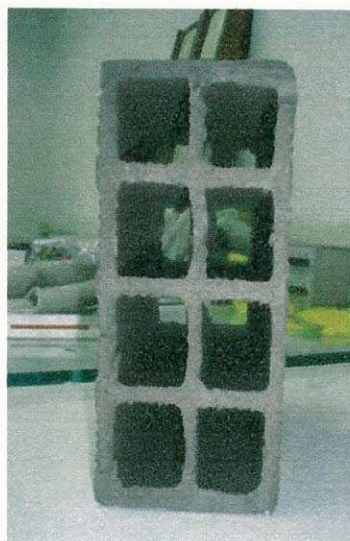


Figura 4.12 - Vistas da amostra submetida à secagem com temperatura constante de 100°C na estufa (t = 0 minuto).



Figura 4.13 – Vistas da amostra submetida à secagem com temperatura constante de 100°C na estufa (t = 80 minutos).

As Figuras 4.14a e 4.14b mostram que após um determinado tempo, depois de 140 e 200 minutos, respectivamente, as fissuras apresentadas na Figura 4.13, podem ficar imperceptíveis aparentemente, porém, certamente essas fissuras vão ocasionar problemas irreduzíveis em etapas posteriores como, por exemplo, na queima desse material. Percebe-se, então, que durante esse período, ocorre uma expansão devido ao aquecimento e uma contração devido à perda de umidade. Na prática, uma vez que as camadas exteriores e interiores próximas da superfície do tijolo secam mais rapidamente que o centro, essas regiões contraem-se primeiro, produzindo uma redução nas dimensões do corpo e conseqüentemente no seu volume. Esta redução no volume do corpo corresponde, em alguns casos, exatamente a perda de água evaporada do mesmo, mas fatores como transferência de calor, influenciam no processo (Cadé et al., 2005).



Figura 4.14a – Vista da amostra submetida à secagem em estufa com temperatura constante de 100°C (t = 140 minutos).



Figura 4.14b – Vista da amostra submetida à secagem em estufa com temperatura constante de 100°C (t = 200 minutos).

4.1.2.2 Secagem em secador industrial

Nas Tabelas 4.5 - 4.10 são apresentados os parâmetros experimentais relacionados ao produto e ao ar de secagem, assim como, as variações no volume das amostras, obtidas, durante a secagem num secador industrial tipo túnel contínuo de fluxo cruzado, da Cerâmica Cincera que opera com temperaturas variáveis e umidade relativa de 56 a 85%, aproximadamente. São analisadas as variações dos parâmetros relacionados ao produto e ao ar

de secagem em relação ao tempo em cada amostra, na entrada e na saída do secador. A localização desta amostra na vagoneta foi apresentada na Figura 3.9.

Tabela 4.5 – Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 1) obtida no secador industrial da Cerâmica Cincera.

Posição no secador	Tijolo					Ar			t (min)
	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	m (g)	θ (°C)	Ta °C	UR (%)	v (m/s)	
Entrada	203	92,01	193,0	2924	29,6	51,0	56	5-7	0
Saída	190	85,94	188	2590	***72 ****66	*97 **80,1	-	-	1440

*Temperatura do ar na saída do duto. **Temperatura do ar no ventilador. ***Temperatura do tijolo ainda na vagoneta. ****Temperatura do tijolo após coleta dos dados.

Tabela 4.6 – Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 2) realizados no secador industrial da Cerâmica Cincera.

Posição no secador	Tijolo					Ar			t (min)
	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	m (g)	θ (°C)	Ta °C	UR (%)	v (m/s)	
Entrada	198	90	194	2939	29,6	51,0	56	5-7	0
Saída	193	86,10	189	2543	67,6	*97 **80,1	-	-	1440

*Temperatura do ar na saída do duto. **Temperatura do ar no ventilador

Tabela 4.7 – Parâmetros experimentais de secagem, do ar e do tijolo (amostra 3) realizados no secador industrial da Cerâmica Cincera.

Posição no secador	Tijolo					Ar			t (min)
	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	m (g)	θ (°C)	Ta °C	UR (%)	v (m/s)	
Entrada	199	92	195	3039	29,6	51,0	56	5-7	0
Saída	190	85,56	190	2657	68,2	*97 **80,1	-	-	1440

*Temperatura do ar na saída do duto. **Temperatura do ar no ventilador

Tabela 4.8-Variação das dimensões da amostra 1 no secador industrial.

	Comprimento R ₁ (mm)	Largura R ₂ (mm)	Altura R ₃ (mm)	Dimensões dos furos (mm)			Volume do tijolo furado (mm ³)
				a	b	R ₁	
Entrada	203,00	92,01	193,00	35,02	38,18	203,00	3333435,88
Saída	190,00	85,94	188,00	30,75	37,45	190,00	2850975,18
Variação	13,00	6,07	5,00	4,27	0,73	13,00	482460,70
Percentual	6,40%	6,60%	2,59%	12,20%	1,90%	6,40%	14,47%

Tabela 4.9-Variação das dimensões da amostra 2 no secador industrial.

	Comprimento R ₁ (mm)	Largura R ₂ (mm)	Altura R ₃ (mm)	Dimensões dos furos (mm)			Volume do tijolo furado (mm ³)
				a	b	R ₁	
Entrada	198,00	90,0	194,00	32,50	38,75	198,00	3207723,75
Saída	193,00	86,10	189,00	31,50	37,63	193,00	2911898,12
Variação	5,00	3,90	5,00	1,00	1,12	5,00	295825,63
Percentual	2,53%	4,30%	2,58%	3,00%	2,90%	2,53%	9,20%

Tabela 4.10-Variação das dimensões da amostra 3 no secador industrial.

	Comprimento R ₁ (mm)	Largura R ₂ (mm)	Altura R ₃ (mm)	Dimensões dos furos (mm)			Volume do tijolo furado (mm ³)
				a	b	R ₁	
Entrada	199,00	92,00	195,00	32,51	38,44	199,00	3321372,80
Saída	190,00	85,56	190,0	30,23	37,86	190,0	2871259,52
Variação	9,00	6,44	5,00	2,28	0,58	9,00	450113,28
Percentual	4,52%	7,00%	2,56%	7,00%	1,50%	4,52%	13,55%

Percebeu-se um encolhimento mais acentuado na amostra 1 (Figura 4.15). Esse resultado, provavelmente, deve-se ao fato do tijolo, devido a sua localização na vagoneta, ter uma área de contato maior com o ar de secagem em relação às amostras 2 e 3 (Figuras 4.16 e 4.17). Essas amostras foram condicionadas a uma secagem com variações de temperatura ao longo do tempo. Apesar de serem submetidas a temperaturas que variaram de 50°C até 100°C,

não apresentam fissuras ou trincas de forma acentuada como as amostras submetidas a uma temperatura de 100°C de forma constante. Isto ratifica a informação que secagem com temperatura elevada e constante pode ocasionar defeitos no produto no final do processo de fabricação, tornando-se inviável sua comercialização e levando o produto, em alguns casos, a sua perda total.



Figura. 4.15 – Vista da amostra 1 na saída do secador industrial.

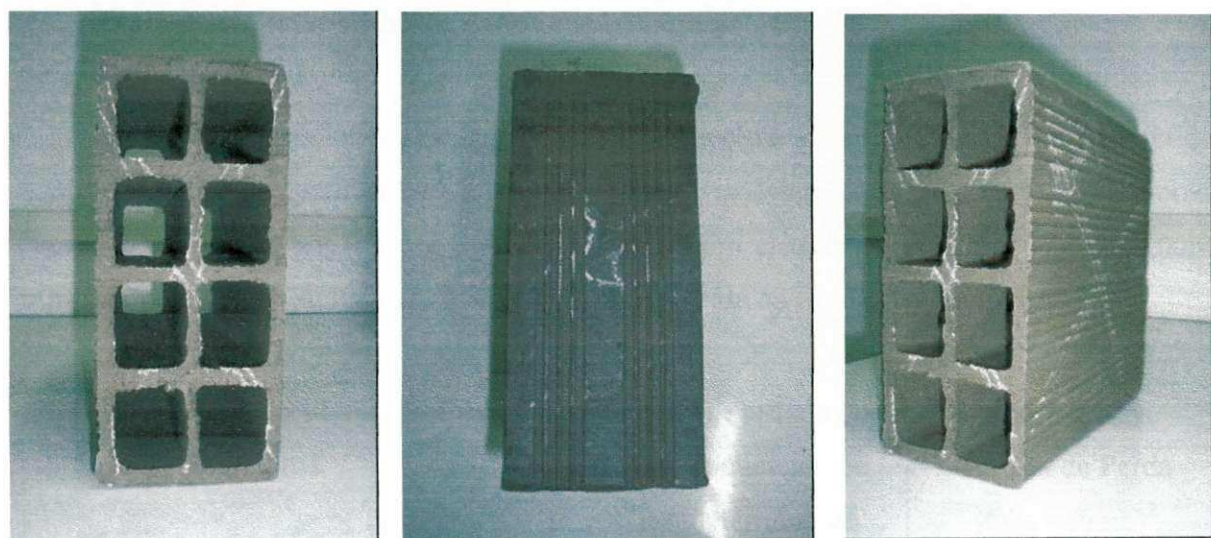


Figura. 4.16 - Vista da amostra 2 na saída do secador industrial.

Vale salientar que os tijolos secos em temperaturas variadas, em qualquer posição na vagoneta, no secador industrial, não apresentaram nenhum indício de defeitos capazes de serem observadas normalmente como, deformações, fissuras ou trincas, como foi o caso da

Tabela 4.12 - Parâmetros utilizados na simulação da secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

Parâmetros	Variável	Valor
Temperatura do ar de secagem no trecho 1	T_1 (°C)	50
Temperatura do ar de secagem no trecho 2	T_2 (°C)	64
Temperatura do ar de secagem no trecho 3	T_3 (°C)	78
Temperatura do ar de secagem no trecho 4	T_4 (°C)	92
Temperatura do ar de secagem no trecho 5	T_5 (°C)	100
Temperatura do ar de secagem no trecho 6	T_6 (°C)	94
Temperatura do ar de secagem no trecho 7	T_7 (°C)	88
Razão de umidade do ar no trecho 1	x_1 (kg/kg)	0,07187
Razão de umidade do ar no trecho 2	x_2 (kg/kg)	0,1449
Razão de umidade do ar no trecho 3	x_3 (kg/kg)	0,2971
Razão de umidade do ar no trecho 4	x_4 (kg/kg)	0,6805
Razão de umidade do ar no trecho 5	x_5 (kg/kg)	1,452
Razão de umidade do ar no trecho 6	x_6 (kg/kg)	0,801
Razão de umidade do ar no trecho 7	x_7 (kg/kg)	0,5762
Razão de umidade do ar no trecho 8	x_8 (kg/kg)	0,3814
Velocidade do ar de secagem	w_a (m/s)	10
Comprimento total do secador	L (m)	73
Altura da vagoneta	H (m)	2,86
Profundidade da vagoneta	C (m)	1,2
Teor de umidade inicial	\bar{M}_o (kg/kg)	0,1569
Temperatura inicial do produto	$\bar{\theta}_o$ (°C)	22,9
Comprimento do tijolo	R_1 (mm)	200
Profundidade do tijolo	R_2 (mm)	90
Altura do tijolo	R_3 (mm)	190
Velocidade da vagoneta	u_p m/s)	0,00088
Dimensão dos furos	$a \times b$ (mm)	34 x 40
Diâmetro hidráulico dos furos	D_h (mm)	35

Um ponto observado, na Figura 4.20, reside no fato de que em certos instantes de tempo, a temperatura do produto que vinha aumentando continuamente e em seguida, mantendo-se constante, decresce um pouco a partir de 75000s. Este fenômeno pode ser explicado devido ao seguinte fato: como a temperatura do ar de secagem foi variada durante a simulação, chegava-se ao ponto que este ar se saturava; geralmente isto ocorria ao final de cada intervalo em que essas temperaturas ficaram constantes e com maior efeito em temperaturas mais baixas. Além disso, ainda analisando a Figura 4.20, percebe-se certa diferença, no que se refere à temperatura do produto, entre os resultados numéricos e experimentais. Isto se deve ao fato da velocidade do ar de secagem no secador industrial e que foi usado para obter os resultados numéricos ser bem maior que a velocidade do ar na estufa. Vale ressaltar ainda que, essa diferença pode ser atribuída também no procedimento usado na realização dos experimentos, mas precisamente na posição do tijolo na estufa. Houve uma perda de tempo (aproximadamente dois minutos) para a aquisição de dados referentes ao ar e ao produto, conforme descrito no capítulo 3, tópico 3.1.2.

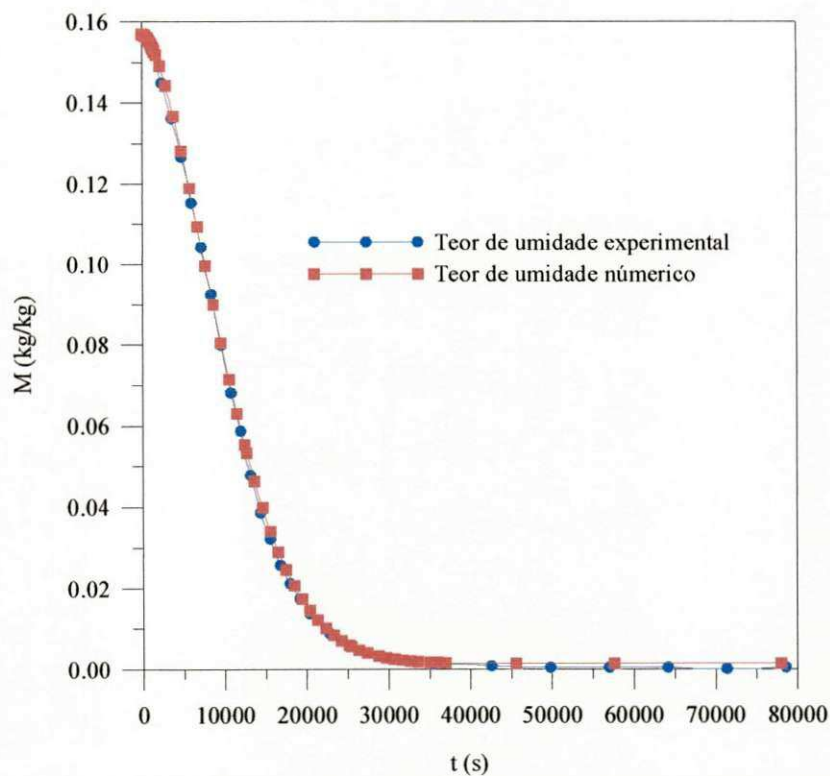


Figura 4.19 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade de tijolos cerâmicos vazados durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

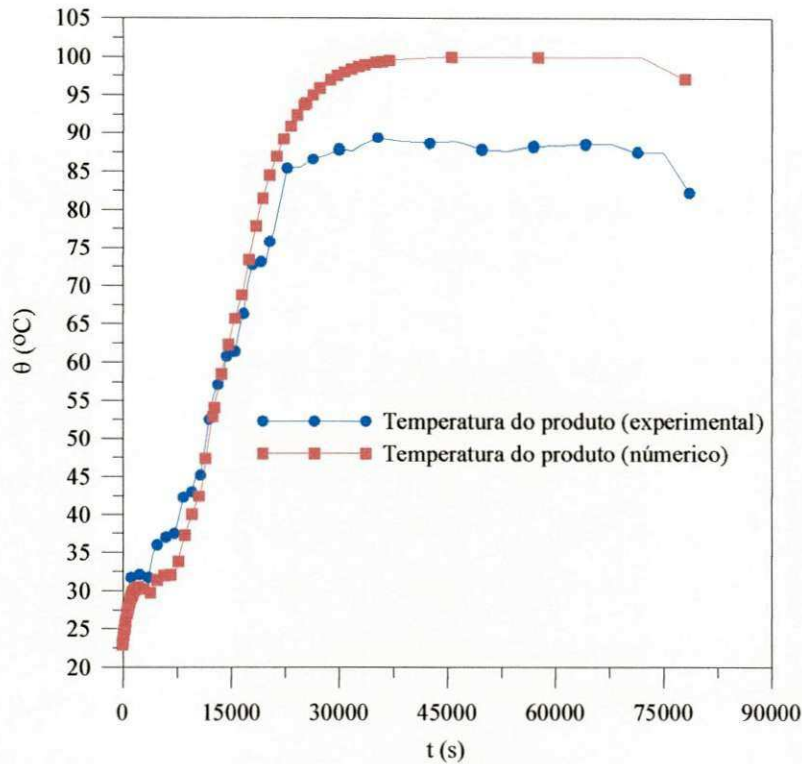


Figura 4.20 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura de tijolos cerâmicos vazados durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

Nas Figuras 4.21-4.25, temos os valores do teor de umidade médio do tijolo (\bar{M}), temperatura do produto (θ), umidade relativa (UR), razão de umidade (x) e pressão de vapor saturado (P_{vs}) em função do tempo, respectivamente, para a primeira camada de tijolos ($y = 0$) e a última ($y = H$). Observa-se claramente que os tijolos da primeira camada secam e se aquecem um pouco mais do que os tijolos da última camada. Esta situação já era esperada, pois o ar de secagem chega a melhores condições nos primeiros tijolos e à medida que vai penetrando nas camadas do produto, torna-se saturado, devido a grande quantidade de água recebida dos mesmos. Isto também pode ser observado, pela análise da umidade relativa; nota-se que na última camada de tijolos a umidade relativa rapidamente alcança valores próximos de 1, assim o ar muito úmido dificulta a secagem. Apesar da diferença entre os valores do teor de umidade e da temperatura em $y = 0$ e $y = H$, em ambos, o equilíbrio é estabelecido ao fim do tempo de secagem. Já a razão de umidade (umidade absoluta) quase não varia da primeira camada de tijolos para a última, enquanto que a pressão de vapor saturado em $y = 0$ é maior do que $y = H$, pelos mesmos motivos que afetam o teor de umidade e a temperatura do produto, citados anteriormente.

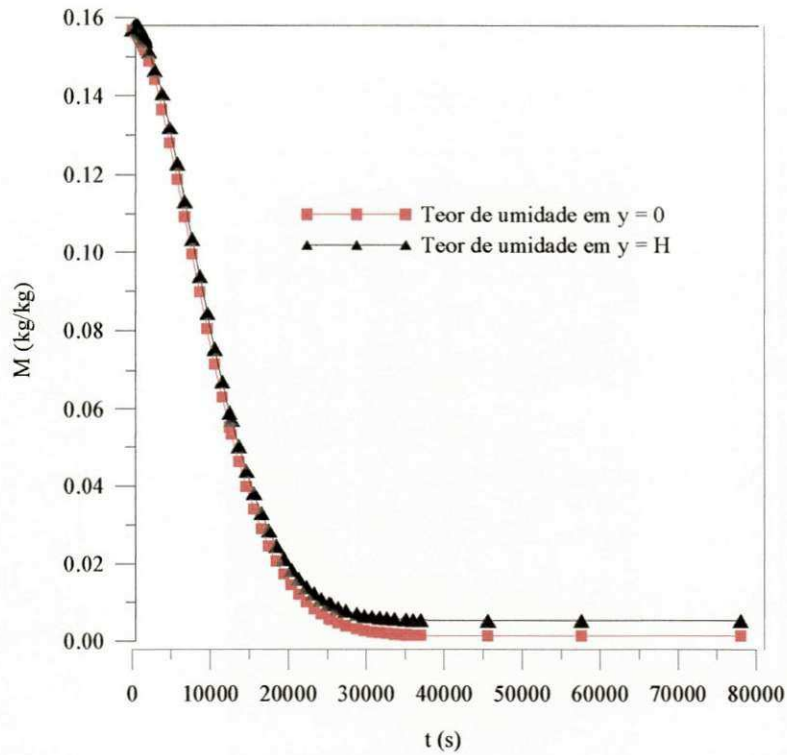


Figura 4.21 - Teor de umidade do produto na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

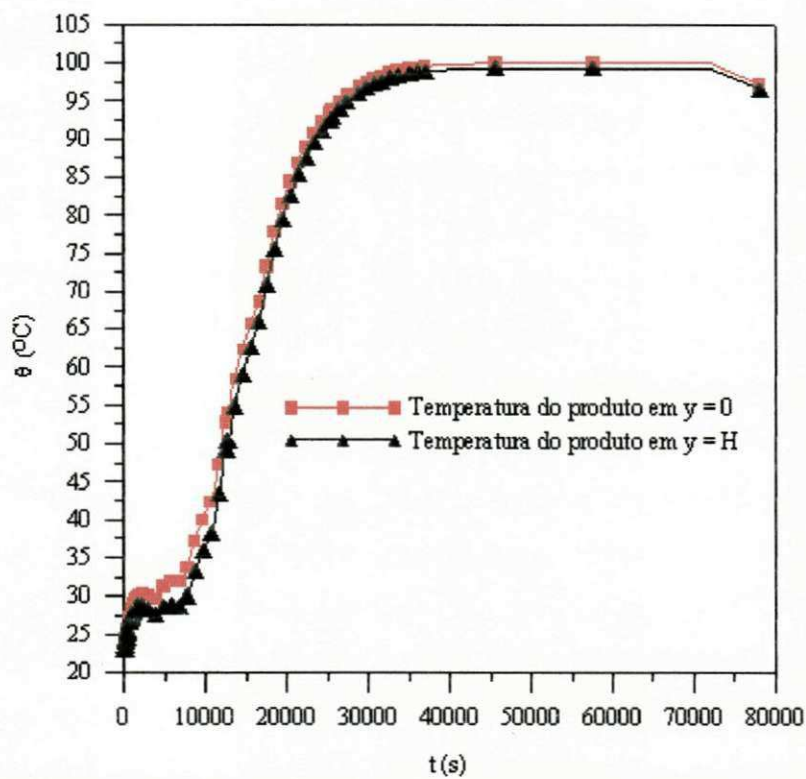


Figura 4.22 - Temperatura do produto na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

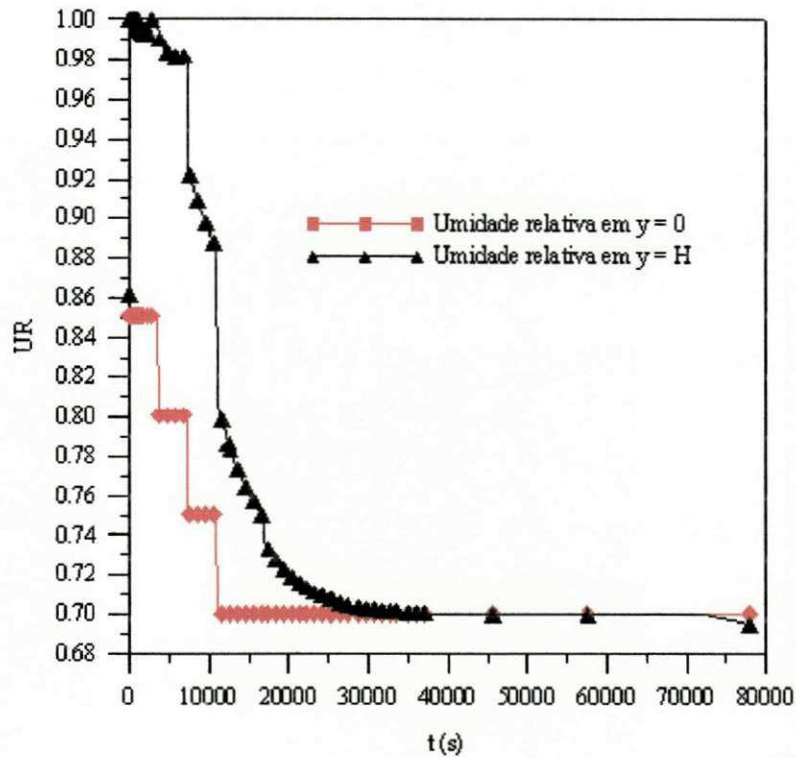


Figura 4.23 - Umidade relativa do ar na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

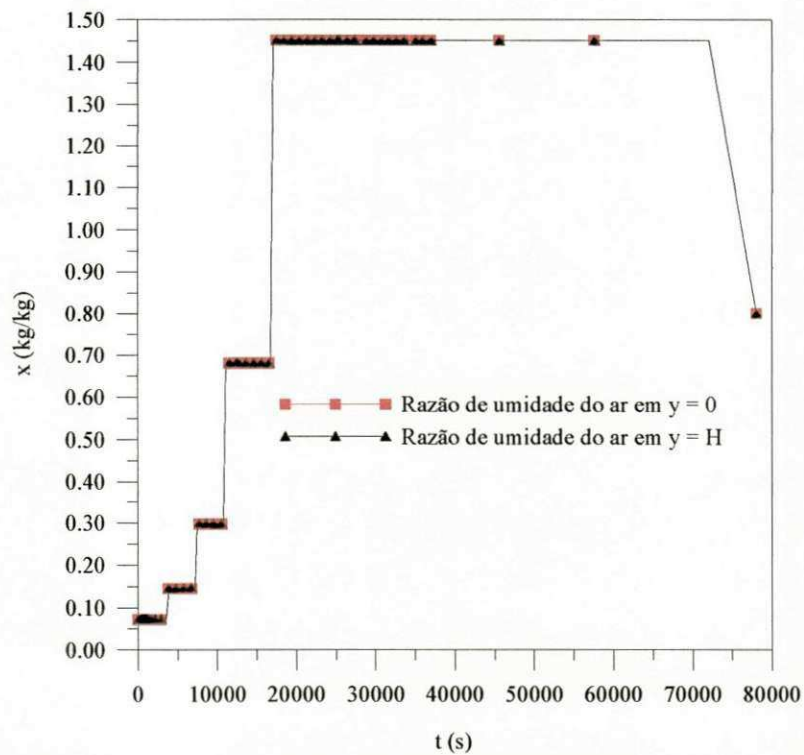


Figura 4.24 - Razão de umidade do ar na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

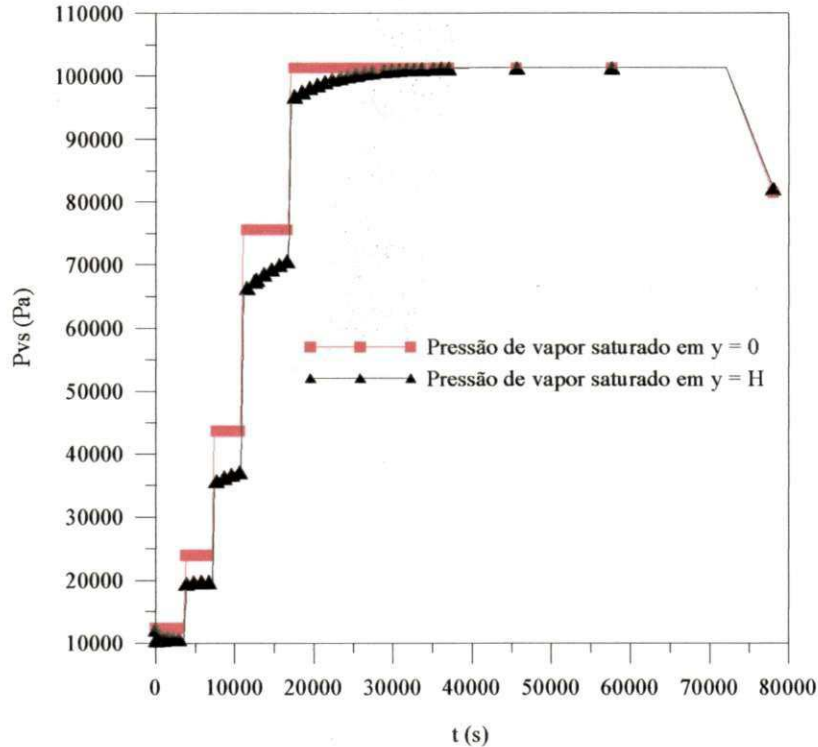


Figura 4.25 - Pressão de vapor saturado na primeira camada ($y = 0$) e na última camada ($y = H$) durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

Nas Figuras 4.26 - 4.31 têm-se, respectivamente, os valores do teor de umidade (M), temperatura do produto (θ), temperatura do ar de secagem (T), umidade relativa (UR), razão de umidade (x) e pressão de vapor saturado (P_{vs}) em oito tempos diferentes ao longo do leito. Percebe-se nos tempos analisado que não há uma grande diferença do teor de umidade e da temperatura tanto do produto como do ar, ao longo do leito, o que implica afirmar que não se verifica a presença de altos gradientes térmicos e hídricos durante a secagem. Isto se dá pelo fato de que a temperatura do ar de secagem utilizada na simulação foi variada (aumentada) gradualmente e sua umidade relativa sempre se manteve em valores elevados, tornando-se o processo de secagem mais controlado.

Altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do leito não são recomendados, porque isto produz uma secagem não-uniforme e grandes tensões termo-hídricas no tijolo, o que pode causar trincas, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem. Verifica-se que a variação do teor de umidade e da temperatura do produto é praticamente nula no início do processo em $t = 12s$. Em termos de umidade relativa observa-se que há uma grande variação da mesma ao longo do leito, principalmente no início

do processo, pois, o ar, devido a sua baixa temperatura, satura-se mais facilmente e, em decorrência da quantidade de água recebida dos produtos nas primeiras camadas, este chega muito úmido nas últimas camadas.

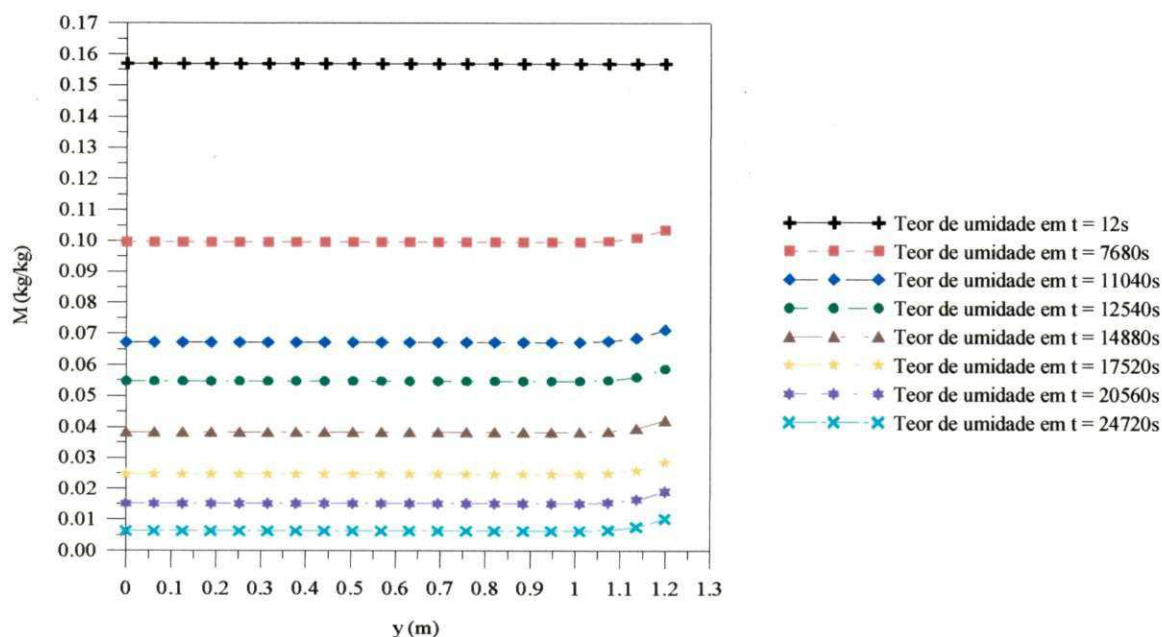


Figura 4.26 - Variação do teor de umidade ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

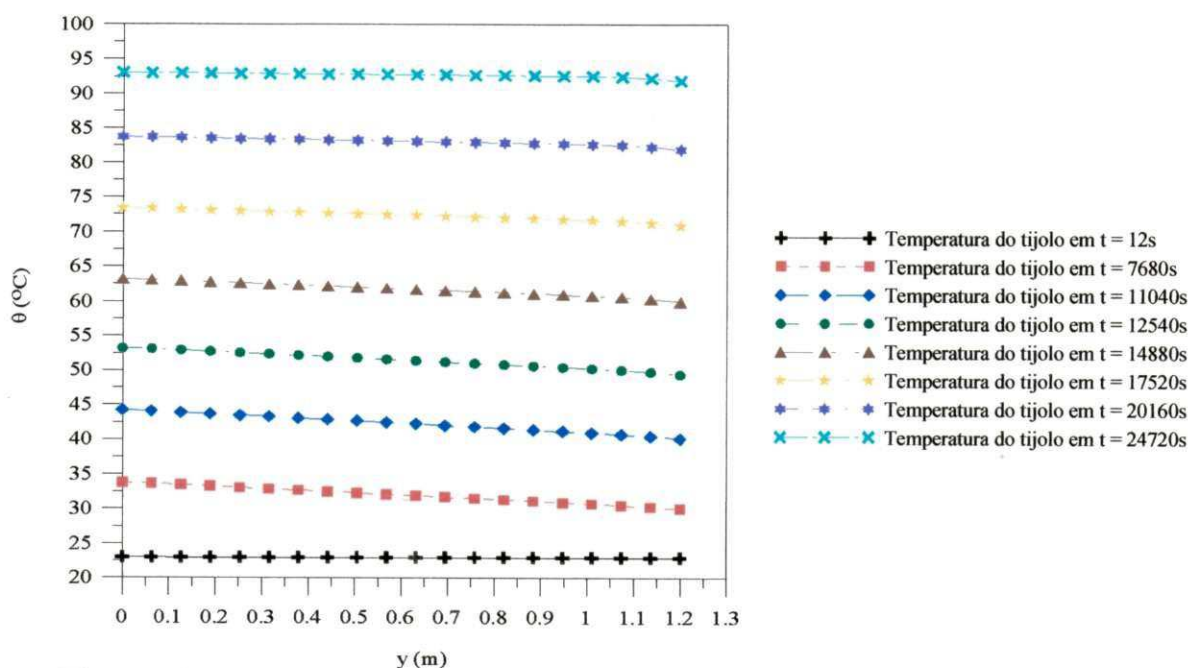


Figura 4.27 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

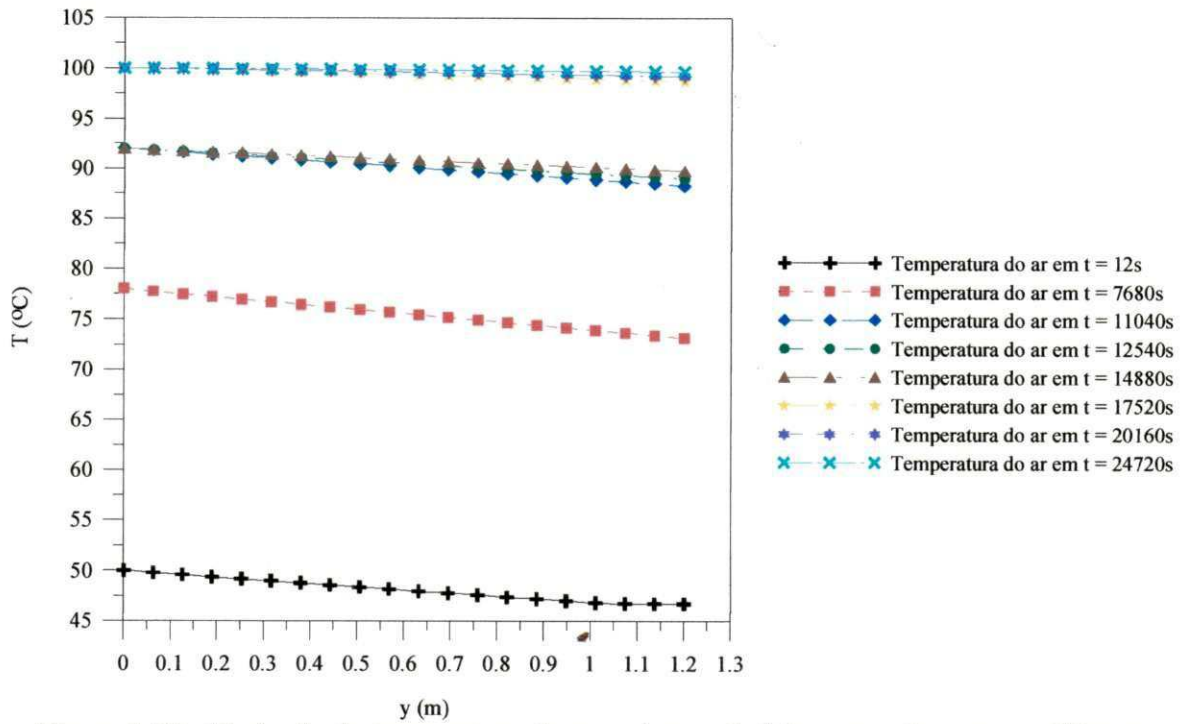


Figura 4.28 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

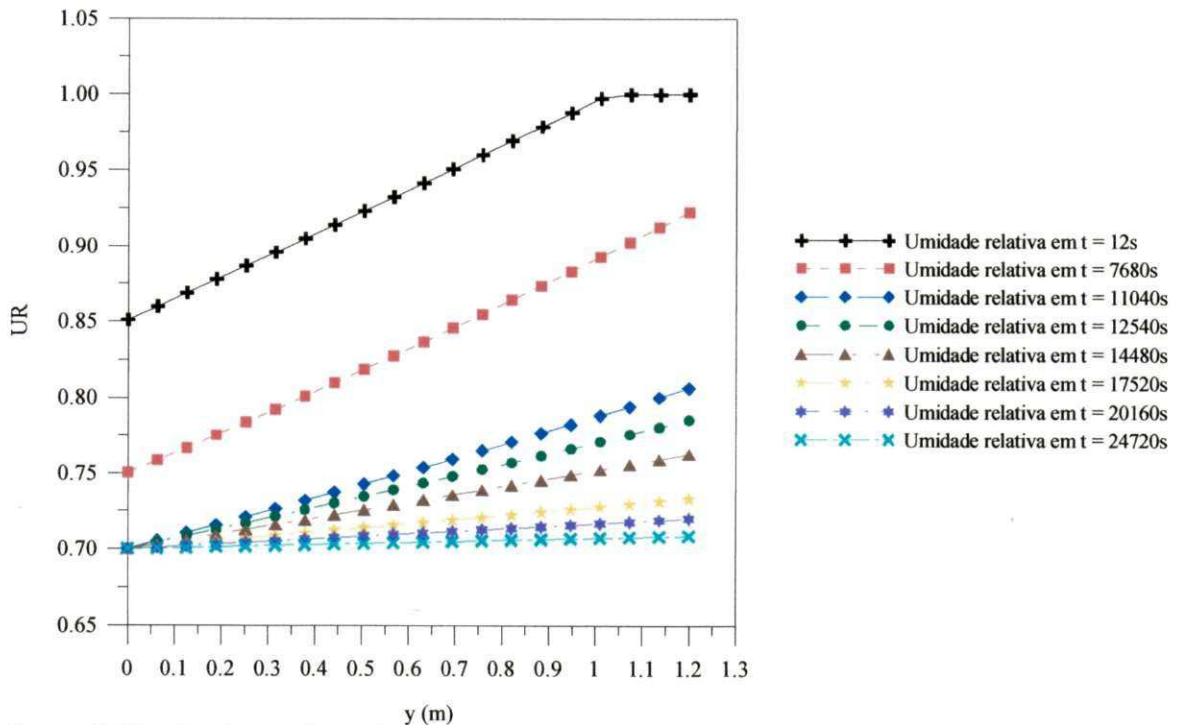


Figura 4.29 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

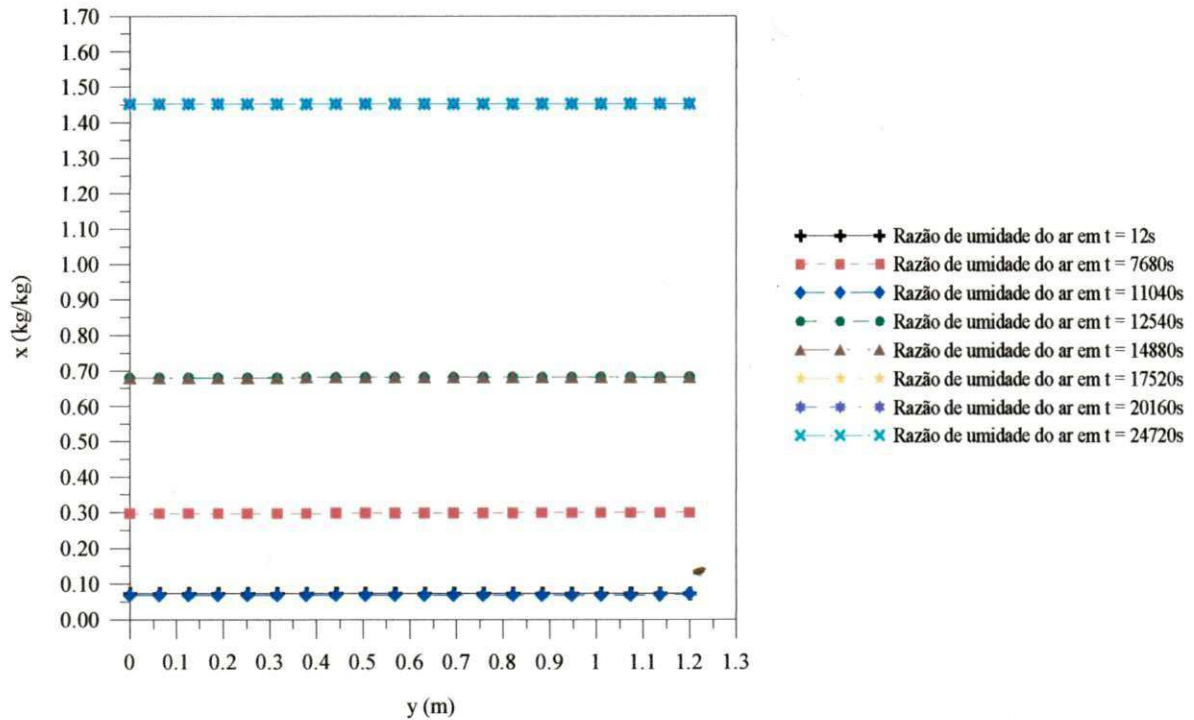


Figura 4.30 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

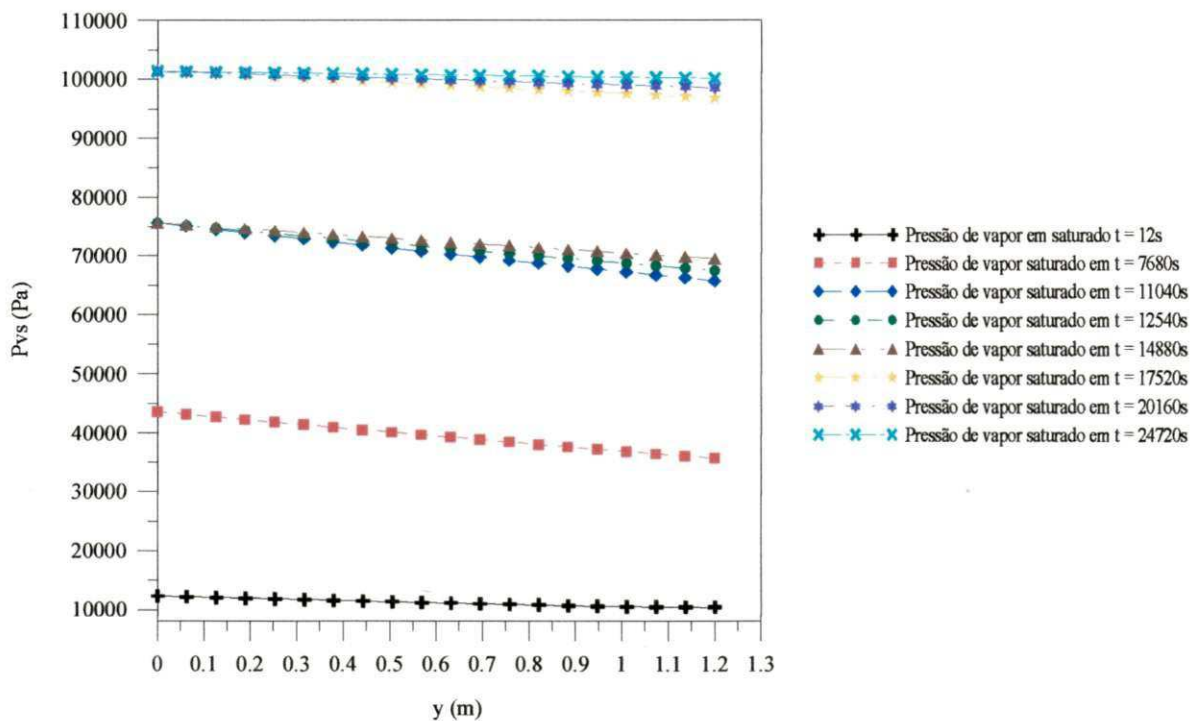


Figura 4.31 - Variação da pressão de vapor saturado para oito tempos diferentes durante o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

Verifica-se na Figura 4.30, que não ocorre variação na razão de umidade, porém, sabe-se da existência desta variação, uma vez que o produto está perdendo água ao longo do leito.

Isto poderia ser percebido numa escala numérica mais apropriada para estes resultados. Em relação à pressão de vapor saturado (Figura 4.31), tem-se uma pequena diminuição em seus valores ao longo da posição no leito, devido a redução da temperatura do ar de secagem dentro do leito gerada pelo fornecimento de calor ao produto e para evaporar a água na superfície do tijolo.

4.2.3 Eficiências energética e exergética do secador

As eficiências energética e exergética são determinadas a partir das equações baseando-se em um conjunto de dados obtidos através das propriedades do ar e do tijolo cerâmico. De posse destes dados, obtiveram-se as variações de entalpia e entropia, para o tijolo e para o ar, e, por conseguinte, determinou-se a exergia para os mesmos, na entrada e saída, do secador. Adotaram-se para o ar, como referência, as seguintes propriedades médias: $P_o = 100$ kPa; $T_o = 25$ °C; $h_o = 298,6$ kJ/kg; $s_o = 6,873$ kJ/kg/K e $x_o = 0,01842$ kg de água/ kg de ar seco, as quais foram consideradas constantes durante o processo. No Anexo 3 são apresentadas todos os dados usados para a determinação das eficiências energética e exergética, em cada trecho do secador, de acordo com a Figura 3.20.

A Tabela 4.13 apresenta a eficiência energética do secador industrial, contínuo de fluxo cruzado, utilizado neste trabalho. Os resultados referem-se aos trechos 1 a 5, do secador (Figura 3.20).

Tabela 4.13 - Eficiência energética média do secador industrial.

Autor	Eficiência Energética		
Este trabalho	$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{aev}} h_{\text{fg}} \text{ a } T \text{ de evaporação}}{\dot{m}_{\text{as}} (h_{\text{ai}} - h_o) + \dot{W}_{\text{soprador}} + \dot{W}_{\text{transporte do produto}}}$	T=50°C	0,0464
		T=64°C	0,0580
		T=78°C	0,0431
		T=92°C	0,0463
		T=100°C	0,0260

Analisando a eficiência energética, no secador industrial, através da equação apresentada na Tabela 4.13, percebe-se que essa eficiência permanece praticamente com os mesmos valores para as temperaturas entre 50 e 92°C, porém, ocorre uma pequena variação apenas em relação a temperatura de 100°C. Os valores obtidos foram muito baixos, indicando ser este secador muito ineficiente. Isto é, há um grande desperdício de energia durante o

processo. Vale salientar que as potências dos ventiladores e para o transporte do produto são pequenas em comparação com a potência do ar aquecido e por isso foram desconsideradas.

Strumillo e Kudra (1986) em seu trabalho apresentam uma equação cuja eficiência energética não apresenta resultados satisfatórios, haja vista que não considera a energia necessária para elevar a temperatura do produto até a temperatura de evaporação, resultando em valores superiores ao real, uma vez que o calor latente de vaporização decresce com a elevação da temperatura. A definição segundo Helvacı e Peker (1989) é criteriosa, uma vez que considera os tempos de permanência do produto e do ar no secador. A equação de Ashworth e Carter (1980) é mais realista, já que penaliza corretamente a operação de secagem em altas temperaturas.

Na Tabela 4.14, tem-se a eficiência exergética do secador convectivo utilizado nesta pesquisa. Observam-se nos dados da Tabela 4.14 que a eficiência exergética proposta neste estudo, apresenta resultados mais coerentes, indicando claramente uma concordância com a eficiência de 1ª lei, também proposta neste trabalho, e que traduz fielmente ser o processo de secagem altamente dissipativo. Em contrapartida, a equação proposta por Kotas (1985) não se apresenta como uma forma viável de se determinar a eficiência exergética, já que só “penaliza” a perda exergética associada à dissipação de calor para o ambiente. Verifica-se ainda, conforme a Tabela 4.14, que com o aumento da temperatura de secagem, tem-se uma menor eficiência exergética.

Tabela 4.14 - Eficiência exergética média do secador industrial.

Autor	Eficiência Exergética	
Este trabalho	$\epsilon x = \frac{\dot{m}_{acv} ex_w^{Ch}}{\Delta Ex_a}$	T = 50°C 0,1361
		T = 64°C 0,1226
		T = 78°C 0,1155
		T = 92°C 0,1182
		T = 100°C 0,0770

O processo de secagem de tijolos cerâmicos em secador tipo túnel contínuo de fluxo cruzado é bastante irreversível, uma vez que, praticamente, toda a energia contida no ar de secagem que sai pela chaminé, não poderá ser reutilizada para esse fim, pelo fato desse ar encontrar-se com uma alta umidade absoluta, sobretudo nas primeiras horas do processo. As condições climáticas como umidade relativa e a temperatura influenciam de forma

significativa, provocando alterações, tanto no desempenho como no rendimento, com a elevação da temperatura. Entretanto, o calor que é perdido, poderá ser reutilizado, em outras finalidades, por exemplo, no aquecimento da argila ou num pré-aquecimento do material (Telljohann, 2003). Nos tempos finais do processo de secagem ($t > 10$ horas), o produto está praticamente seco, então este ar de exaustão pode ser útil para ser aplicado na secagem de outros materiais não sensíveis a altas temperaturas ou até mesmo em ciclo de produção de frio, aquecimento de ambiente, produção de energia elétrica, etc.

A energia que é perdida através do ar de exaustão pode ser útil em várias situações. Barja (2006), por exemplo, mostra em seus estudos, a importância da inserção de projetos de cogeração ao sistema elétrico. São oferecidas sugestões de racionalidade energética na Universidade de Brasília – UnB para a utilização de uma caldeira elétrica para o atendimento à demanda de vapor do seu restaurante universitário.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Conforme a formulação matemática, a análise dos dados experimentais e/ou análises laboratoriais, pode-se concluir que:

a) Caracterização físico-mineralógica

- A matéria-prima estudada é constituída basicamente das seguintes fases mineralógica: caulinita, quartzo e feldspato;
- A matéria-prima apresenta fração de argila (13%) e elevados teores de silte e areia (87%);
- De acordo com a análise química do produto estudado, verifica-se que a mesma apresenta característica de cerâmica vermelha, prevalecendo substâncias como sílica (SiO_2) 57%, alumina (Al_2O) 24% e feldspato (Fe_2O_3) 9%.

b) Secagem em estufa e em secador industrial

- Os resultados obtidos nos experimentos em estufa mostram-se compatíveis com aqueles realizados no forno industrial;

- Verifica-se, através dos experimentos com temperatura variável, que após 700 minutos do início da secagem, o tijolo adquire seu ponto de equilíbrio térmico e cinético. Sua permanência no secador após esse período ocasiona, entre outras desvantagens, desperdício de energia.

c) Retração de secagem

- O tijolo apresentou um encolhimento praticamente uniforme nas suas dimensões em torno de 4,5%, devido à sua posição dentro da estufa, na secagem a uma temperatura variando de 50 a 100°C e umidade à 85%;
- Devido a uma maior área de contato com o ar de secagem no secador industrial, a amostra 1 apresentou, em seu volume, um encolhimento maior, de 14,84%, em relação as amostras 2 e 3, que sofreram um encolhimento de 9,15 e 13,48%, respectivamente.

d) Efeito da temperatura e umidade relativa

- As condições do ar e a temperatura influenciam no aquecimento e na perda de umidade do tijolo cerâmico com geometria paralelepípedica;
- Na secagem de tijolos cerâmicos vazados com temperaturas variadas e elevada umidade relativa, verifica-se ótimos resultados, sob o ponto de vista da qualidade desses tijolos;
- Secagem de tijolos cerâmicos a temperatura constante de 100°C e umidade relativa de 1,5% mostra-se inadequada, uma vez que provoca danos ao produto e conseqüentemente uma má qualidade.

e) Modelagem e simulação

- O método numérico de volumes finitos, usado para a discretização das equações mostra-se eficiente, possibilitando uma análise coerente do processo;
- A equação de Page mostra-se eficiente na descrição da secagem de tijolos vazados e que esses tijolos encontram seu ponto de equilíbrio a partir de 700 minutos, concordando com os resultados experimentais;

- Excelente concordância, com relação à perda de umidade e o aquecimento dos tijolos nos primeiros 3000 segundos, foi obtida. Uma pequena variação, devido à influência do aumento da umidade relativa foi verificada para tempos superiores;
- No início do processo de secagem, a umidade relativa atinge 100% nas primeiras camadas do leito, devido ao alto teor de umidade dos tijolos e a baixa temperatura do ar de secagem;
- Secagem com temperaturas variadas de 50 à 100°C acompanhada de uma umidade relativa de 70 à 85% geram baixos gradientes de umidade e temperatura ao longo do leito, evitando tensões e, conseqüentemente, danos a qualidade do tijolo.
- Informações relacionadas às características e propriedades do ar e do produto, além de resultados provenientes da simulação computacional, possibilitam determinar as eficiências, energética e exergética, do secador;
- Constatam-se boa aproximação entre as curvas referentes aos dados numéricos e experimentais, viabilizando a utilização do programa computacional aplicado.

f) Eficiência do secador

- O processo de secagem é caracteristicamente dissipativo, com alta destruição de exergia, sendo assim, altamente consumidor de energia;
- A definição de eficiência baseada na segunda lei da termodinâmica mostra-se de grande importância, visto que leva em conta a qualidade da energia utilizada no secador;
- Verifica-se, através da eficiência energética, que o secador proporciona um grande desperdício de energia (mais de 90%) durante o processo de secagem;
- A energia que é perdida por exaustão, a partir da posição $z = 25$ m, no secador, após 700 minutos de secagem, pode ser reutilizada para secagem de materiais cerâmicos, produção de energia elétrica, aquecimento ou resfriamento de ambientes entre outras utilidades.

A partir do estudo realizado, disponibiliza-se informações e subsídios essenciais às indústrias de materiais cerâmicos, referentes à otimização do funcionamento de secadores industriais contínuos tipo túnel de fluxos cruzados e fabricação de tijolos cerâmicos vazados, priorizando a qualidade e economia.

Aqui são apresentados resultados e sugestões que abrangem desde o avanço tecnológico do setor cerâmico, até dados que garantam a economia de energia e a boa qualidade do produto levando-se em consideração as condições do produto e do ar de processo.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

- ⇒ Aplicar o modelo matemático deste trabalho em processo de secagem de outros produtos e analisar os efeitos das variáveis do processo durante todo o trajeto do produto ao longo do secador;
- ⇒ Analisar o reaproveitamento do ar de exaustão oriundo do processo de secagem em materiais cerâmicos bem como nos mais diversos setores industriais;
- ⇒ Realizar análise termo-econômica do processo de secagem e secadores de materiais cerâmicos, nas abordagens, teórica e experimental;
- ⇒ Estudar a microestrutura do tijolo cerâmico durante o processo de secagem, visando obter informações sobre o possível surgimento de trincas e deformações.

REFERÊNCIAS

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

AFONSO, P. C. J.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AGHBASHLO, M.; KIANMEHR, M.H.; SAMIMI-AKHIJAHANI, H. Influence of drying conditions on the effective moisture diffusivity, energy of activation and energy consumption during the thin-layer drying of berberis fruit (Berberidaceae). **Energy Conversion and Management**. v. 49, n. 10, p. 2865–2871. 2008.

AKPINAR, E. K.; MIDILLI, A.; BICER, Y. Energy and exergy of potato drying process via cyclone type dryer. **Energy Conversion and Management**. v. 46, n. 15-16, p. 2530–2552. 2005.

AKPINAR, E. K.; MIDILLI, A.; BICER, Y. The first and second law analyses of thermodynamic of pumpkin drying process. **Journal of Food Engineering** v. 72, n. 4 p. 320–331. 2006.

AKPINAR, E. K. **Energy and exergy analysis of drying of red pepper slices in a convective type dryer** International Communication of Heat Mass Transfer. v. 31, n.8, p. 1165-1176. 2004.

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 Cerâmica, Universidad de Valência – Cerâmica Industrial, 2000. Disponível no site: <http://www.cerâmica industrial. gov.br> Acesso em 31 de outubro de 2007.

ALKIDAS, A. C. The application of availability and energy balances to a diesel engine. **Jornal of Engineering Gas Turbines Power**. v. 110, p. 462-468. 1988.

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.

ALSINA, O. L. S.; BRASILEIRO, I. M. N. Drying kinetics of west indian cherry. In: Inter-American Drying Conference (IADC), 1997. Itu. **Proceedings...** v.B, p.434-440.

ALVARENGA, L. C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J. B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão preto sob condições de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. v.5, n.1, p.5-18, Junho 1980.

ANDRADE, M. C.; SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B.; BUOSO, A. **RMI's: Rochas e minerais para cerâmica de revestimento**. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia – RJ. 2005.

ASHWORTH, J. C.; CARTER, J. W. The performance of convective dryers as a function o energy efficiency, capital cost and solids residence time. **Drying'80**. Montreal: Arun S. Mujumdar. V.1, pp. 293-303, 1980.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A. Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. **Journal of Food Engineering**, v.55, n. 4, p.323-330, 2002.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico**. 2006. p. 157. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas). Departamento de Engenharia Mecânica. Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília – DF.

BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; VEJA-MERCADO, H. **Deshidratación de alimentos**. Ed. Acribia S.A. 2000, 297p.

BASUNIA, M. A.; ABE, T. Thin-layer solar drying characteristics of rough rice under natural convection. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 4, p.295-301, 2001.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO, J. J. S. **Estudo experimental da secagem de tijolos cerâmicos**. 2005. Anais do II Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande PIBIC/UFPB-CCT. CD-ROM.

BATISTA, V. R. **Secagem de materiais argilosos: modelagem, simulação e experimentação**. 2006. 80 p. Relatório Técnico-Científico PIBIC/UFCG-CCT.

BATISTA, V. R.; NASCIMENTO J. S. **Secagem de materiais argilosos: modelagem, simulação e experimentação**. 2007. Anais do IV Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande PIBIC/UFCG-CCT.

BEJAN, A. **Advanced engineering thermodynamics**. Wiley, New York. 1988.

BEJAN, A. **Second law analysis in heat transfer**. Energy. v.5. n. 8-9, p.720-732, 1980.

BEN MABROUK, S.; BELGHITH, A. A. Numerical simulation of the drying of a derfomable material: evolution of the diffusion coefficient. **Drying Technology**, v.13, n.8-9, p.1789-1805, 1995.

BERG, C. A. Process integration and the second law of Thermodynamics: future possibilities. **Energy**. v.5. n. 8-9, p.733-742, 1980.

BOEHM, R. F. **Design analysis of thermal systems**. Wiley, New York, 1987.

BOTTERIL, J. S. M.; **Fluid-Bed Heat Transfer**, Academic Press, London, 1975.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**, Connecticut: AVI Publishing Company, Inc., 1974, 265p.

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.

BRZUSTOWSKI, T.A. Toward a second-law taxonomy of combustion processes. **Energy**. v. 5, n. 8-9, p.743-755, 1980.

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.

CADÉ, M. A. **Secagem de tijolos cerâmicos vazados: modelagem e simulação**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso. Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande-PB.

CARMO, J. E. F. **Difusão em sólidos esferoidais oblatos: modelagem e simulação**. 2000. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina grande.

CEYLAN, I.; AKTAS, M.; DOGAN, H. Energy and exergy analysis of timber dryer assisted heat pump. **Applied Thermal Engineering**. v. 27, n. 1, p. 216–222. 2007.

CHAWLA, D. S.; BHATE, S. R.; e KUSHWAHA, H. S. Numerical Simulation of Crack Growth and Arrest in a Vessel under Pressure Thermal Shock. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 77, p. 261 - 271. 2000.

CLEMENTINO, L. D. A. **conservação de energia por meio da cogeração de energia elétrica**. Ed. 1 Editora Érica Ltda. 2001.

COLAK, N.; HEPBASLI, A.; Performance analysis of drying of green olive in a tray dryer. **Journal of Food Engineering**. v. 80, n. 4, p. 1188–1193. 2007.

CORNELISSEN, R. L. **Thermodynamics and sustainable development**. Ph.D. thesis. University of Twente, The Netherlands, 1997.

CORZO, O.; BRACHO, N.; VASQUEZ, A.; PEREIRA, A. Energy and exergy analyses of thin layer drying of coroba slices. **Journal of Food Engineering**. v. 86, n. 2, p. 151–161. 2008.

COSTA, Y. J. R. **Análises energética e exergetica de um motor de combustão interna operando com mistura de diesel e gás natural**. 2007. Tese (Doutorado). Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande-PB.

DADAM A.P.; NICOLAU, V.P.; LEHMKUHL, W. A.; JAHN, T. G.; KAWAGUTI, W. M.; LORENZI, R. S.; FONSECA, L. S. **Instrumentação e medição de temperaturas em uma carga de tijolos no interior de um forno túnel - LabCet - Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis - SC - Brasil**, 2005.

DALPASQUALE, V. A.; QUEIROZ, D. M.; PEREIRA, J. A. M; SASSERON, J. L. Curvas de secagem de amendoim utilizando teoria de difusão de líquido. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v. 9 - 10, n.1 - 2, p.16-19, 1984/1985.

DEGROOT, S. R. **Thermodynamics of irreversible processes**. Amsterdam: North Holland Publishing Company, 1951.

DINCER, I.; SAHIN, A. Z. A new model for thermodynamic analysis of a drying process. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. v. 47, n. 4, p. 645-652. 2004.

DOGU, Y.; ASLAN, E.; CAMUSCU, N. A Numerical model to determine temperature distribution in orthogonal metal cutting. **Journal of Materials Processing Technology**. V. 171, n. 1, p. 1 - 9, 2006.

DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v.69, n. 2, p.161-165, 2005a.

DOYMAZ, I. Drying characteristics and kinetics of okra. **Journal of Food Engineering**, v. 69, n. 2, p.275-279, 2005b.

ELIAS, X. **A fabricação de materiais cerâmicos**. Barcelona-Espanha, 1995, 205p.

FACINCANI, E. **Tecnologia cerâmica: i laterizi**. 2. ed. Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1992.

FARIAS, S. N. **Secagem de sólidos esféricos usando o método de Galerkin**. 2002. 60 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

FAVALLI, R. C.; PIMENTA, M. M.; PASCHOALL, J. O. A. **Modelagem matemática da secagem por atomização: trajetória das gotículas dentro do secador** Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Instituto de Física e Escola de Engenharia Mecânica da Universidade de São Paulo. 2001.

FLYNN, P. F; HOAG, K. L; KAMEL, M. M. **A new perspective on diesel engine evaluation based on second law analysis.** SAE paper No. 840032, Primus RJ. 1984.

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

FORTES, M.; OKOS, M. R.; **Advances in drying.** Hemisphere Publishing Corporation, 1980, Washington, U.S.A, v.1, p.119-154, 1980.

FRICKE, J. **A cerâmica.** Editora Presença Ltda, Lisboa, 152p. 1981.

GEANKOPLIS, C. J. Drying of process materials. In: **Transport processes and unit operations.** Boston: Allyn and Bacon, ed 2, 1983.

GEBHART, B. **Heat conduction and mass diffusion.** New York: McGraw-Hill, Inc., 1993, 634 p.

GOMES, C. F. **Argilas: O que são e para que servem.** Fundação Calouste Gulbekian, Lisboa 1986.

GORINI, A. P. F.; CORREA, A. R. **Cerâmica para revestimentos.** BNDES Setorial, 201-251, 1999.

GÜR, C. H.; TEKKAYA, A. E., Numerical investigation of non-homogeneous plastic deformation in quenching process A. **Materials Science and Engineering**, v. 319 – 321, p. 164 – 169. 2001.

GYFTOPOULOS, E. P.; BERETTA, G. P. **Thermodynamics: fundamentals and applications**. Macmillan. New York, 1991.

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.

HASATANI, N.; ITAYA, Y. Deformation characteristic of ceramics during drying, **Proceeding of the 8 th International Drying Symposium (IDS, 92)**. Montreal, 1992, pp 190-199, Parte A.

HELVACI, S. S.; PEKER, S. Analysis of the performace of a cascade type rice dryer. **Drying'89**. Versailles: Arun S. Mujumdar e Michel A. Roques, pp. 550-555, 1989.

HENRIQUES JUNIOR, M. F.; SCHWOB, M. R. V.; FERREIRA JUNIOR, J. A. **Manual da conservação de energia na indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: Ministério da Ciência e Tecnologia/INT, 40 p, 1993.

HEPBASLI, A.; AKDEMIR, O. Energy and exergy analysis of a ground source (geothermal) heat pump system. **Energy Conversion and Management**. v. 45, n. 5, p. 737–753. 2004.

INCROPERA, F. P.; De WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. New York: J. Wiley & Sons, 2002.

ITAYA, Y.; TANIGUCHI, S.; HASATANI, M. A numerical study of transient deformation and stress behavior of a clay slab during drying, **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p 1-21, 1997.

JIA, X.; JOLLY, P.; CLEMETS, S.; Heat pump assisted continues drying Part. 2: Simulation results. **International Journal of Energy Research**. v. 14, n. 2, p. 771-782. 1990.

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

KAWAGUTI, W. M. **Estudo do comportamento térmico de fornos intermitentes tipo "paulistinha" utilizados na indústria de cerâmica vermelha.** 2004. 87 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina.

KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials.** New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1992. 502p.

KESTIN, J. Availability: the concept and associated terminology. **Energy**. v. 5, n. 8-9, p. 679-692, 1980.

KETELAARS A. A. J.; JOMAA W.; PUIGGALI J. R.; COUMANS W. J. Drying shrinkage and stress . **proceedings of the International Drying Symposium, Parte A**, p 293-303, 1992b.

KETELAARS, A.A.J.; LAUF, O.; COUMANS, W.J.; KERKHOF, P.J.A.M. **Determination of diffusion coefficient from experimental moisture concentration profiles in clay**, **Drying** 92, 1992a, pp. 345-352 Part A.

KOTAS, T. J. **The exergy method of thermal plant analysis.** Tiptree, Essex: Anchor Brendon Ltda. 1985.

KOTAS, T. J.; MAYHEW, Y. R.; RAICHURA, R. C. Nomenclature for exergy analysis. **Journal of Engineering of Power**. v.209, pp. 275-280. 1995.

LASSERAN, J. C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**. Viçosa. v. 3, n. 3, p.17-46, 1978.

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.

LIMA, A. G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. 1995. 190p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, Brasil.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999. 256p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), UNICAMP, São Paulo.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A. Modelos concentrados de transferência de calor e massa aplicados a corpos com forma arbitrária. **Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**. Natal-RN. 2000, CD-ROM.

LIMA, A. G. B.; NEBRA, S. A. **Influência de parâmetros geométricos na cinética de secagem de elipsóides sólidos**. In: XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados. São Carlos - São Paulo. v. I. p. 195-202. 1997.

LIMA, L. A. **Difusão em sólidos com geometria arbitrária: uma abordagem concentrada**, 2001, 49 p. Relatório técnico-científico PIBIC/UFPB-CCT.

LUCENA, C. G.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. **Convective drying of ceramic bricks with rectangular holes**. In: IV Encontro da SBP Mat, 2005. Recife - Brasil. Anais do IV Encontro da Sociedade Brasileira de Pesquisa em Materiais, 2005. v. 1. p. 1-1.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. New York: Pergamon Press, 1966, 523p.

LUIKOV, A. V.; MIKHAILOV, Y. A. **Theory of energy and mass transfer**. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1965, 392p.

LUZ, J. C.; SILVA, J. B.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, R. M.; MATOS, J. M. E.; PASKOCIMAS, C. A. **Caracterização tecnológica de argilas da região de timon-MA- 2008** 52º Congresso Brasileiro de Cerâmica – Florianópolis - SC.

MACEDO, R. S. **Estudo das matérias-primas e tijolos furados produzidos no Estado da Paraíba**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, CCT/UFCEG – Campina Grande – PB, 1997.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. Thin-layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**. London, v.29, n. 1, p.75-97, 1996.

MAFRA, A. T. **Proposta de indicadores de desempenho para a indústria de cerâmica vermelha**. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: UFSC, 1999.

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.

MARIZ, T. F. **Secagem da casca de caroço de algodão em leito fixo**. 1986. 139p. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Química, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

MIDILLI, A.; KUCUK, H. Energy and exergy analyses of solar drying process of pistachio. **Energy**. v. 28, n. 6, p. 539-556, 2003.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**. v. 66, n. 4, p.513-518, 2005.

MORAN, M. J. **Engineering thermodynamics**. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. Wiley. New York. 1992.

NAKONIECZNY, K. Entropy generation in a diesel engine turbocharging system. **Energy**. v. 27, n. 11, p. 1027–1056. 2002.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de caso: secagem de materiais cerâmicos**. 2002. 205p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B.; NEVES, G. A.; BATISTA, V. R.; SANTANA, E. W. F.; BELO, F. A.; SANTANA, L. N. Experimental drying of ceramic bricks including shrinkage. **Proceedings of the 18 th International Congress of Mechanical Engineering, Ouro Preto-MG**. 2005. v. 1. p. 1-7.

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.

NETO, V. C. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural**. 2001. 174 p. Tese (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NEVES, G. A. **Introdução à ciência dos materiais – Materiais Cerâmicos, Curso Especial PRÓ-DESING – SENAI – CNTCC/SENAI-PB**, 1998.

NEVES, G. A. **Processamento de materiais cerâmicos** – Curso de Treinamento em Grês Sanitário-Celite-Recife-PE, 1999.

NICOLAU, V. P.; HARTKE R. F.; JAHN, T. G; LEHMKUHL, W. A. **Análise numérica e experimental de um forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos.** *Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, João Pessoa – PB, 10p, 2002.

NICOLAU, V. P.; LEHMKUHL, W. A.; KAWAGUTI, W. M.; DADAM A. P.; HARTKE R. F.; JAHN, T. G. **Análise experimental de um secador contínuo utilizado na indústria de cerâmica vermelha.** *Proceedings of the III National Congress of Mechanical Engineering*, Belém – PA, 10p, 2004.

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 Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

OLIVEIRA, J. L. A. **Sistemas de cogeração**. 2003. 89p. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Goiás, Goiana.

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 da Paraíba, Campina Grande.

OLIVEIRA, M. C; BERNILS, M. F. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas brancas e de revestimentos** – São Paulo: CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2006, 90p (série P+L). - Disponível no site www.cetesb.sp.gov.br - Acesso em 31 de outubro de 2007.

OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B. **Drying of wheat based on the non-equilibrium thermodynamics: a numerical study.** *Drying Technology*. v. 27, p. 306-313, 2009.

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

OZDEMIR, M.; DEVRES, Y.O. The thin layer drying and rewetting equation for shelled yellow corn **Transaction of the ASAE**, v.23, n. 5, p.1254-1260, 1995.

PAGE, C. **Factors influencing the maximum rate of drying shelled corn in layers.** West Lafayette, 1949. MSc Thesis, Purdue University.

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.

PARRY, J. L. Mathematical modeling and computer simulation of heat and mass transfer in agricultural grain drying. A review. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, n.1, p.1-29, 1985.

PARTI, M. Evaluation of selected mathematical models for grain drying. **Proceedings of the International Drying Symposium**. 1990. Praha, v.3, p.153-162.

PARTI, M. Selection of mathematical models for drying grain in thin-layers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.54, n. 4, p. 339-352, 1993.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**, New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980, 197 p.

PRIGOGINE, I. **Étude thermodynamique des phénomènes irréversibles.** Lieja: Editora Desoer, 1947.

QUEIROZ, A. B. **Conservação de energia no setor industrial: cerâmica estrutural.** Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE e Fundação Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco – ITEP. 1988.

QUEIROZ, M. R. **Estudo teórico-experimental da cinética de secagem de bananas.** 1994. 176p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP.

RAKOPOULOS, C. D.; ANDRITSAKIS, E. C.; KYRITSIS, D. K. Availability accumulation and destruction in a DI Diesel engine with special reference to the limited cooled case. *Heat Recovery Syst & CHP.* v. 13, n. 3, p. 261–276. 1993.

RAKOPOULOS, C. D. Speed and load effects on the availability balances and irreversibilities production in a multi-cylinder turbocharged diesel engine. *Applied Thermal Engineering.* v. 17, n. 3, p. 299–313. 1997.

RECCO, G. Estudo para utilização de energia térmica proveniente de forno cerâmico para secagem de cerâmica. *Cerâmica Industrial.* Moliza revestimentos cerâmicos Ltda. SC - Brasil. v. 13, n. 3, 2008.

REISTAD, G. M. Available energy conversion and utilization in the United States. New York. *ASME Journal of Engineering for Power.* v. 97, p 429–434. 1975.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R. M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. *Revista Brasileira de Armazenamento.* v.30, n.2, p.163-171, 2005.

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

ROSSI, S. J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural.** São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980.

ROVEDO, C. A.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P.E. Drying of foods: evaluation of drying model. **Journal of Food Engineering**, v.26, n. 1, p.1-12,1995a.

SANCHEZ-MUNHOZ, L.; CAVA, S. S.; PASKOCIMAS, C. A.; CERISUELO, E.; LONGO, E.; CARDA, J. B. Influência da composição das matérias-primas no processo de gresificação de revestimentos cerâmicos, **Cerâmica Industrial**. v. 48, n. 307, p. 137-145. 2002.

SANTANA, E. W. F. **Avaliação da secagem e queima de placas cerâmicas**. 2006. 97 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e em Engenharia dos Materiais). Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

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.

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.

SCHWOB, M. R. V. **Consumo de gás natural no setor cerâmico brasileiro e perspectivas de expansão**. Estudo encomendado pela Petrobrás ao INT, Rio de Janeiro, 2005.

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

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, W. P. **Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. 2007. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande.

SOKHANSANI, S. **Advances in drying**. New York: Hemisphere Publishing Corporation. v.3, 1984. Chapter four: Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality, p.121-179.

STEFFE, J. F.; SINGH, R. P. Theoretical and practical aspects of rough rice tempering. **Transactions of the ASAE**, v.23, n.3, p.775-782, 1980.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, science and design**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA, 448p. 1986.

STRUMILLO, C.; LOPEZ-CACICEDO, C. Energy aspects in drying. In: **Handbook of industrial drying**. New York: Arun S. Mujumdar, 1987. pp. 823-862.

SYAHRUL, S.; DINCER, I.; HAMDULLAHPUR, F. Thermodynamic modeling of fluidized bed drying of moist particles. **International Journal of Thermal Science**. v. 42, n. 7, p. 691-701. 2003.

SYAHRUL, S.; HAMDULLAHPUR, F.; DINCER, I. Exergy analysis of fluidized bed drying of moist particles. **Exergy an International Journal**. v. 2, n. 2, p. 87-98. 2002.

TAPIA, R. S. E. C. **Gás natural na indústria**, vol. II. Relatório de Projeto INT - FINEP/CTPETRO, p.10,11 e24, Rio de Janeiro, 2002.

TAPIA, R. S. E. C.; VILLAR, S. C.; HENRIQUE JR. M. F. **Manual para a indústria de cerâmica vermelha**. Série uso eficiente de energia. Rio de Janeiro: SEBRAE, 2000, 90 p.

TAPIA, R. S. E. C.; VILAR, S. C. **Manual para a indústria de cerâmica vermelha**. Série Uso Eficiente de Energia, Ed. Sebrae, Rio de Janeiro, Brasil, 2000.

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.

TERADA, O. A. **Uso eficiente da energia**, XXVII Encontro Nacional da ANICER – Seminário de Tecnologia em Cerâmica. São Paulo, 1998.

TOMBA M. A. G.; CAVALIERI, A. L. Numerical of the thermal shock of alumina disk with different surface finish. **Journal of European Ceramic Society**, , 21, p. 1205 – 1212. 2001.

TOPIC, R. Mathematical model for exergy analysis of drying plants. **Drying Technology**. v. 13, n. 1, p. 437–445. 1995.

TORRES, E. A.; GALLO, W. L. R. Exergetic evaluation of a cogeneration system in a petrochemical complex. **Energy Conversion Management**. n.39. v. 16–18. p. 1845–52. 1998.

UTLU, Z.; HEPBASLI, A. Analysis of energy and exergy use of the Turkish residential-commercial sector. **Building Environment**. v.40, n. 5, p. 641–655. 2005.

UTLU, Z.; HEPBASLI A. A review on analyzing and evaluating the energy utilization efficiency of countries. Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Turkey. Renewable and Sustainable. **Energy Reviews**. v.1. p. 1–29. 2007.

VAN DER ZANDEN, A. J. J. Modelling and simulating simultaneous liquid and vapour transport in partially saturated porous materials. **Mathematical modeling and numerical techniques in Drying Technology**, Ed. Marcel Dekker, Inc., New York, USA. 1997.

VAN DER ZANDEN, A.J.J.; SCHOENMAKERS, A.M.E.; KERKOF, P.J.A.M. Isothermal vapour and liquid transport inside clay during drying, **Drying Technology**, Vol. 14, nos. 3 e 4, pp 647-676, 1996.

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

WANG, B.; MAI, Y.; ZHANG, X., Thermal Shock Resistance of Functionally Graded Materials. **Acta Materialia**, v. 52, p. 4961 – 1972. 2004.

WANG, X., Stress intensity factors and weight functions for deep semi-elliptical surface cracks in finite-thickness plates. **Fatigue Fracture Engineering Materials Structure**, v. 25, p. 291 – 304. 2001.

WITWER, H.; FARIA, R. W. **Projeto de conservação de energia nas pequenas e médias indústrias do Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha**. Relatório Final. Rio de Janeiro: 1997.

XU, W. J.; FANG, J. C.; WANG, T.; LIU, F.; ZHAO, Z. Y. A Numerical simulation of temperature field in plasma-arc forming of steel metal. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 164 – 165, p. 1644 – 1649. 2005.

YALDIZ, O.; ERTEKIN, C.; UZUN H. I. Mathematical modeling of thin layer solar drying of sultana grapes. **Energy**, v.26, n. 5, p.457–465, 2001.

YAPICI, H.; BASTÜRK, G. Numerical Solutions os Transient Conjugate Heat Transfer Mand Thermally Induced Stress distribution in a Heated and Rotating Hollow Disk. **Energy Conversion & Management**, v. 46, n. 1, p. 61 – 84. 2005.

ZHANG, G. S.; WANG, H. T. Exergy analysis of super-heated steam yanker dryer. **Drying'92**. Montreal: Arun S. Mujumdar. Part B, 1992. pp. 1108-1114.

ZOGZAS, N. P.; MAROULIS, Z. B. Effective moisture diffusivity estimation from drying data: a comparison between various methods of analysis. **Drying Technology**, v.14, n.7 e 8, p.1543-1573, 1996.

ANEXOS

ANEXO 1

PROGRAMA MATHEMATICA® 4.1, UTILIZADO NA SIMULAÇÃO

```
Remove["Global' *"]
(*PROGRAMA ESCRITO POR VOLUMES FINITOS*)
npy = 20;
npx = 1;
H = 1.2;
L = 73.0;

(*dados de entrada do material*)
Mpo = 0.1569;
Tpo = 22.9;
rop = 1985.8;
up = 0.00088;
areap = 0.3332298904;
volumep = 0.0013107875235999998;
eps = 0.8644012906620689;
a = (1 - eps) * areap / volumep;
comp = 0.19;
comp = 0.0343069; (*diametro hidraulico*)
(*dados de entrada do ar*)
Taol = 50;
xaol = 0.07187;
waol = 10.0;
kaol = (2.425 * 10^(-2) + 7.889 * 10^(-5) * (Taol) - 1.790 * 10^(-8) * (Taol) ^2 -
      8.570 * 10^(-12) * (Taol) ^3);
miaol = (1.691 * 10^(-5) + 4.984 * 10^(-8) * (Taol) - 3.187 * 10^(-11) * (Taol) ^2 +
      1.319 * 10^(-14) * (Taol) ^3);
(*kaol=0.030058;
  miaol=21.47253*10^(-6);*)
(*          *)
```

```

Tao2 = 64;
xao2 = 0.1449;
wao2 = 10.0;
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 = 78;
xao3 = 0.2971;
wao3 = 10.0;
kao3 = (2.425 * 10^(-2) + 7.889 * 10^(-5) * (Tao3) - 1.790 * 10^(-8) * (Tao3)^2 -
8.570 * 10^(-12) * (Tao3)^3);
miao3 = (1.691 * 10^(-5) + 4.984 * 10^(-8) * (Tao3) - 3.187 * 10^(-11) * (Tao3)^2 +
1.319 * 10^(-14) * (Tao3)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(* *)
Tao4 = 92;
xao4 = 0.6805;
wao4 = 10.0;
kao4 = (2.425 * 10^(-2) + 7.889 * 10^(-5) * (Tao4) - 1.790 * 10^(-8) * (Tao4)^2 -
8.570 * 10^(-12) * (Tao4)^3);
miao4 = (1.691 * 10^(-5) + 4.984 * 10^(-8) * (Tao4 + 273.15) - 3.187 * 10^(-11) *
(Tao4 + 273.15)^2 + 1.319 * 10^(-14) * (Tao4 + 273.15)^3);
(*kao2=0.029578;
miao2=20.81303*10^(-6);*)
(* *)
Tao5 = 100;
xao5 = 1.452;
wao5 = 10.0;
kao5 = (2.425 * 10^(-2) + 7.889 * 10^(-5) * (Tao5) - 1.790 * 10^(-8) * (Tao5)^2 -
8.570 * 10^(-12) * (Tao5)^3);
miao5 = (1.691 * 10^(-5) + 4.984 * 10^(-8) * (Tao5) - 3.187 * 10^(-11) * (Tao5)^2 +
1.319 * 10^(-14) * (Tao5)^3); (*kao2=0.029578;miao2=20.81303*10^(-6);*)
(* *)

```

```

Tao6 = 94;
xao6 = 0.801;
wao6 = 10.0;
kao6 = (2.425*10^(-2) + 7.889*10^(-5) * (Tao6) - 1.790*10^(-8) * (Tao6) ^2 -
      8.570*10^(-12) * (Tao6) ^3) ;
miao6 = (1.691*10^(-5) + 4.984*10^(-8) * (Tao6) - 3.187*10^(-11) * (Tao6) ^2 +
      1.319*10^(-14) * (Tao6) ^3) ;(*kao2=0.029578;
      miao2=20.81303*10^(-6) ;*)
(*          *)
Tao7 = 88;
xao7 = 0.5762;
wao7 = 10.0;
kao7 = (2.425*10^(-2) + 7.889*10^(-5) * (Tao7) - 1.790*10^(-8) * (Tao7) ^2 -
      8.570*10^(-12) * (Tao7) ^3) ;
miao7 = (1.691*10^(-5) + 4.984*10^(-8) * (Tao7) - 3.187*10^(-11) * (Tao7) ^2 +
      1.319*10^(-14) * (Tao7) ^3) ;(*kao2=0.029578;
      miao2=20.81303*10^(-6) ;*)
(*          *)
Tao8 = 82;
xao8 = 0.3814;
wao8 = 10.0;
kao8 = (2.425*10^(-2) + 7.889*10^(-5) * (Tao8) - 1.790*10^(-8) * (Tao8) ^2 -
      8.570*10^(-12) * (Tao8) ^3) ;
miao8 = (1.691*10^(-5) + 4.984*10^(-8) * (Tao8) - 3.187*10^(-11) * (Tao8) ^2 +
      1.319*10^(-14) * (Tao8) ^3) ;
(*kao2=0.029578;miao2=20.81303*10^(-6) ;*)
(*          *)
Tao9 = 80;
xao9 = 0.336;
wao9 = 10.0;
kao9 = (2.425*10^(-2) + 7.889*10^(-5) * (Tao9) - 1.790*10^(-8) * (Tao9) ^2 -
      8.570*10^(-12) * (Tao9) ^3) ;
miao9 = (1.691*10^(-5) + 4.984*10^(-8) * (Tao9) - 3.187*10^(-11) * (Tao9) ^2 +
      1.319*10^(-14) * (Tao9) ^3) ;(*kao2=0.029578;miao2=20.81303*10^(-6) ;*)
(*          *)

```

```

i = 1;
auxR = 22105649.25;
auxA = -27405.53;
auxB = 97.5413;
auxC = -0.146244;
auxD = 0.12558 * 10(-3);
auxE = -0.48502 * 10(-7);
auxF = 4.34903;
auxG = 0.39381 * 10(-2);
Patm = 101325;
MMa = 28.96;
Rumiv = 8314.34;
auxroa = Patm * MMa / Rumiv;
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}] ;
soxa = Array[0 &, {npy}] ;
(* *)
xa = Array[xa01 &, {npy}] ;
Ta = Array[Ta01 &, {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;
z = 0;
ii = 0;

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}];

```

```

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}];
soxa = Array[0 &, {npy}];
(* *)
xa = Array[xa01 &, {npy}];
Ta = Array[Ta01 &, {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;
z = 0;
ii = 0;

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 < 3.2,
  Ta[[1]] = Tao1 ;
  xa[[1]] = xao1;
  wa = wao1;
  ka = kao1;
  mia = miao1;
  roa = auxroa / (Tao1 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , 1;
If[3.2 <= z < 6.4,
  Ta[[1]] = Tao2 ;
  xa[[1]] = xao2;
  wa = wao2;
  ka = kao2;
  mia = miao2;
  roa = auxroa / (Tao2 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , 1;
If[6.4 <= z < 9.6,
  Ta[[1]] = Tao3 ;
  xa[[1]] = xao3;
  wa = wao3;
  ka = kao3;
  mia = miao3;
  roa = auxroa / (Tao3 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , 1;
If[9.6 <= z < 14.8,
  Ta[[1]] = Tao4 ;
  xa[[1]] = xao4;
  wa = wao4;
  ka = kao4;
  mia = miao4;
  roa = auxroa / (Tao4 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , 1;

```

```

If[14.8 <= z < 67.3,
  Ta[[1]] = Tao5 ;
  xa[[1]] = xao5;
  wa = wao5;
  ka = kao5;
  mia = miao5;
  roa = auxroa / (Tao5 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , ];
If[67.3 <= z < 70.2,
  Ta[[1]] = Tao6 ;
  xa[[1]] = xao6;
  wa = wao6;
  ka = kao6;
  mia = miao6;
  roa = auxroa / (Tao6 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , ];
If[70.2 <= z < 72.9,
  Ta[[1]] = Tao7 ;
  xa[[1]] = xao7;
  wa = wao7;
  ka = kao7;
  mia = miao7;
  roa = auxroa / (Tao7 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , ];
If[z >= 72.9,
  Ta[[1]] = Tao8 ;
  xa[[1]] = xao8;
  wa = wao8;
  ka = kao8;
  mia = miao8;
  roa = auxroa / (Tao8 + 273.15) ;
  qa = roa * wa;
  , ];

```

Do[

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

If[t ≤ 90000,

```
  dndt = (-0.213029 * Mpo * ((t / 3600)^0.72028) * Exp[(-0.124865 *  
    (t / 3600)^1.720286)]) / 3600;  
  , ];
```

```
apomp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt);
```

```
somp[[j]] = dndt * dz;
```

```
apmp[[j]] = apomp[[j]];
```

```
apotp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt);
```

```
sctp[[j]] = (a * hc * Ta[[j]] + (hfg + cv * Ta[[j]]) * rop * dndt) / (rop * cp + rop * cw *  
  Mp[[j]]) * dz;
```

```

aptp[[j]] = apotp[[j]] + (a*hc + cv*rop*dndt) / (rop*cp + rop*cv*
      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]];
aska[[j]] = roa*wa / eps;
apoxa[[j]] = roa*dy / dt;
apxa[[j]] = aska[[j]] + apoxa[[j]];
scxa[[j]] = -rop*dndt*dy / eps;
Mp[[j]] = (apomp[[j]] * Mpold[[j]] + somp[[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]] = (aska[[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]];
  Taln = 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 ≤ 90000,
    dmdt = (-0.213029 * Mpo * ((t / 3600) ^ 0.72028) * Exp[(-0.124865 *
        ((t / 3600) ^ 1.720286))]) / 3600;
    , ];

apotp[[j]] = dz / ((npy - 1) * dt) ;
sctp[[j]] = (a * hc * Talin + (hfg + cv * Talin) * rop * dmdt) /
    (rop * cp + rop * cw * Mplin) * dz;
aptp[[j]] = apotp[[j]] + (a * hc + cv * rop * dmdt) / (rop * cp + rop *
    cw * Mp[[j - 1]]) * dz;
Tplin = (apotp[[j]] * Tpold[[j]] + sctp[[j]]) / aptp[[j]] ;
Mplin = Mp[[j]] + (roa * wa * dz / (rop * up * dy)) * (xa[[j]] - xalin) ;
Talin = (roa * wa * dz / up * (ca + cv * xa[[j]]) * Ta[[j]] + rop * dy *
    (cp + cw * Mp[[j]]) *
    Tp[[j]] - rop * dy * (cp + cw * Mplin) * Tp[[j]] - roa * wa * (dz / up) *
    hfg * (xalin - xa[[j]])) / (roa * wa * dz / up * (ca + cv * xalin)) ;

```

```

Pvsaux = auxR* Exp[ (auxA+auxB* (Talin+ 273.16) + auxC*
(Talin+ 273.16) ^2 +
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) * Pvsaux) ;
(*
Print[Talin," ",Uraux," ",iterlin," ",j," ",ii];
*)
xalin = xalin- dxalin;

];

];
]; (*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 ≤ 90000,
  dndt1 = (-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*);
somp[[1]] = dndt1 * dz;
apomp[[1]] = apomp[[1]];
Mp[[1]] = (apomp[[1]] * Mpold[[1]] + somp[[1]]) / apomp[[1]];
apotp[[1]] = dz / ((npy - 1) * dt);
sctp[[1]] = (a * hc * Ta[[1]] + (hfgj1 + cvj1 * Ta[[1]]) * rop * dndt1) /
  (rop * cpj1 + rop * cvj1 * Mp[[1]]) * dz;
aptp[[1]] = apotp[[1]] + (a * hc + cvj1 * rop * dndt1) / (rop * cpj1 +
  rop * cvj1 * Mp[[1]]) * dz;
Tp[[1]] = (apotp[[1]] * Tpold[[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]]);

```

ANEXO 1

PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E DADOS TÉCNICOS DO AR E DO TIJOLO CERÂMICO NAS CONDIÇÕES DE ENTRADA E SAÍDA DO SECADOR

TABELA 01 – Trecho 1 da Figura 3.20

Variável	SUBSTÂNCIA				
	Ar		Tijolo cerâmico		
	Entrada	Saída	Variável	Entrada	Saída
P (kPa)	101,835	101,325	P (kPa)	101,325	101,325
$P_{a\text{ seco}}$ (kPa)	91,351	90,675	θ (°C)	22,9	28,24
P_v (kPa)	10,484	10,650	v (m/s)	0,00088	0,00088
T (°C)	50	48,476	c_p (kJ/kg/K)	1,673	1,673
$h_{a\text{ seco}}$ (kJ/kg)	323,70	322,20	\dot{m}_{tseco} (kg/s)	2,5931	2,5931
h_v (kJ/kg)	2592	2589	\dot{m}_w (kg/s)	0,40685	0,36433
h (kJ/kg)	509,987	508,66	\dot{m}_t (kg/s)	3,000	2,9574
$\dot{m}_{a\text{ seco}}$ (kg/s)	89,282	89,282	M (b.u.)	0,1356	0,1232
\dot{m}_v (kg/s)	6,417	6,4304	h_{fg} (kJ/kg)	2446,9	2,434,6
\dot{m}_a (kg/s)	95,699	95,712	t_n (s)	0	3600
c_{pv} (kJ/kg/K)	1,90794	1,90749	-	-	-
c_{pa} (kJ/kg/K)	1,008	1,00871	-	-	-
ϕ (%)	85	93	-	-	-
x (kg/kg)	0,07187	0,07202	-	-	-
w (m/s)	10	10	-	-	-
\dot{V} (m ³ /s)	10580,3	10580,3	-	-	-
s_{seco} (kJ/kg/K)	6,97	6,967	-	-	-
s_v (kJ/kg/K)	8,078	8,103	-	-	-
s (kJ/kg/K)	7,5504	7,5506	-	-	-
R_a (kJ/kg/K)	0,287	0,287	-	-	-
R_v (kJ/kg/K)	0,462	0,462	-	-	-
h_{fg} (kJ/kg)	2382,7	2386,0	-	-	-
t_{ra} (s)	0	0,14	-	-	-

TABELA 02 - Trecho 2 da Figura 3.20

Variável	SUBSTÂNCIA				
	Ar		Tijolo cerâmico		
	Entrada	Saída	Variável	Entrada	Saída
P (kPa)	101,835	101,325	P (kPa)	101,325	101,325
$P_{a\text{ seco}}$ (kPa)	82,708	81,955	θ (°C)	28,644	30,256
P_v (kPa)	19,127	19,370	v (m/s)	0,00088	0,00088
T (°C)	64	59,19	c_p (kJ/kg/K)	1,673	1,673
$h_{a\text{ seco}}$ (kJ/kg)	337,8	333,5	\dot{m}_{seco} (kg/s)	2,5931	2,5931
h_v (kJ/kg)	2617	2609	\dot{m}_w (kg/s)	0,359398	0,275846
h (kJ/kg)	717,00	712,38	\dot{m}_t (kg/s)	2,952498	2,868946
$\dot{m}_{a\text{ seco}}$ (kg/s)	89,282	89,282	M (b.u.)	0,121727	0,096149
\dot{m}_v (kg/s)	12,93696	12,96518	h_{fg} (kJ/kg)	2433,9	2430,1
\dot{m}_a (kg/s)	102,21896	102,24718	t_{rt} (s)	3600	7200
c_{pv} (kJ/kg/K)	1,91216	1,91068	-	-	-
c_{pa} (kJ/kg/K)	1,0091	1,00895	-	-	-
φ (%)	80	98,67	-	-	-
x (kg/kg)	0,1449	0,14522	-	-	-
w (m/s)	10	10	-	-	-
\dot{V} (m ³ /s)	10580,3	10580,3	-	-	-
s_{seco} (kJ/kg/K)	7,041	7,031	-	-	-
s_v (kJ/kg/K)	7,846	7,914	-	-	-
s (kJ/kg/K)	8,178	8,180	-	-	-
R_a (kJ/kg/K)	0,287	0,287	-	-	-
R_v (kJ/kg/K)	0,462	0,462	-	-	-
h_{fg} (kJ/kg)	2349,2	2359,2	-	-	-
t_{ra} (s)	0	0,14	-	-	-

TABELA 03 – Trecho 3 da Figura 3.20

Variável	SUBSTÂNCIA				
	Ar		Tijolo cerâmico		
	Entrada	Saída	Variável	Entrada	Saída
P (kPa)	101,835	101,325	P (kPa)	101,325	101,325
$P_{a\text{ seco}}$ (kPa)	69,097	68,390	θ (°C)	30,9562	40,95
P_v (kPa)	32,738	32,935	v (m/s)	0,00088	0,00088
T (°C)	78	73,60	c_p (kJ/kg/K)	1,673	1,673
$h_{a\text{ seco}}$ (kJ/kg)	351,9	347,5	\dot{m}_{seco} (kg/s)	2,5931	2,5931
h_v (kJ/kg)	2640	2633	\dot{m}_w (kg/s)	0,269545	0,185024
h (kJ/kg)	1136,24	1130,55	\dot{m}_l (kg/s)	2,862445	2,778124
$\dot{m}_{a\text{ seco}}$ (kg/s)	89,282	89,282	M (b.u.)	0,09416	0,0666
\dot{m}_v (kg/s)	26,526	26,555	h_{fg} (kJ/kg)	2428,2	2404,5
\dot{m}_a (kg/s)	115,808	115,837	t_n (s)	7200	10800
c_{pv} (kJ/kg/K)	1,91661	1,91518	-	-	-
c_{pa} (kJ/kg/K)	1,00967	1,00947	-	-	-
ϕ (%)	75	90,59	-	-	-
x (kg/kg)	0,2971	0,2974	-	-	-
w (m/s)	10	10	-	-	-
\dot{V} (m ³ /s)	10580,3	10580,3	-	-	-
s_{seco} (kJ/kg/K)	7,134	7,124	-	-	-
s_v (kJ/kg/K)	7,640	7,702	-	-	-
s (kJ/kg/K)	9,4038	9,4146	-	-	-
R_a (kJ/kg/K)	0,287	0,287	-	-	-
R_v (kJ/kg/K)	0,462	0,462	-	-	-
h_{fg} (kJ/kg)	2313,5	2325	-	-	-
t_{ra} (s)	0	0,14	-	-	-

TABELA 04 – Trecho 4 da Figura 3.20

Variável	SUBSTÂNCIA				
	Ar		Tijolo cerâmico		
	Entrada	Saída	Variável	Entrada	Saída
P (kPa)	101,835	101,325	P (kPa)	101,325	101,325
$P_{a\text{ seco}}$ (kPa)	48,905	48,255	θ (°C)	42,147	68,031
P_v (kPa)	52,93	53,070	v (m/s)	0,00088	0,00088
T (°C)	92	89,28	c_p (kJ/kg/K)	1,673	1,673
$h_{a\text{ seco}}$ (kJ/kg)	366,1	363,3	\dot{m}_{seco} (kg/s)	2,9531	2,9531
h_v (kJ/kg)	2663	2659	\dot{m}_w (kg/s)	0,204298	0,088110
h (kJ/kg)	2178,27	2173,41	\dot{m}_t (kg/s)	3,157398	3,04121
$\dot{m}_{a\text{ seco}}$ (kg/s)	89,282	89,282	M (b.u.)	0,06405	0,02897
\dot{m}_v (kg/s)	60,756	60,779	h_{fg} (kJ/kg)	2401,5	2338,3
\dot{m}_a (kg/s)	150,038	150,061	t_{rt} (s)	10800	16800
c_{pv} (kJ/kg/K)	192127	1,92035	-	-	-
c_{pa} (kJ/kg/K)	1,01045	1,01028	-	-	-
ϕ (%)	70	77,75	-	-	-
x (kg/kg)	0,6805	0,68075	-	-	-
w (m/s)	10	10	-	-	-
\dot{V} (m ³ /s)	10580,3	10580,3	-	-	-
s_{seco} (kJ/kg/K)	7,272	7,269	-	-	-
s_v (kJ/kg/K)	7,453	7,488	-	-	-
s (kJ/kg/K)	12,344	12,366	-	-	-
R_a (kJ/kg/K)	0,287	0,287	-	-	-
R_v (kJ/kg/K)	0,462	0,462	-	-	-
h_{fg} (kJ/kg)	2277,7	2285,1	-	-	-
t_{ra} (s)	0	0,14	-	-	-

TABELA 05 – Trecho 5 da Figura 3.20

Variável	SUBSTÂNCIA				
	Ar		Tijolo Cerâmico		
	Entrada	Saída	Variável	Entrada	Saída
P (kPa)	101,835	101,325	P (kPa)	101,325	101,325
$P_{a\text{ seco}}$ (kPa)	30,896	30,332	θ (°C)	69,43	99,67
P_v (kPa)	70,939	70,993	v (m/s)	0,00088	0,00088
T (°C)	100	99,30	c_p (kJ/kg/K)	1,673	1,673
$h_{a\text{ seco}}$ (kJ/kg)	374,1	373,4	\dot{m}_{seco} (kg/s)	2,9531	2,9531
h_v (kJ/kg)	2676	2675	\dot{m}_w (kg/s)	0,08476	0,009634
h (kJ/kg)	4259,65	4257,53	\dot{m}_t (kg/s)	3,03786	2,962734
$\dot{m}_{a\text{ seco}}$ (kg/s)	89,282	89,282	M (b.u.)	0,027907	0,003259
\dot{m}_v (kg/s)	129,637	129,6385	h_{fg} (kJ/kg)	2335,4	2258,4
\dot{m}_a (kg/s)	218,919	218,9205	t_{rt} (s)	16800	75000
c_{pv} (kJ/kg/K)	1,92403	1,92397	-	-	-
c_{pa} (kJ/kg/K)	1,01099	1,01094	-	-	-
ϕ (%)	70	71,82	-	-	-
x (kg/kg)	1,452	1,45201	-	-	-
w (m/s)	10	10	-	-	-
\dot{V} (m ³ /s)	10580,3	10580,3	-	-	-
s_{seco} (kJ/kg/K)	7,426	7,43	-	-	-
s_v (kJ/kg/K)	7,355	7,363	-	-	-
s (kJ/kg/K)	18,105	18,121	-	-	-
R_a (kJ/kg/K)	0,287	0,287	-	-	-
R_v (kJ/kg/K)	0,462	0,462	-	-	-
h_{fg} (kJ/kg)	2257	2258,9	-	-	-
t_{ra} (s)	0	0,14	-	-	-

ANEXO 2A: DADOS EXPERIMENTAIS RELACIONADOS AO AR DE SECAGEM E AO TIJOLO CERÂMICO PARA CONDIÇÃO DE TEMPERATURA VARIÁVEL E UMIDADE RELATIVA DE 85%

T(°C)	t(min)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	m(g)	θ(°C)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
50	0	201	93,47	197	9,08	8,27	7,43	6,27	3052	22,9	26	70
50	10	201	93,5	197	8,78	8,19	7,35	6,22	3049	29,2	26	71
50	20	201	93,52	197	8,68	8,11	7,21	6,35	3041	31,7	26,1	71
50	30	201	93,24	197	8,72	8,1	8,34	6,26	3031	32,1	26,1	71
50	40	200	93,14	197	8,56	7,93	7,21	6,19	3020	32,1	26,3	70
50	50	199	93,18	196	8,52	8,04	7,21	6,07	3009	31,7	26,3	69
50	60	199	92,9	196	8,44	8,01	7,27	5,97	2997	31,7	26,4	69
64	70	198	92,81	195	8,4	7,76	7,13	6	2987	34,8	26,4	68
64	80	197	92,74	195	8,36	7,89	7,09	6,04	2972	36	26,4	67
64	90	197	92,84	194	8,36	7,9	7,06	6,07	2959	36,5	26,5	66
64	100	196	92,7	194	8,42	7,95	7,01	5,94	2942	37	26,5	65
64	110	196	92,66	193	8,29	7,75	7,01	5,98	2929	37	26,5	65
64	120	195	92,56	193	8,25	7,8	6,97	5,92	2913	37,5	26,5	64
78	130	194	92,52	193	8,28	7,78	6,98	5,85	2895	39,5	26,5	65
78	140	194	92,06	192	8,23	7,66	6,96	5,85	2882	42,3	26,5	64
78	150	194	91,78	192	8,22	7,71	6,93	5,89	2863	42,5	26,5	64
78	160	194	91,41	191	8,22	7,7	6,93	5,83	2849	43	26,5	62
78	170	193	90,94	191	8,22	7,73	6,93	5,86	2832	45	26,6	63
78	180	193	90,76	190	8,2	7,7	6,91	5,84	2818	45,2	26,6	63
92	190	193	90,44	190	8,1	7,73	6,91	5,84	2805	49	26,6	62
92	200	193	90,31	190	8,11	7,72	6,93	5,84	2793	52,5	26,8	61
92	210	193	90,21	190	8,14	7,72	6,94	5,81	2775	55,6	26,8	61
92	220	193	89,93	189	8,15	7,73	6,93	5,78	2764	57,1	26,8	61
92	230	193	89,89	189	8,14	7,7	6,92	5,8	2752	57	26,9	61
92	240	193	90,05	189	8,14	7,72	6,92	5,84	2740	60,8	26,9	61
92	250	193	89,89	189	8,1	7,67	6,95	5,85	2730	62	26,9	60
92	260	193	89,82	189	8,11	7,77	6,89	5,85	2723	61,4	26,9	59
92	270	193	89,9	189	8,12	7,74	6,93	5,87	2714	64,3	27	58
92	280	193	89,9	189	8,12	7,69	6,91	5,84	2706	66,3	26,9	59
100	290	192	89,65	189	8,09	7,63	6,9	5,79	2699	70,3	26,9	57
100	300	192	89,63	189	8,1	7,65	6,93	5,87	2694	72,7	27	56
100	310	192	89,62	189	8,11	7,67	6,89	5,83	2688	73,5	26,9	56
100	320	192	89,63	189	8,13	7,63	6,89	5,84	2684	73,1	27	56
100	330	192	89,58	189	8,12	7,61	6,85	5,82	2679	72,6	27	56
100	340	192	89,56	189	8,05	7,63	6,87	5,83	2674	75,8	27	56
100	350	192	89,63	189	8,08	7,62	6,86	5,8	2671	77	27,1	56
100	380	192	89,59	189	8,09	7,72	6,91	5,81	2661	85,4	27,1	57
100	410	192	89,69	189	8,05	7,75	6,91	5,84	2655	85,5	27,1	56
100	440	192	89,7	189	8,01	7,67	6,9	5,8	2650	86,6	27,1	56
100	470	192	89,6	188	8	7,68	6,85	5,8	2648	87,1	27,1	58
100	500	192	89,54	188	8,02	7,66	6,82	5,8	2645	87,8	27	58
100	530	192	89,37	188	8,04	7,65	6,8	5,84	2645	87,7	26,9	60

100	590	192	89,46	188	8,03	7,7	6,88	5,83	2641	89,3	26,8	65
100	650	192	89,46	188	8,02	7,62	6,85	5,8	2641	88,8	26,9	67
100	710	192	89,51	188	8,02	7,66	6,86	5,78	2640	88,6	26,6	68
100	770	192	89,43	188	8,03	7,67	6,87	5,81	2639	88,8	26,4	70
100	830	192	89,45	188	8,04	7,66	6,8	5,75	2639	87,8	26,3	73
100	890	192	89,44	188	8,03	7,66	6,89	5,79	2639	87,7	26,1	73
100	950	192	89,53	188	8,02	7,68	6,82	5,78	2639	88,2	25,9	73
100	1010	192	89,48	188	8,04	7,67	6,86	5,78	2639	88,3	25,9	73
100	1070	192	89,48	188	8,01	7,68	6,86	5,76	2639	88,5	25,9	74
100	1130	192	89,47	188	8,01	7,67	6,86	5,77	2638	88,5	25,9	74
100	1190	192	89,48	188	8,02	7,68	6,83	5,76	2638	87,5	25,9	74
100	1250	192	89,47	188	8,04	7,66	6,84	5,78	2638	87,5	25,9	74
94	1310	192	89,47	188	8,06	7,67	6,85	5,8	2639	82,2	25,9	74
88	1370	192	89,52	188	8,11	7,7	6,85	5,79	2640	76,2	25,9	71
82	1430	192	89,48	188	8,04	7,72	6,84	5,8	2642	66,7	26,4	68
80	1490	192	89,53	188	7,99	7,6	6,8	5,85	2644	70,2	26,5	67
80	2930	192	89,35	188	7,97	7,71	6,77	5,73	2646	69,3	26,4	64

ANEXO 2B: DADOS EXPERIMENTAIS RELACIONADOS AO AR DE SECAGEM E AO TIJOLO CERÂMICO PARA CONDIÇÃO DE TEMPERATURA CONSTANTE E UMIDADE RELATIVA DE 1,5%

t(min)	R ₁ (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	m(g)	θ(°C)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	202	92.8	198	11.7	9.41	8.74	8	3043	26.1	27.4	44
10	198	94	192	12.49	8.44	7.99	7.93	3015	42	27.8	43
20	198	92.25	194	10.43	8.34	7.67	7.2	2984	44.3	27.8	43
30	197	93.23	194	9.25	8.32	7.38	6.76	2956	45	27.9	42
40	196	92.95	193	9.22	8.32	7.6	6.86	2925	49.2	27.9	41
50	195	89.38	192	7.51	8.25	7.46	6.82	2894	54	27.9	42
60	195	89.15	191	9.08	8.22	7.35	7.32	2865	57.2	27.9	42
70	194	87.75	190	10.14	8.24	7.34	6.87	2834	60	27.9	41
80	194	90.12	190	9.72	7.87	7.56	7	2808	63.8	27.9	42
90	194	88.23	190	9.21	8.15	7.3	6.55	2782	65	27.9	42
100	194	88.1	190	9	8.07	7.44	6.78	2763	67	27.9	43
110	194	89.08	190	8.86	7.42	7.27	6.98	2739	69	27.9	43
120	193	89.89	190	8.81	8.15	7.23	6.84	2727	69	27.9	43
130	194	89.74	190	8.85	8.33	7.22	6.64	2715	69	28	43
140	194	89.83	190	8.74	8.04	7.14	7.05	2702	69.9	28	43
150	194	89.76	190	8.65	8.19	7.08	6.93	2691	70	28.1	43
160	194	89.72	190	8.87	8.6	6.22	6.95	2681	70.1	28.1	43
170	194	89.76	190	8.58	8.21	7.09	6.95	2672	72	28	43
180	194	89.85	190	8.57	8.28	7.13	6.67	2665	73	28	43
190	194	89.75	190	8.59	8.14	7.72	6.74	2659	74	28	44
200	194	89.66	190	8.56	8.39	7.15	6.61	2656	75	27.9	44
230	194	89.25	190	10.45	8.88	7.7	8.07	2646	76.7	27.9	44
260	195	89	189	10.83	9.21	7.96	7.84	2635	84.3	27.9	47
290	194	89.37	190	8.72	8.28	7.07	7.04	2626	87.3	27.6	50
320	193	89.53	190	8.73	8.73	7.21	6.8	2621	89	27.4	52
350	193	89.03	190	8.68	8.17	7.14	6.76	2618	90	27.3	54
380	193	89.24	190	8.66	8.23	7.49	6.57	2614	91.3	27.1	55
440	193	89.76	190	8.62	7.32	7.58	7.03	2610	92	26.9	57
500	194	89.98	190	9.11	8.25	7.11	6.56	2608	92.1	26.8	60
560	194	89.9	189	10.72	8.78	7.53	7.68	2607	92.3	26.6	62
620	194	92.32	189	9.63	8.4	8.03	6.92	2607	92.8	26.4	63
680	194	90.33	189	11.16	8.2	8.04	7.03	2605	92.7	26.5	63
740	194	90.81	189	10.81	8.89	7.62	7.63	2604	93	27	61
800	194	90.54	189	10.51	8.83	8.43	6.8	2604	93.1	27.4	60
860	195	90.91	189	10.48	8.53	8.12	7.54	2604	93.2	27.4	60
2300	193	88.07	189	9.48	8.25	7.16	7.04	2604	93.4	27.6	63
3740	193	89.75	190	9.48	8.26	7.12	6.98	2603	93.4	27.4	68