

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

**Simulação e Experimentação da Secagem
de Tijolos Cerâmicos Vazados**

AUTOR: Joselito Barbosa da Silva

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

Campina Grande, Dezembro de 2009.
PB, Brasil

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

Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados

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: Joselito Barbosa da Silva

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

Campina Grande, Dezembro de 2009.
PB, Brasil

DIGITALIZAÇÃO:
SISTEMOTECA - UFCG

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586s Silva, Joselito Barbosa.
2009 Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados / Joselito Barbosa Silva. — Campina Grande, 2009.
174 f. : il. Col.

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. Tijolos Vazados. 2. Secagem - Simulação. 3. Secagem - Experimentação. 4. Cerâmica. I. Título.

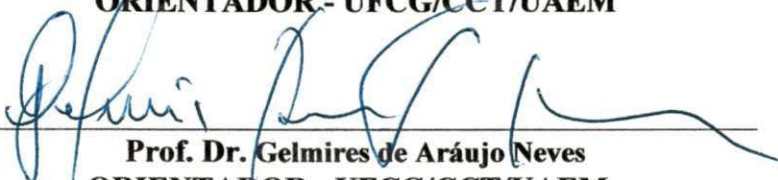
CDU – 62- 478(043)

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

Tese de Doutorado **aprovada** em 17 de dezembro de 2009



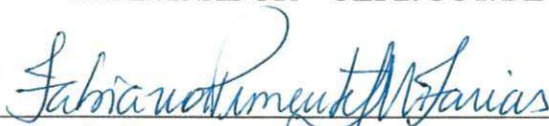
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
ORIENTADOR - UFCG/CCT/UAEM



Prof. Dr. Gelmires de Araújo Neves
ORIENTADOR - UFCG/CCT/UAEMa



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
EXAMINADOR – UEPB/CCT/DEQ



Profa. Dra. Fabiana Pimentel Macedo Farias
EXAMINADORA - UFCG/CCT/UAEM



Prof. Dr. Severino Rodrigues de Farias Neto
EXAMINADOR - UFCG/CCT/UAEQ



Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva
EXAMINADOR - UFCG/CCT/UAF

Campina Grande, Dezembro de 2009.
PB, Brasil

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, defendida por Joselito Barbosa da Silva e aprovada pela banca examinadora em 17 de dezembro de 2009.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'A' followed by a horizontal line and a short tail.

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

AGRADECIMENTOS

A Deus, o todo poderoso, por ter concedido-me tanta coragem e perseverança durante o curso.

Ao CNPq, a FINEP e a CAPES pelo apoio financeiro concedido ao Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos (CCT/UFCG).

Ao professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pela grande dedicação e estímulo para a realização deste trabalho.

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

À Cerâmica Cincera por ter dado todo apoio nas visitas as suas instalações e ceder as peças cerâmicas para os experimentos realizados.

Ao diretor da Cerâmica Cincera, Dr. Telêmaco Santiago por ter concedido todo apoio ao referido trabalho.

À Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Dr Antonio Batista Santiago e ao Colégio Técnico Comercial Dom Bosco por compreender os momentos em que a minha presença foi, sorrateiramente, dedicada ao determinado curso.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, os quais foram íntegros e literalmente competentes para transmitir o saber que se fez necessário à minha profissionalização.

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

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

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

“O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem; mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.”

Albert Einstein

SUMÁRIO

1	Introdução	01
2	Revisão Bibliográfica	04
2.1	Cerâmica	04
2.1.1	Histórico	04
2.1.2	Conceito de cerâmica	07
2.1.3	Caracterização do setor	07
2.1.4	Propriedades dos materiais cerâmicos	08
2.1.5	Tipo de produtos cerâmicos para construção civil	10
2.2	Argila para cerâmica vermelha	11
2.2.1	Argilas e seus constituintes	11
2.2.2	Origem e transformação	12
2.2.3	Aplicação	13
2.2.4	Tipos de argilas	13
2.2.5	Classificação das argilas	15
2.2.6	Propriedades das argilas	16
2.2.7	Argila para produção de cerâmica vermelha	22
2.3	Tijolos	24
2.3.1	Processo produtivo	24
2.3.2	Alguns defeitos em tijolos	31
2.4	Secagem	33
2.4.1	Teoria e modelo de secagem	33
2.4.2	Processo de secagem da argila	38
2.4.3	Água nos argilominerais	43
2.4.4	Difusão de umidade e calor em materiais cerâmicos	45

DEDICATÓRIA

Dedico aos meus pais Antonio Barbosa da Silva e Josina Maria da Silva, à minha esposa Maria Helena Ramos Barbosa da Silva e aos meus filhos Emanuel Átilla Barbosa da Silva e Emanuella Maria Barbosa da Silva, que pacientemente, compreenderam a minha ausência, enquanto eu buscava os conhecimentos tão necessários à carreira que abracei.

2.5 Uma abordagem sobre tensão e deformação	52
2.5.1 Tensão	52
2.5.2 Deformação	55
3 Metodologia	61
3.1 Metodologia experimental	61
3.1.1 Análises térmica, química e mineralógica	61
3.1.2 Secagem em estufa	63
3.1.2.1 Materiais e equipamentos usados na secagem	63
3.1.2.2 Procedimentos experimentais	66
3.1.2.3 cálculos auxiliares	68
3.2 Metodologia matemática	70
3.2.1 Modelo para o transporte de calor e massa	70
3.2.2 Modelo de retração volumétrica	73
3.2.3 Modelo para tensões internas	75
3.2.4 Solução Numérica	77
3.2.4.1 Malha numérica	77
3.2.4.2 Discretização da equação de difusão	79
3.2.4.3 Software computacional	90
3.3 Tratamento estatístico dos dados	93
4 Resultados e discussão	96
4.1 Experimental	96
4.1.1 Caracterização da matéria-prima	96
4.1.1.1 Análise química	96
4.1.1.2 Análise mineralógica	97
4.1.1.3 Análise granulométrica	98
4.1.1.4 Análise granulométrica	99
4.1.2 Secagem do tijolo	100
4.2 Numérico	138
4.2.1 Cinética de secagem e aquecimento do sólido	138
4.2.2 Estimativa dos coeficientes de transporte	151

5 Conclusões e Sugestões	152
5.1 Conclusões	152
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	155
Referências	156
Apêndice	167

RESUMO

SILVA, Joselito Barbosa, *Simulação e Experimentação da Secagem de Tijolos Cerâmicos Vazados*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 173p. Tese (Doutorado)

Com aplicação nos mais variados setores, os materiais cerâmicos podem ser utilizados para fabricação de utensílios domésticos, materiais para construção civil e até mesmo revestimento de naves espaciais. Na fabricação de tijolos cerâmicos (por exemplo, na conformação e/ou secagem) podem surgir danos estruturais como trincas, deformações e empenamentos que diminuem a qualidade do produto final. A secagem é um processo termodinâmico, no qual ocorre a redução do teor de umidade do sólido, mediante o fornecimento de energia ao mesmo. Com o estudo das simulações computacionais capazes de prever o comportamento de variáveis como teor de umidade, temperatura e tensões no interior dos tijolos cerâmicos, é possível obter um processo de secagem mais rápido e otimizado, evitando desperdícios de matérias-primas e economia de combustíveis. Buscando melhorias para o processo de secagem de tijolos cerâmicos, este trabalho apresenta um estudo numérico e experimental da secagem de tijolos vazados. Um modelo matemático tridimensional transiente é apresentado para prever a transferência de massa e calor e simular a distribuição do teor de umidade, temperatura no interior do sólido, considerando simetria em torno do centro do sólido, propriedades termofísicas constantes e variação de volume (encolhimento). Para validação da metodologia numérica foram realizados experimentos de secagem com tijolos cerâmicos vazados industrial de oito furos doados pela Cerâmica Cincera, localizada no município de Santa Rita-PB. Nos experimentos, foram usadas temperaturas de secagem de 50, 60, 70, 80, 90 e 100°C. Verificou-se que para temperaturas de 50 e 60°C e umidades relativas de 20,8% e 13,5% respectivamente a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de defeitos no produto. Já nas temperaturas de secagem de 80, 90 e 100°C, surgem altos gradientes de temperatura e umidade no interior do tijolo que geram tensões termo-hídricas, ocasionando grandes fissuras e trincas, principalmente nas regiões dos vértices e paredes internas dos furos principalmente no início do processo, diminuindo aparentemente com o tempo de processo devido as contrações da camada exterior e superior.

Palavras Chave: Cerâmica, tijolo vazado, experimental, secagem, tensões, simulação.

ABSTRACT

SILVA, Joselito Barbosa, *Simulation and Experimentation of the Drying of Drained Ceramic Bricks*, Campina Grande: Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, 2009. 173p. Tese (Doutorado).

With application in various sectors, the materials can be used for the manufacture of household goods, building materials and even coating of spacecraft. In the manufacture of bricks (for example, the conformation and / or drying) may cause damage to structural cracks, distortion and warping that diminish the quality of the final product. Drying is a thermodynamic process, which is reducing the moisture content of the solid, by providing energy to it. Through the study of computer simulations can predict the behavior of variables such as moisture, temperature and stress inside the bricks, you can get a drying process faster and optimized, avoiding wastage of raw materials and fuel economy. Seeking improvements to the drying process of clay bricks, this paper presents a numerical and experimental study of the drying process of a hollow brick. A three-dimensional transient mathematical model is presented to predict the mass transfer and heat to simulate the distribution of moisture content, temperature inside the solid, considering the symmetry around the center of the solid, constant thermophysical properties and volume change (shrinkage). For validation of the numerical experiments were carried out with drying hollow bricks industrial donated by eight holes "Cerâmica Cincera", located in Santa Rita-PB. In the experiments, were used drying temperatures of 50, 60, 70, 80, 90 and 100°C. It was found that for temperatures of 50 and 60°C and relative humidity of 20,8% and 13,5% respectively the drying rate is lower, reducing the risks of product defects. Already at the drying temperatures of 80, 90 and 100°C, there are high gradients of temperature and humidity inside the brick tensionally thermal water, causing large cracks and broken, especially in the corners and the inner walls of the holes especially in the initial process, apparently reducing the processing time because the contractions of the outer layer and above.

Keywords: Ceramics, hollow brick, experimental, drying, stresses, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Amostra de argila.	12
Figura 2.2 – Tipos de argilas	15
Figura 2.3 - Gráfico da análise térmica-diferencial.	19
Figura 2.4 - Argila de várzea.	23
Figura 2.5 - Argila de morro.	24
Figura 2.6 - Fluxograma de fabricação de tijolos.	25
Figura 2.7 - Mistura da argila.	26
Figura 2.8 - Extrusão de tijolos.	28
Figura 2.9 - Estufa para secagem.	30
Figura 2.10 - Armazenagem.	30
Figura 2.11 - Esquema produtivo da cerâmica vermelha.	31
Figura 2.12 - Fases de secagem da argila.	42
Figura 2.13 - Taxa de secagem durante as fases.	42
Figura 2.14 - Variação do volume aparente em função da quantidade de água contida na peça.	49
Figura 2.15 - Determinação do ponto de umidade crítica através da curva de Bigot.	50
Figura 2.16 - (a) Aplicação de ΔF sobre Área ΔA ; (b) Secção do plano paralelo ao plano x-z; (c) Secção do plano paralelo ao plano y-z.	53
Figura 2.17 - Orientação das tensões.	54

Figura 2.18 - Estado geral da tensão.	55
Figura 2.19 - (a) Reta AB sem deformação normal; (b) Reta AB sob deformação normal.	57
Figura 2.20 - (a) Reta AB e AC sem deformação de cisalhamento; (b) Reta AB e AC sob deformação de cisalhamento.	58
Figura 2.21 - (a) Corpo; (b) Elemento do corpo não deformado; (c) Elemento do corpo sob deformação normal e deformação por cisalhamento.	59
Figura 3.1 - Granulômetro a laser.	62
Figura 3.2 - Difratorômetro de raio X.	63
Figura 3.3 - Paquímetro digital.	64
Figura 3.4 - Balança digital.	64
Figura 3.5 - Termômetro digital, modelo TI – 890.	65
Figura 3.6 - Hormohigrômetro digital.	65
Figura 3.7 - Escalímetro.	65
Figura 3.8 - Estufa com circulação de ar forçada.	66
Figura 3.9 - Anemômetro de palhetas com leitura digital.	66
Figura 3.10 - Modelo do tijolo mostrando o comprimento ($2R_3$), a largura ($2R_1$), a altura ($2R_2$), as dimensões que caracterizam os furos, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 e local da medição da temperatura do tijolo.	67
Figura 3.11 – Configuração do problema físico.	71
Figura 3.12 – Condições de contorno do problema físico.	72
Figura 3.13 – Esquema do encolhimento volumétrico.	74
Figura 3.14 - Tensões principais σ_x , σ_y , e σ_z atuando em um ponto do tijolo.	76
Figura 3.15 - Malha numérica utilizada para simulação.	78
Figura 4.1 - Análise mineralógica via difratograma de Raios X da amostra estudada.	98
Figura 4.2 - Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila.	99
Figura 4.3 - Curva termogravimétrica (DTG) e termodiferencial (ATD) da matéria-prima.	100

Figura 4.4 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 50 °C e UR 20,8% durante a secagem.	102
Figura 4.5 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 60 °C e UR 13,5% durante a secagem.	103
Figura 4.6 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 70 °C e UR 7,6% durante a secagem.	103
Figura 4.7 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 80 °C e UR 4,6% durante a secagem.	104
Figura 4.8 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 90 °C e UR 3,3% durante a secagem.	104
Figura 4.9 - Variação do teor de umidade médio e da temperatura média da amostra a 100 °C e UR 1,8% durante a secagem.	105
Figura 4.10 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 50 °C e UR 20,8%.	106
Figura 4.11 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 60 °C e UR 13,8%.	106
Figura 4.12 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 70 °C e UR 7,6%.	107
Figura 4.13 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 80 °C e UR 4,6%.	107
Figura 4.14 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 90 °C e UR 3,3%	108
Figura 4.15 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem a 100 °C e UR 1,8%	108
Figura 4.16 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 50 °C e UR 20,8%.	109
Figura 4.17 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 60 °C e UR 13,5%.	109
Figura 4.18 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 70 °C e UR 7,6%.	110
Figura 4.19 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 80 °C e UR 4,6%.	110

Figura 4.20 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base durante a secagem seca a 90 °C e UR 3,3%.	111
Figura 4.21 - Razão entre o volume médio e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 100 °C e UR 1,8%.	111
Figura 4.22 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 50 °C.	112
Figura 4.23 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 60 °C.	113
Figura 4.24 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 70 °C.	113
Figura 4.25 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 80 °C.	114
Figura 4.26 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 90 °C.	114
Figura 4.27 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito na temperatura de 100 °C.	115
Figura 4.28 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.	116
Figura 4.29 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.	116
Figura 4.30 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.	117
Figura 4.31 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.	117
Figura 4.32 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.	118
Figura 4.33 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 100°C.	118
Figura 4.34 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 50°C na estufa. a) Frontal,	

b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita	122
Figura 4.35 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 260 minutos) na temperatura constante de 50°C na estufa ($\theta_{tij} = 33,6^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 26,4^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 74\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	123
Figura 4.36 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem (t = 0) à temperatura constante de 60°C. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	124
Figura 4.37 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 180 minutos) na temperatura constante de 60°C na estufa ($\theta_{tij} = 36,3^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 79\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	125
Figura 4.38 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 290 minutos) na temperatura constante de 60°C na estufa ($\theta_{tij} = 42,6,3^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 77\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	126
Figura 4.39 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem (t = 0) à temperatura constante de 70°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	127
Figura 4.40 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 1070 minutos) na temperatura constante de 70°C na estufa ($\theta_{tij} = 64,5^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 25,9^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 69\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	128
Figura 4.41 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem (t = 0) à temperatura constante de 80°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	129
Figura 4.42 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 40 minutos) na temperatura constante de 80°C na estufa ($\theta_{tij} = 37,1^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 26,9^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 58\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	130
Figura 4.43 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 900 minutos) na temperatura constante de 80°C na estufa ($\theta_{tij} = 69,2,1^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 24,6^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 75\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	131
Figura 4.44 - Vista da amostra submetida à secagem (t = 20 minutos) na temperatura constante de 90°C na estufa ($\theta_{tij} = 36^{\circ}\text{C}$, $T_{amb.} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $UR_{amb.} = 78\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.	132

- Figura 4.45 - Vista da amostra submetida à secagem ($t = 690$ minutos) na temperatura constante de 90°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 77,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 76\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita. 133
- Figura 4.46 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 100°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita. 134
- Figura 4.47 - Vista da amostra submetida à secagem ($t = 40$ minutos) na temperatura constante de 100°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 49,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 27,9^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 41\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita. 135
- Figura 4.48 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 60°C na estufa em: a) $t = 180$ min ($\theta_{\text{tij}} = 36,3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 79\%$) e b) $t = 290$ min ($\theta_{\text{tij}} = 42,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 77\%$). 136
- Figura 4.49 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 80°C na estufa em: a) $t = 40$ min ($\theta_{\text{tij}} = 37,1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,9^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 58\%$) e b) $t = 900$ min ($\theta_{\text{tij}} = 69,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 24,6^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 75\%$). 137
- Figura 4.50 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 90°C na estufa em: a) $t = 20$ min ($\theta_{\text{tij}} = 36^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 78\%$) e b) $t = 690$ min ($\theta_{\text{tij}} = 77,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 76\%$). 137
- Figura 4.51 - Comparação entre o teor de umidade médio e a temperatura adimensional na superfície do tijolo em função do tempo para uma temperatura de 80°C . 139
- Figura 4.52 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano $x = 0,02319\text{m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de 80°C . 140
- Figura 4.53 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano $y = 0,04925\text{m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de 80°C . 141
- Figura 4.54 - Distribuição do teor de umidade adimensional no plano $z = 0,05025\text{m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de 80°C . 142
- Figura 4.55- Distribuição da temperatura adimensional no plano $x = 0,02319\text{m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de 80°C . 143

- Figura 4.56 - Distribuição da temperatura adimensional no plano $y = 0,04925\text{m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de $80\text{ }^\circ\text{C}$. 144
- Figura 4.57 - Distribuição da temperatura adimensional no plano $z = 0,05025\text{m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de $80\text{ }^\circ\text{C}$. 145
- Figura 4.58 - Tensões internas adimensionais $\sigma_i^* = (\sigma_i - \sigma_{\min}) / (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$, $i = x, y, z$ no centro e na superfície interna em função do tempo:
 (a) σ_x^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 996846,71\text{ Pa}$), σ_x^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 7612,1116\text{ Pa}$, $\sigma_{\max} = 1105591,8\text{ Pa}$) (b) σ_y^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 996846,71\text{ Pa}$), σ_y^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 7612,1116\text{ Pa}$, $\sigma_{\max} = 1105591,8\text{ Pa}$) e (c) σ_z^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 997574,47\text{ Pa}$), σ_z^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 10276,351\text{ Pa}$, $\sigma_{\max} = 1105594,4\text{ Pa}$). 147
- Figura 4.59 - Distribuição da tensão interna adimensional σ_x^* no plano $x = 0,02319\text{m}$ ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de $80\text{ }^\circ\text{C}$. 148
- Figura 4.60 - Distribuição da tensão interna σ_y^* no plano $y = 0,04925\text{m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de $80\text{ }^\circ\text{C}$. 149
- Figura 4.61 - Distribuição da tensão internas σ_z^* no plano $z = 0,05025\text{m}$ ($R_3/2$) nos tempos: (a) 300s, (b) 2000s e (c) 8000s para uma temperatura de secagem de $80\text{ }^\circ\text{C}$. 150

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos e caracterização da cerâmica branca.	10
Tabela 2.2 - Tipos e caracterização da cerâmica vermelha.	11
Tabela 2.3 - Classificação das argilas segundo ABNT.	17
Tabela 2.4 - Modelos paramétricos empíricos expressando o coeficiente de difusão como função da temperatura e/ou do teor de umidade do meio poroso	37
Tabela 3.1 - Parâmetros experimentais do ar e dimensões dos tijolos cerâmicos vazados utilizados nos experimentos.	68
Tabela 4.1 - Composição química da matéria-prima utilizada nos experimentos	97
Tabela 4.2 - Distribuição de tamanho de partículas da matéria-prima estudada	98
Tabela 4.3 - Parâmetros experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem.	101
Tabela 4.4 - Parâmetros da Equação (3.52) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.	112
Tabela 4.5 - Parâmetros da Equação (3.14) ajustados aos dados experimentais.	115
Tabela 4.6 - dados de retração volumétrica durante a secagem	119
Tabela 4.7 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 50°C.	119
Tabela 4.8 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 60°C.	120
Tabela 4.9 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 70°C.	120
Tabela 4.10 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 80°C.	120

Tabela 4.11 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 90°C.	121
Tabela 4.12 - Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem de 100°C.	121
Tabela 4.13 - Coeficiente de transporte estimados para cada teste experimental.	151

NOMENCLATURA

Letras latinas

A	área	[m ²]
A _E , A _W , A _N , A _S , A _T , A _F , A _P ⁰	constantes	[-]
c _{ij}	coeficientes elásticos	[-]
D	coeficiente de difusão efetivo	[m ² /s]
∂M/∂t	taxa de difusão	[kg/kg.s]
e, w, s, n, f, t	faces dos volumes de controle	[-]
exp	exponencial	[-]
f _i	fator de interpolação	[-]
f	fator de peso	[N]
g	aceleração da gravidade	[m/s ²]
G	módulo de cisalhamento	[Pa]
c _p	calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
k	condutividade térmica	[W/m.K]
h _m	coeficiente de transferência convectiva de massa	[m/s]
h _c	coeficiente de transferência convectiva de calor	[W/m ² K]
i, j	posição do ponto nodal na malha	[-]
M _s , M _e , M ₀	teor de umidade (base seca), de equilíbrio e inicial	[kg/kg]
M [*]	teor de umidade adimensional	[-]
m	massa	[kg]
N, S, W, F, T	pontos nodais	[-]
2xR ₁	dimensão do sólido em relação à largura	[m]
2xR ₂	dimensão do sólido em relação à profundidade	[m]
2xR ₃	dimensão do sólido em relação ao comprimento	[m]
S ^φ	termo fonte	[-]
t	tempo	[s]
V, V _p , V _f	volume, volume do tijolo maciço, volume dos furos do tijolo	[m ³]
u, v, w	velocidades	[m/s ²]
u, v, w	deslocamentos	[m]
x, y, z	coordenadas cartesianas	[m]
m ₁ , m ₂ , m ₃	massa da amostra seca, saturada e saturada e submersa	[kg]
T _{amb}	temperatura ambiente	[°C]
F	força	[N]
m _a , m _o , m _s	massa de água do tijolo, massa inicial do tijolo e massa do tijolo seco	[kg]

\overline{SM}	termo fonte associado aos termos convectivos
EMRQ	desvio entre os valores experimentais e preditos
\overline{S}^{-2}	variância
\overline{Nu}	número de Nusselt
Re	número de Reynolds

Letras Gregas

θ	temperatura do sólido	[K]
θ^*	temperatura adimensional do sólido	[m ² /s]
α	difusividade térmica	[-]
ρ	densidade (massa específica)	[kg/m ³]
Δ, δ	variação	[-]
$\Phi, \overline{\Phi}$	variável qualquer, variável média da equação	[-]
Γ^{Φ}	propriedade do material	[-]
ρ	densidade do sólido seco	[kg/m ³]
σ_{ij}	tensor de tensão	[Pa]
ε_{kl}	tensor de deformação causada pela tensão	[-]
ε^s_{kl}	tensor de deformação causada pelo encolhimento	[-]
δ_{ij}	delta de Kronecker	[-]
τ	tensão de cisalhamento	[Pa]
σ	tensor normal	[-]
ε	deformação normal	[-]
ε_{med}	deformação normal média	[-]
$\Delta S, \Delta S'$	variação do comprimento	[m]
γ	ângulo	[rad]
γ_m	deformação por cisalhamento	[-]
$\overline{\gamma}$	coeficiente de expansão térmica	[-]
$\overline{\beta}$	coeficiente de contração por umidade	
ν	coeficiente de poisson	

Superescritos

+	tempo posterior
x	face x
y	face y
z	face z

Subscritos

e	equilíbrio
e, w, n, s, f, t	faces dos pontos nodais
m	massa
o	inicial
P	ponto nodal P
t	tempo

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

No Brasil, a cerâmica é de relevante importância para a economia do país; a abundância de matéria-prima natural, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais fizeram com que as indústrias brasileiras evoluíssem rapidamente. As regiões onde existem maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infra-estrutura e melhor distribuição de renda são Sudeste e Sul. Daí a razão da grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos nessas regiões. Associado a isto, tem-se as facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Convém salientar que as outras regiões do país tem apresentado um certo grau de desenvolvimento, destacando-se a nordeste devido a ampla ocorrência de recursos minerais, abundância de gás natural, mercado em expansão e grande potencial para exportação. Além das indústrias de cerâmica vermelha várias empresas de mineração, revestimento cerâmicos, louça sanitária, cerâmica térmica, esmaltes e outras, já se instalaram ou estão em fase de implantação (Bellingieri, 2003).

Apesar da grandeza da indústria cerâmica brasileira e de seu grande potencial, ela se apresenta bastante heterogênea dentro do contexto da globalização. Pode-se dizer que os segmentos que melhor se adaptaram às novas condições são os de revestimento, refratários e louça sanitária e são também os mais organizados. Nos outros segmentos, há a necessidade de mais estudos para a melhora da qualidade e o aumento da produção a custos menores (Oliveira *et al.*, 2005).

A cerâmica pode ser definida como material inorgânico, não-metálico obtido geralmente após tratamento térmico da massa cerâmica em temperaturas elevadas. Os materiais cerâmicos são fabricados a partir de matérias-primas classificadas em naturais e sintéticas. As naturais mais utilizadas industrialmente são: argila, caulim, quartzo, feldspato, filito, talco, calcita, dolomita, etc. As sintéticas incluem entre outras aluminas sob diferentes formas (calcinada); carbetos de silício e os mais diversos produtos químicos inorgânicos (Nascimento, 2002).

Os produtos cerâmicos são produzidos a partir de várias matérias-primas. A principal delas é a argila, definida como um material natural, terroso e fino que, ao ser misturado com água, adquire plasticidade, tornando-se fácil de ser moldado. Depois de moldado, o objeto é seco e, em seguida, cozido em alta temperatura, de onde resulta o produto acabado (Bellingiere, 2003).

Os tijolos cerâmicos são peças bastante utilizadas pela indústria civil e o seu processo de fabricação compreende as diversas fases: exploração das jazidas, tratamento prévio das matérias primas, homogeneização, secagem e queima. A secagem de tijolos é um processo termodinâmico de fundamental importância na fabricação de produtos cerâmicos, que consiste na perda de água do produto por evaporação (Tomazetti, 2003).

Existem problemas que ocorrem durante a secagem de tijolos a serem resolvidos. Com a secagem feita de forma incorreta, a retirada de água da peça fica sem controle, o que pode causar danos estruturais como trincas, deformações, empenamentos e, conseqüentemente, uma grande perda de produto. Com a criação de códigos computacionais para simular o processo de secagem é possível conseguir melhor controle de processo, otimização da produção com redução de perdas e menor custo, evitando desperdício de matérias-primas (Gonçalves, 2003).

Este trabalho tem como motivação a carência de trabalhos neste seguimento da indústria cerâmica, contribuindo para melhoria na industrialização de tijolos cerâmicos vazados, obtendo resultados satisfatórios, como melhoria na qualidade do produto final com economia de matéria prima, energia e redução do tempo de produção.

Objetivo Geral

Esta pesquisa tem como objetivo principal estudar numérica e experimentalmente a secagem de blocos cerâmicos vazados na escala industrial.

Objetivos específicos

- Caracterizar a matéria-prima (argila) usada para confecção das amostras;
- Estudar experimentalmente a secagem em diversas temperaturas;
- Desenvolver um modelo matemático tridimensional transiente para descrever o transporte de calor, massa, variações dimensionais e tensões térmicas e hídricas em tijolos cerâmicos com forma paralelepípedica;
- Desenvolver uma solução numérica do modelo proposto via técnica dos volumes finitos;
- Fazer um programa computacional para simular a distribuição de temperatura, umidade e tensões em partículas cerâmicas no interior do sólido e suas respectivas cinéticas de secagem, aquecimento e variações dimensionais;
- Analisar o efeito de difusão de calor, massa e retração volumétrica simultâneos durante o processo de secagem;
- Estudar as tensões térmica e hídricas durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados (oito furos);
- Estudar a secagem de tijolos cerâmicos vazados com dimensões industriais em várias condições experimentais;
- Comparar os resultados numéricos e experimentais da cinética de secagem dos tijolos selecionados, para validar a metodologia matemática e determinar os coeficientes de transporte.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cerâmica

2.1.1 Histórico

Existem indícios de atividade cerâmica em quase todos os povos da antiguidade. Os gregos, por muitos séculos, produziram as melhores peças de cerâmica do mundo Mediterrâneo. Na Grécia, em Roma e em outras regiões, a produção de cerâmica era vendida nas feiras, e havia uma exportação contínua de ânforas fenícias (vasos de forma geralmente ovóide e com alças) para todo o Mediterrâneo, em virtude da sua forma artística e da sua utilidade para servir água, vinho e azeite (Bellingieri, 2003).

A necessidade do homem criar espaços em busca de abrigo, remonta à pré-história. Utilizando recursos naturais precisava defender-se dos predadores, dos rigores da natureza e de seus próprios semelhantes. Não demorou a perceber que sua sobrevivência dependia da segurança destes refúgios (Andrade *et al*, 2005).

A utilização dos ligantes na construção se fez necessária pela necessidade em consolidar peças menores, muito mais fáceis de serem encontradas e manuseadas. Com a evolução dos tempos, o homem descobriu diversos materiais e produtos para utilizar na construção. Um deles foi o tijolo. As peças cerâmicas mais antigas conhecidas por arqueólogos foram encontradas no Japão, na área ocupada pela cultura Jomon há cerca de 8000 anos, talvez mais.

Eram peças inicialmente simples, destinadas ao armazenamento de grãos e líquidos, evoluindo posteriormente para artigos mais complexos, com bocais e alças elaboradas com imagens em relevo, ou com pinturas vivas que possivelmente passaram a ser considerados objetos de decoração. Imagens em cerâmica de figuras humanas ou humanóides, representando possivelmente deuses, deste período também são freqüentes. Não existe um consenso sobre como a habilidade na manufatura de peças de cerâmica deixou o Japão e rapidamente se espalhou pela Eurásia antes do final do período Neolítico (Oliveira *et al.*, 2005).

A fabricação da cerâmica como atividade industrial, ocorreu devido ao crescimento das grandes construções dessa época. Praticamente toda a Europa herdou as práticas trazidas pelos povos antigos, tais como romanos, bizantinos, árabes, entre outros, que influenciaram fortemente no estilo das construções nesses continentes. O surgimento das primeiras máquinas moldadoras para fabricação de tijolos, movimentados por força animal ocorreu por volta de 1850, sendo mais tarde substituídas por máquinas a vapor e possibilitando, assim, o aumento significativo da produção. Pode-se considerar esse fato como sendo o primeiro grande salto para a indústria da cerâmica vermelha, pois possibilitou a fabricação de peças especiais e dos tijolos ocos ou furados (Steil, 2000).

No Brasil, há cerca de 2000 anos, já havia indícios, em diversas regiões, de populações que manipulavam convenientemente argila. Os índios brasileiros faziam sua cerâmica modelando e, às vezes, usando moldes ou enrolando, mas nunca numa roda; desconheciam, portanto, o torno. Além disso, não queimavam argila em fornos, mas sim no chão, com lenha, razão pela qual os artefatos recolhidos em sítios arqueológicos possuem coloração escura, o que revela que foram “mal cozidos”. Os artefatos produzidos pelos indígenas brasileiros eram em geral destinados à ornamentação e ao acondicionamento e transporte de líquidos e alimentos. Foram os colonizadores portugueses que trouxeram as técnicas para produzir cerâmica utilitária, como telhas e tijolos (Bellingieri, 2003).

Até o século XIX, os sistemas de produção não se modificaram muito. A produção permaneceu manual, a secagem era realizada ao sol e a queima em fornos trapezoidais. Sucessivamente, com o desenvolvimento das primeiras máquinas motrizes à vapor, foi

possível mecanizar as operações de extração de matérias primas, preparação e conformação e, conseqüentemente, aumentar a capacidade de produção. O salto de qualidade e quantidade de produção de tijolos, que não poderiam ter sido sem as máquinas motrizes, foi ainda favorecido pela construção do primeiro forno de anel de Hoffman. A Itália foi a pioneira na aplicação e fabricação de tijolos da era moderna. Com hélices (marombas) que permitiu a fabricação de tijolos e outros produtos em série em quantidade e qualidade, outros países como Espanha, França e Alemanha se destacaram no mercado como produtores de cerâmica vermelha e como fabricantes de equipamentos (Oliveira *et al.*, 2005).

Com o desenvolvimento tecnológico da indústria cerâmica passaram a ser construídos blocos vazados de grande resistência mecânica, mais leve inclusive que os antigos tijolos maciços; as alvenarias estruturais com produto cerâmico ressurgiram no mundo aproximadamente na metade do século XX, inclusive no Brasil, concorrendo economicamente com estruturas convencionais do concreto armado em edifícios de médio porte (até cerca de 8 a 10 pavimentos). No final do século XX, entretanto tais edifícios chegaram até 30 pavimentos (Albuquerque, 2000).

Atualmente, a cerâmica de construção brasileira ocupa um lugar de destaque na economia do país. Durante um longo período de produção de tijolos não ocorreram mudanças tecnológicas importantes. Somente nas últimas décadas é que a tecnologia de fabricação de tijolos passou por um processo de desenvolvimento associado a inovações. Mesmo assim, é natural que outros processos e inovações ainda ocorrerão. No entanto, considerando também as variáveis operacionais, se torna cada vez mais importante, quando se considera produtividade e qualidade, o conhecimento, em especial por parte dos técnicos e engenheiros envolvidos no processo produtivo, das variáveis de controle do processo, em particular aquelas relacionadas com as matérias-primas empregadas na preparação de massas (Oliveira *et al.*, 2005). 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).

2.1.2 Conceito de cerâmica

Cerâmica ou material cerâmico compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Materiais cerâmicos são materiais compostos em sua totalidade por argila, e que são largamente utilizados na construção civil. A existência de várias fases cerâmicas possibilita as combinações de átomos metálicos e não-metálicos que formam muitos arranjos estruturais, e dá origem a materiais cerâmicos com larga aplicação na engenharia. A estrutura do material cerâmico é que define suas propriedades (Nascimento, 2002).

2.1.3 Caracterização do setor

Atualmente, a indústria cerâmica representa um setor de grande importância econômica para o Brasil, isso pode ser observado por sua participação no PIB (Produto Interno Bruto), alcançando um valor da ordem de 1%. Dentro deste contexto a cerâmica de revestimento é um dos mais importantes segmentos e apresenta um crescente desempenho tecnológico (Alves *et. al*, 2008).

O setor industrial da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica e isolantes térmicos. No Brasil existem todos estes segmentos, com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção. Além disso, existem fabricantes de matérias-primas sintéticas para cerâmica (alumina calcinada, alumina eletrofundida, carbetos de silício e outras), de vidrados e corantes, gesso, equipamento e alguns produtos químicos auxiliares (ABC, 2005).

No Brasil, as regiões de maior concentração de indústrias cerâmicas de todos os segmentos são Sudeste e Sul. Esse fato é associado ainda às facilidades de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Convém salientar que as outras

regiões do país têm apresentado um certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde muitas fábricas de diversos setores industriais estão se instalando e onde o setor de turismo tem crescido de maneira acentuada, levando à construção de inúmeros hotéis. Com isto tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente dos segmentos ligados à construção civil, o que tem levado à implantação de novas fábricas de cerâmicas nessa região (ABC, 2005).

A indústria de cerâmica vermelha brasileira gera como produtos principais tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos e agregados leves. A maior produção está concentrada nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso e Paraná. Praticamente, a renda gerada pela produção de cerâmica vermelha fica nos locais de produção, com alto significado social, na criação de empregos e ao propiciar a construção em geral, principalmente moradias (CNI/SENAI, 2008).

O setor de cerâmica vermelha é formado por um grande número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidades produtivas. Embora algumas grandes empresas despontem no setor, o mesmo é caracterizado por uma vastidão de pequenas empresas que vão desde empresas de origem familiar até empresas de médio porte, 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 isto não é a regra geral; muitas empresas ainda estão em um estágio bastante primitivo quanto à modernização (Tapia e Vilar, 2000).

2.1.4 Propriedades dos materiais cerâmicos

Segundo Albuquerque (2000) as propriedades dos materiais cerâmicos são:

a) Propriedades termo-físicas

- Massa específica aparente (γ) : varia normalmente de 1,9 a 2,1 t / m³ ;
- Umidade higroscópica de equilíbrio(ψ): normalmente entre 0,5 a 1,0%;

- Absorção de água (AA): praticamente nula nas porcelanas, podendo chegar a valores da ordem de 20 a 25% na cerâmica vermelha;

- Coeficiente de dilatação linear (α): bastante variável, podendo-se assumir o valor $\approx 0,6 \times 10^{-5}$ mm/mm°C para tijolo e $0,3 \times 10^{-5}$ mm/mm°C para porcelana;

- Calor específico (c): em torno de 878,22 J/kg°C (cerâmica vermelha);

- Coeficiente de condutibilidade térmica (λ): em torno de 0,8364 W/m°C.

b) Propriedades mecânicas e elásticas

- Resistência a compressão (σ_c): pode variar de 2 MPa (tijolo de barro cozido) até 200 MPa nas porcelanas. Nas cerâmicas vermelhas esta resistência é da ordem de 20 a 80 MPa, podendo chegar a valores da ordem de 150 MPa nos pisos de primeira qualidade;

- Resistência à tração (σ_t): normalmente da ordem de 15 à 20% da resistência à compressão;

- Resistência à tração na flexão (σ_b , σ_f): normalmente da ordem de 15 a 20% da resistência à tração;

- Módulo de deformabilidade longitudinal: os materiais cerâmicos são essencialmente frágeis (ruptura sem aviso), apresentando módulo de deformação na faixa de 6000 à 60000 MPa;

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,20$ a $0,30$;

- Dureza superficial: nos pisos cerâmicos essa propriedade é particularmente importante; a dureza geralmente é muito elevada, chegando 6 ou 7 na escala de Mohs (feldspato e quartzo).

c) Características químicas

Os materiais cerâmicos apresentam, em geral, bom desempenho frente à ação de agentes químicos (incluindo ácidos e álcalis), ao contrário, por exemplo, de metais, plásticos e concretos, sujeitos à diferentes mecanismos de degradação (corrosão, lixiviação, volatilização de componentes, etc). Tal comportamento é justificado, sobretudo, pela estabilidade química da cerâmica, ou seja, não há facilidade de reação entre seus componentes e outros elementos químicos.

Os vidros são constituídos essencialmente por sílica, soda cáustica e cal, além de diversos outros óxidos em pequenas porcentagens; a matéria prima é fundida e a seguir resfriada, podendo-se, portanto classificar o produto como “material cerâmico”, devido às peculiaridades desse material cerâmico (estrutura amorfa, etc).

2.1.5 Tipos de produtos cerâmicos para construção civil

Existe uma diversidade muito grande de produtos cerâmicos, podendo ser a cerâmica considerada como um material muito versátil em termos de propriedades (cor, porosidade, e resistência, etc), processos de produção, alternativas de matéria prima e formas de utilização de produtos cerâmicos para construção civil. Segundo Albuquerque (2000), a cerâmica branca pode ser agrupada genericamente de acordo com a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Tipos e caracterização da cerâmica branca.

Material	Produto obtido	Absorção de água (AA)
Pó de pedra	Azulejos e peças sanitárias	10% - 20%
Grés cerâmicos	Peças sanitárias, pastilhas e ladrilhos	0,5% - 2%
Porcelana	Pastilhas, porcelanas elétricas	nula

Fonte: Neves (1999)

A cerâmica vermelha ou estrutural pode ser agrupada conforme a Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Tipos e caracterização da cerâmica vermelha

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

Fonte: Neves (1999)

2.2 Argila para cerâmica vermelha

2.2.1 Argilas e seus constituintes

Segundo Gonçalves (2003), a argila (Figura 2.1) é a matéria-prima básica dos produtos cerâmicos, sendo, portanto, importante conhecer sua natureza. A argila é composta por grande quantidade de material amorfo, predominando o material cristalino. Os cristais da argila podem agrupar-se em espécies mineralógicas bem definidas. 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).

Os mais importantes constituintes da argila são:

- silicatos: são os principais constituintes das argilas. Sua unidade fundamental é o tetraedro sílico-oxigênio;
- minerais do grupo caulinita: a caulinita faz parte da maioria das argilas. Tem forma de placas hexagonais irregulares;

- minerais do grupo montmorilonita ou esmecita: este mineral é geralmente encontrado nas bentonitas que são rochas derivadas de cinzas vulcânicas. A água penetra facilmente na montmorilonita provocando o seu inchamento;

- minerais micáceos: as micas são encontradas em muitas argilas, argilitos e xistos;

- minerais de alumínio hidratados: Gibsita, constituintes dos solos lateríticos, é o principal mineral de alumínio, sendo o mesmo uma mistura de bauxita, caulinita, limonita e outros minerais.



Figura 2.1 – Amostra de uma argila. Fonte: www.artcamargo.com.br/ondex.php?manufacturers...

2.2.2 Origem e transformação

A argila se origina da desagregação de rochas que comumente contém feldspato, por ataque químico (por exemplo pelo ácido carbônico) ou físico (erosão, vulcanismo), que produz a fragmentação em partículas muito pequenas.

Normalmente, as jazidas são formadas pelo processo de depósito aluvial, ou seja, as partículas menores (e portanto mais leves) são levadas pela corrente de água e depositadas em lugares onde a força hidrodinâmica já não é suficiente para mantê-las em suspensão. Num processo inverso, de litificação, a argila pode se transformar em rocha sedimentar, se um

depósito de argila for desidratado e submetido a compactação (normalmente pela pressão de camadas superiores), dando origem a rocha mais finas (lutitos ou pelitos) tais como os folhelhos, que se apresentam bem estratificados, e os argilitos, que possuem pouca ou nenhuma estratificação.

2.2.3 Aplicação

As argilas possuem inúmeras aplicações. Por sua plasticidade enquanto úmida e extrema dureza depois de cozida a mais de 800°C, a argila é largamente empregada na cerâmica para produzir vários artefatos que vão desde os tijolos até semicondutores utilizados em computadores.

2.2.4 Tipos de argilas

Segundo Rossi (2004), os tipos de argilas são:

- Argila natural: é uma argila que foi extraída e limpa, e que pode ser utilizada em seu estado natural, sem a necessidade de adicionar outras substâncias.
- Argila refratária: argila que adquire este nome em função de sua qualidade de resistência ao calor. Suas características físicas variam, umas são muito plásticas e finas, outras não. Apresentam geralmente alguma proporção de ferro e se encontram associadas com os depósitos de carvão. São utilizadas nas massas cerâmicas dando maior plasticidade e resistência em altas temperaturas, por isto são bastante utilizadas na produção de placas refratárias que atuam como isolantes e revestimentos para fornos.
- Caulim ou argila da china: argila primária, utilizada na fabricação de massas para porcelanas. É de coloração branca e funde à 1800°C; por ser pouco plástica, deve ser moldada em moldes ou formas, pois com a mão é praticamente impossível.

- Argilas de bola (Ball Clay): são argilas secundárias muito plásticas, de cor azulada ou negra, apresentando alto grau de contração tanto na secagem quanto na queima. Sua grande plasticidade impede que seja trabalhada sozinha, uma vez que fica pegajosa com a água. É adicionada em massas cerâmicas para proporcionar maior plasticidade e tenacidade à massa. Vitrifica à 1300°C.

- Argilas para grés: é uma argila de grão fino, plástica, sedimentária e refratária que suporta altas temperaturas. Vitrificam entre 1250 e 1300°C. Nelas o feldspato atua como material fundente. Após a queima sua coloração é variável, que vai do vermelho escuro ao rosado e até mesmo, acinzentado do claro ao escuro.

- Argilas vermelhas: são plásticas com alto teor de ferro e resistem a temperaturas de até 1100°C, porém fundem em uma temperatura maior; podem ser utilizadas com vidrados para grés. Sua coloração é avermelhada escuro quando úmida chegando quase ao marrom; quando sinterizada, a coloração se intensifica para o escuro de acordo com seu limite de temperatura de queima.

- Bentonita: argila vulcânica muito plástica, que contém mais sílica do que alumínio; se origina das cinzas vulcânicas. Apresenta uma aparência e tato gorduroso, e pode aumentar entre 10 e 15 vezes seu volume ao entrar em contato com a água. É adicionada à argilas para aumentar sua plasticidade. Funde por volta de 1200°C.

- Argilas expandidas: a argila expandida é produzida em grandes fornos rotativos, utilizando argilas especiais que se expandem à altas temperaturas (1100°C), transformando-as em um produto leve, de elevada resistência mecânica, ao fogo e aos principais ambientes ácidos e alcalinos, como os outros materiais cerâmicos. Suas principais características são: leveza, resistência, inércia química, estabilidade dimensional, incombustibilidade, além de excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico.

A Figura 2.2 mostra alguns tipos de argilas encontradas na natureza.



- | |
|---|
| 1- Argila de grês;
2- Caulim ou argila da China;
3- Argila refratária;
4- Argila de bola;
5- Bentonita;
6- Argila natural;
7- Argila vermelha |
|---|

Figura 2.2 – Tipos de argilas. Fonte: Rossi (2002)

2.2.5 Classificação das argilas

Pode-se classificar as argilas, segundo os critérios de Gonçalves (2003), como se segue:

a) De acordo com a geologia:

- **Argilas residuais:** são assim denominadas porque são formadas no mesmo local da rocha que lhe deu origem. O principal agente formador destas argilas é a água subterrânea que provoca reações químicas que vão desgastando a rocha. A pureza da argila residual depende da natureza da rocha que lhe deu origem, da quantidade de impurezas removidas, etc.

- **Argilas sedimentares:** estas argilas são provenientes de materiais transportados por ações naturais tais como, vento, chuvas, ações glaciais, etc..

b) De acordo com sua estrutura:

- Laminares ou foliáceas;
- Caulinitas: mais puras, usadas na indústria de refratários, porcelana e louça sanitária;
- Montmorilonitas: pouco usadas, são muito absorventes e possuem alto grau de inchamento; são misturadas as caulinitas para corrigir a plasticidade;
- Micáceas: são mais abundantes e empregadas na fabricação de tijolos;
- Fibrosas: não usadas na fabricação de produtos cerâmicos.

c) De acordo com sua plasticidade:

- Gordas: ricas em material argilosos e pobres em desengordurante; são plásticas e apresentam alta deformação quando cozidas;
- Magras: muito silicosas; geram produtos porosos e frágeis.

d) De acordo com o ponto de fusão ou uso:

- Infusíveis: são constituídas essencialmente por caulim puro; após a queima tem as cores brancas translúcida. Infusíveis à temperaturas elevadas são utilizadas para fabricação de porcelana;

- Fusíveis: deformam-se e vitrificam à temperaturas inferiores à 1200°C. Tem cor cinza azulado ou amarela-avermelhada, sendo ótimas para tijolos e telhas.

- Refratárias: são muito puras, não se deformam à temperatura de 1500°C, tem baixo coeficiente de condutividade térmica, e são usadas para revestimentos de fornos (tijolos refratários). As argilas de maior refratariedade ou cone pirométrico equivalente à 1450°C geralmente apresentam várias cores. As argilas de menor refratariedade ou menor cone pirométrico equivalente, às vezes chamadas “semi-refratárias”, apresentam cores bem escuras, marrom ou pretas, sem indício de fusão nas arestas.

2.2.6 Propriedades das argilas

Segundo Albuquerque (2000), as propriedades das argilas são:

a) Plasticidade

É a propriedade do corpo que, submetido a uma força determinada, deforma-se e conserva indefinidamente a deformação quando se anula a força.

A argila seca tem plasticidade nula. Molhando-a, ela vai ganhando plasticidade até um limite máximo. Com mais água, as lâminas se separam e a argila se torna um líquido viscoso.

b) Limites de Atherberg

De acordo com a Mecânica dos Solos, a trabalhabilidade de uma argila é normalmente avaliada pelos limites de Atherberg (limite de plasticidade e limite de liquidez).

Definindo-se o limite de plasticidade por LP e o limite de liquidez por LL, determina-se o índice de plasticidade por $IP = LL - LP$ e o índice de consistência por $IC = [LL - M] / IP = [LL - M] / (LL - LP)$, onde M é o teor de umidade da argila no estado em que se encontra na natureza.

De acordo com a ABNT as argilas são classificadas como mostrado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Classificação das argilas segundo ABNT, índices de consistência e indicações

Tipos de argilas	Índices de consistência	Indicações
Muito mole	$IC < 0$	Corre com facilidade entre os dedos, ao ser apertada na palma da mão.
Moles	$0 < IC \leq 0,50$	Facilmente moldada nos dedos.
Médias	$0,50 < IC \leq 0,75$	Requer esforço médio para ser moldada.
Rígida	$0,70 < IC \leq 1,00$	Requer grande esforço para ser moldadas.
Duras	$IC > 1,00$	Não pode ser moldada pelos dedos

c) Resistência da argila seca

As características principais da argila são a plasticidade, quando úmida, e a resistência quando seca. A resistência da argila no estado seco está intimamente ligada à composição granulométrica da mesma.

Segundo Elias (1995), a resistência mecânica não depende exclusivamente do teor de colóides, mas também de uma granulometria adequada, o que permite que as partículas coloidais

exercem eficiente papel de aglutinante já que as mesmas são extremamente pequenas, capaz de manter-se em suspensão na água e com poder de aglomerarem as partículas de argila de maior dimensão. A composição granulométrica mais adequada é aquela que tem substâncias argilosas em torno de 60%, estando o resto do material dividido igualmente entre silte, areia fina e areia média.

As argilas devem ser dosadas a fim de apresentarem plasticidade máxima, quando úmidas, máxima resistência quando secas ou quando queimadas, e mínimas retrações durante a secagem; nas indústrias de cerâmica vermelha, por esses motivos, é muito frequente à mistura de argilas duras (ilitas, etc.) com argilas plásticas (conhecidas como "argilas de várzea").

d) Perda de água sob ação da temperatura

Toda a matéria argilosa tem água de constituição ou reticular (água que faz parte da rede cristalina do mineral) e água de absorção ou plasticidade (aquela que está unida à superfície das partículas). A energia térmica elimina toda água, qualquer que seja sua forma; a água de absorção é facilmente eliminada, desde a temperatura ambiente até 110°C.

A água de constituição é constante para cada tipo de argila, sendo eliminada a uma temperatura fixa para cada mineral, sempre maior do que 400°C. Argilas caulínicas, por exemplo, a partir de 400°C passam a perder água de constituição, transformando-se em estruturas amorfas de sílica e alumina; aos 900°C a sílica e a alumina se recombina, cristalizando-se.

e) Retração por secagem

Num bloco de argila úmida, quando exposto à secagem, ocorre evaporação a partir da superfície do corpo e difusão de umidade no interior da massa, ou seja, migração no sentido do centro para a superfície do corpo que se encontra mais seca, com tendência de homogeneizar o conjunto.

No processo, no lugar antes ocupado pela água vai ficando vazio e, conseqüentemente, o conjunto retrai-se; a retração é proporcional ao grau de umidade e de retirada de umidade e varia também com a composição da argila: quanto maior o teor de grânulos finos, maior a retração.

f) Absorção e liberação de calor

Durante o aquecimento de uma argila ocorrem transformações ora exotérmicas ora endotérmicas. Na Figura 2.3, a amplitude dos picos de absorção ou liberação de calor, registrada durante uma análise térmica-diferencial (ATD), bem como a determinação das temperaturas em que eles ocorrem, servem para perfeita identificação de uma argila. Nesta figura, apresenta-se uma análise térmica-diferencial de uma argila caulinitica, podendo-se notar que o pico endotérmico aparece entre 600°C e 800°C, onde se dá a perda da água de constituição; próximo aos 900°C aparece o pico exotérmico que indica a fase de cristalização.

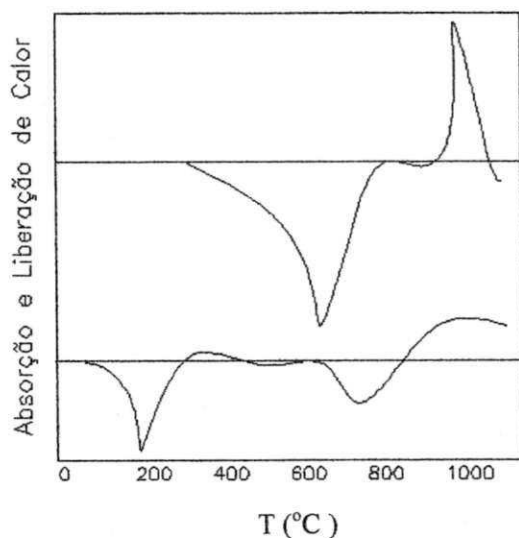


Figura 2.3 – Gráfico da análise térmica-diferencial da argila. Fonte: Albuquerque (2000).

É a relação entre o volume de poros e o volume total aparente do material (argila ou cerâmica), sendo função da natureza dos constituintes, forma, tamanho e posição relativa das partículas, e também dos processos de fabricação.

Há duas porosidades: a aparente e a real. A aparente considera apenas os poros abertos, que absorvem água; já a real leva em consideração todos os poros, abertos e fechados, sendo de difícil determinação, recorrendo-se a porosímetros de mercúrio.

Pode-se calcular a porosidade em peso e em volume, como segue:

- Porosidade em peso= $[m_2 - m_1]/m_1 \times 100\%$
- Porosidade em volume= $[m_2 - m_1]/[m_2 - m_3] \times 100\%$

onde:

m_1 = massa da amostra seca

m_2 = massa da amostra saturada

m_3 = massa da amostra saturada e submersa

O aumento da porosidade pode ser obtido de vários modos:

- i) pela adição de matérias que desaparecem na queima (são em geral matérias carbonosas, como por exemplo, carvão moído);
- ii) pela adição de matérias porosas (exemplo: vermiculita e mica expandida);
- iii) pela criação de fase gasosa, que seja estável durante a secagem e queima (em geral se utiliza a reação entre alumínio ou zinco ou hidróxidos alcalinos - KOH, NaOH).

Pode-se diminuir a porosidade dos seguintes modos:

- i) pela composição de argilas, de modo a obter-se uma granulometria contínua;
- ii) atingindo-se a vitrificação da massa de argila, pela adição de fundentes ou pela elevação da temperatura. Os fundentes são substâncias que na queima se combinam com os constituintes da argila, formando uma massa que preenche os poros (ex: CaO);

iii) pela adição de eletrólitos à argila em estado seco, tais como álcalis, hidróxido de cálcio, certos ácidos etc;

iv) pela preparação da massa cerâmica, removendo-se as bolhas de ar (câmara de vácuo) e promovendo-se a máxima compactação da argila.

A porosidade influi nas propriedades da argila e da cerâmica da seguinte maneira:

i) a absorção de água aumenta na razão direta da porosidade, favorece a corrosão e também a refratariedade;

ii) a condutibilidade térmica e a condutibilidade elétrica diminuem com o aumento da porosidade; o mesmo ocorre com a massa específica aparente do material;

iii) a resistência à esforços axiais e a resistência à abrasão também são diminuídas com o aumento da porosidade.

h) Principais impurezas das argilas

i) Óxido de alumínio (Al_2O_3): aumenta a refratariedade até uma proporção de 70%; 70% a 80% diminui a refratariedade, tornando a aumentar para proporções maiores.

ii) Óxido de ferro (Fe_2O_3): a presença de óxido férrico na argila faz com que ela tenha uma cor avermelhada e baixa plasticidade e refratariedade. Se a argila for usada para porcelana ou peças brancas, não poderá conter óxido de ferro.

iii) Feldspatos sódicos, potássicos ou cálcicos (fundentes), produzem os seguintes efeitos:

- Diminuem a refratariedade, o ponto de fusão e a plasticidade da argila.
- Aumenta a massa específica, a resistência e a impermeabilidade do produto queimado.

iv) Sais solúveis (K_2SO_4 e Na_2SO_4 , $NaCl$, Na_2CO_3): em proporções acentuadas dão origem a formações esbranquiçadas, antes ou depois da queima, pela cristalização dos sais que,

dissolvidos em água, foram, por capilaridade ou permeabilidade transportadas às superfícies (eflorescências).

v) Compostos cálcicos, são eles:

- Carbonato de cálcio (calcita);
- Sulfato de cálcio (gesso ou selenita);
- Fosfato de cálcio;
- Feldspatos, silicatos e aluminos silicatos de cálcio.

vi) Sílica livre (SiO_2): os efeitos mais importantes da sílica livre são:

- Aumento da brancura do produto queimado;
- Redução da plasticidade;
- Diminuição da retração de dilatação térmica dos produtos, que contudo diminui quando se dá a vitrificação (combinação da sílica ativa com a alumina ou outros fundentes).

2.2.7 Argila para produção de cerâmica vermelha

Para a produção de cerâmica vermelha, a principal matéria-prima é a argila e a diversidade de suas origens 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 (Sanchez-Muñoz *et al.*, 2002).

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

As argilas utilizadas na produção de tijolos e telhas são geralmente argilas quaternárias e, as vezes terciárias, das margens de rios, lagos ou várzeas, ricas em ferro e álcalis, de granulometria fina e contendo teor considerável de matéria orgânica, fatores responsáveis pela plasticidade elevada. As argilas para fabricação de tijolos devem ser moldadas facilmente e ter o valor médio ou elevado para tensão ou módulo de ruptura à flexão, antes e após a queima.

Costumam apresentar cor vermelha após a queima em baixas temperaturas, com um mínimo de trincas e empenamentos. Elevados teores de ferro bivalente e elementos alcalinos podem reduzir a faixa de vitrificação e causar colorações indesejáveis (Tomazetti, 2003).

De acordo com Tomazetti (2003), os depósitos onde podem ser encontrada as argilas para produção de tijolos são:

- Argila de várzea (Figura 2.4): encontrada as margens de rios ou banhados, apresenta textura terrosa, esfarelada em torrões, granulometria fina e quando úmida, elevada plasticidade, sendo empregada por isso como ligante de massa. Apresenta com maior frequência impurezas como quartzo, mica e matéria orgânica, sendo esta última, quando em teores elevados, uma das responsáveis pelas perdas e contração do produto durante à queima.



Figura 2.4 – Argila de várzea. Fonte: www.unesp.br/destaques/060505a.php

- Argila de morro (Figura 2.5): encontrada longe de banhados e rios, apresenta textura terrosa, granular ou em blocos, desagregando-se geralmente em pequenos fragmentos. Possui baixa plasticidade, coloração natural mais clara e cor variável entre vermelha e amarelada após a queima, contém quartzo e feldspato como impurezas, além de baixo teor de matéria orgânica. Nessas argilas é muito comum a presença de seixos e cascalho, e, eventualmente, de carbonatos.



Figura 2.5 – Extração da argila de morro. Fonte: [www.museumin.ufrgs.br/ EspSilvestre.htm](http://www.museumin.ufrgs.br/EspSilvestre.htm)

- Argila tipo taguá: são encontradas em camadas bastante profundas sob rios ou encostas de morros. Caracteriza-se por camadas delgadas e muito duras de matérias argilosas de cores variadas, com predominância do vermelho e do cinza. Sua extração exige máquinas potentes e às vezes detonações por dinamites, devendo o material ser seco e moído antes de entrar na linha de processamento.

2.3 Tijolos

2.3.1 Processo Produtivo

O processo produtivo de cerâmica vermelha ainda é pouco evoluído em relação a outros seguimentos da indústria cerâmica. Mas graças a inovações tecnológicas algumas empresas vem se destacando, aumentando assim a produção e qualidade de seus produtos. Essa evolução está direcionada a bases estritamente industriais, através de algumas inovações tecnológicas, objetivando a automação de equipamentos e, conseqüentemente, redução de custos de mão-de-obra (Steil, 2000).

A matéria-prima utilizada na produção 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 cerâmica vermelha. A Figura 2.6 apresenta de forma genérica, o processo de fabricação de

produtos derivados da cerâmica vermelha. Esse processo é praticamente comum a todas as empresas de cerâmica em geral, havendo pequenas variações, de acordo com características particulares de cada matéria-prima ou produto final, (Wittwer e Faria, 1997; Mafra, 1999):

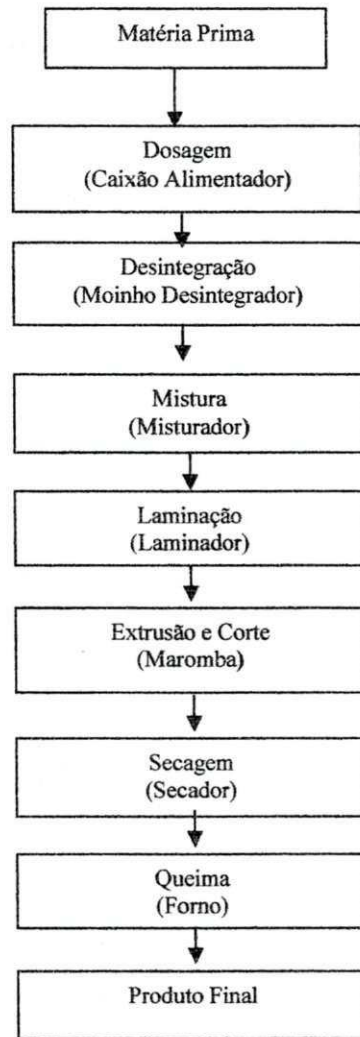


Figura 2.6 – Fluxograma de fabricação de tijolos. Fontes: Villar (1988), Sectme (1990), Cavaliere et al. (1997), Steil (2000).

A seguir descreve-se melhor estas etapas do processo produtivo.

a) Extração e preparação das matérias-primas

- Extração: Na extração da argila utiliza-se retro-escavadeira, geralmente, a fonte da matéria prima encontra-se próximo à empresa. Os insumos são transportados das jazidas para os galpões de estocagem.

- Estocagem: algumas cerâmicas possuem depósitos próprios de argilas, enquanto outras adquirem de terceiros. Nesta fase, conhecida como “descanso” ou “sazonamento”, o material sofre processos de alterações químicas e descompactação, benéficos ao processo produtivo, além de dar garantias de produção nas épocas chuvosas. Quando da utilização de duas ou mais argilas no processo produtivo, ocorre a pré-mistura, que pode ser realizada manualmente ou por pás carregadeiras, conforme o percentual de cada matéria-prima utilizada, obtendo-se uma massa única e homogênea (Figura 2.7).

- Dosagem: esta é a etapa onde a argila é levada ao caixão alimentador dosador ou diretamente a correias transportadoras, cujas matérias-primas são proporcionalmente dosadas, dependendo de suas características cerâmicas.

- Desintegração: quando as argilas são muito duras e compactadas, passam por um desintegrador, que tem função de triturar os aglomerados maiores de argila, de modo a facilitar as operações posteriores.

- Mistura: na seqüência a matéria-prima segue para o misturador, equipamento que realiza movimentos circulares, permitindo homogeneização da massa e introdução de água na mistura, para a obtenção da umidade (geralmente de 18 à 30%) e plasticidade adequada para extrusão.



Figura 2.7 – Mistura da argila. Fonte: www.preceram.pt/

- Laminação: após a etapa da mistura, a argila passa por um laminador, que completa a mistura, e é responsável por um adensamento, eliminando bolhas de ar ou aglomerados remanescentes, antes de ser levada às extrusoras. Em alguns casos as extrusoras podem ter um laminador acoplado na entrada do equipamento (Villar, 1988; SUDENE e ITEP, 1996; Mafra, 1999).

b) Conformação mecânica

A conformação mecânica consiste na obtenção de tipos de produtos nas dimensões, formas e espécies mais variadas, a partir de uma massa plástica de argila. Existem vários sistemas de conformação, que dependem essencialmente do tipo de produto que se pretende obter e das características de plasticidade da matéria-prima que se tem à disposição. São elas:

- Extrusão: A extrusão é feita num equipamento chamado de extrusora na qual é responsável por dar o formato ao produto, onde a massa é impulsionada, por meio de um propulsor (mais comumente o parafuso sem fim), através de uma chapa de aço perfurada, lançando-a dentro de uma câmara de vácuo. O ar é retirado pela câmara de vácuo, e o material é extraído por meio de outro parafuso sem fim que o impele, através de uma matriz de aço (boquilha), conformando a massa no formato desejado (Figura 2.8).

- Corte: o bloco do material extrudado é contínuo, e cortado nos tamanhos padronizados por meio de cortadeira manual ou automática, acoplada a extrusora, operando em sincronia com o deslocamento do bloco em extrusão obtendo-se produtos como tijolo, lajota, tubo cerâmico e outros produtos de forma regular (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.).



Figura 2.8 – Processo de extrusão de tijolos. Fonte: Kawaguti (2004).

c) Processamento térmico

Consiste em operações como secagem e queima das peças já preparadas e conformadas. Nestas operações se dão as transformações de estrutura e composição, responsáveis pela obtenção de propriedades finais, como brilho, cor, porosidade, resistência à flexão, ao gretamento e a altas temperaturas, ao ataque de agente químico, entre outras (Pauletti, 2001).

- Secagem: após o corte, as peças úmidas são transportadas para os secadores artificiais, onde são empilhadas em blocos. A secagem é a fase do processo que antecede a queima, e que demanda uma quantidade apreciável de energia térmica, para evaporar a água, de forma lenta e uniforme, que foi necessária adicionar durante o processo de moldagem. O objetivo desta etapa é a redução do teor de umidade dos produtos de 20 à 25% após a extrusão ou prensagem, para 3 à 10% após a secagem, ocorrendo uma contração que pode variar de 4 à 10%. Quando a secagem é natural, as peças são empilhadas em galpões cobertos, dispostos em prateleiras (fixas ou móveis) ou simplesmente empilhadas no chão. A duração da secagem é função das condições de estado do ar atmosférico (temperatura e umidade relativa) e da ventilação do local. A secagem artificial é realizada em câmaras de secagem, aproveitando, via de regra, o calor residual dos fornos. Os tipos mais comuns de secadores artificiais são do tipo estático, contínuo ou semi-contínuo. O período da secagem artificial depende das características da matéria-prima, do formato das peças e do tipo do secador, entretanto há uma variação média

de 12 à 40 horas (Pauletti, 2001). A secagem é realizada a temperatura de 80 à 110°C (Figura 2.9).

- 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. A temperatura de queima é da ordem de 750 à 900°C para tijolos, de 900 à 950°C para telhas e 950 à 1200°C para tubos cerâmicos. A etapa de queima é conduzida em equipamentos térmicos, denominados fornos, cuja concepção térmica e os combustíveis empregados possuem grande variedade. Os principais tipos de fornos podem ser classificados como: intermitentes (abóboda ou paulistinha, garrafão, chinês, caipira e chama reversível) ou contínuos (Hoffmann ou semicontínuo e túnel). Após a queima e resfriamento, os produtos desenformados estão aptos para comercialização e uso (Villar, 1988; SECTME, 1990; SUDENE e ITEP, 1996; Cavaliere et al., 1997; Mafra, 1999).

d) Expedição

A expedição é a fase final do processo produtivo, podendo ser subdividido nas seguintes etapas:

- Inspeção: é feita na saída do forno, rejeitando material quebrado, trincado, lascado, queimado em excesso.

- Armazenamento: é feito em área coberta, permanecendo no local até o carregamento para expedição (Figura 2.10).

- Entrega ao Cliente: efetuada através de caminhões por via rodoviária, utilizando veículos próprios ou fretistas (Mafra, 1999).



Figura 2.9 – Estufa para secagem. Fonte: www.preceram.pt/

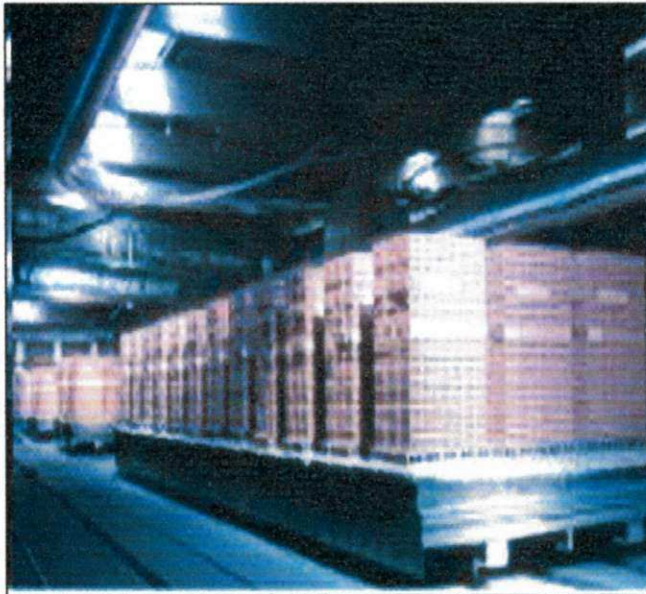


Figura 2.10 – Armazenagem do produto. Fonte: www.preceram.pt/

A Figura 2.11 representa de forma simplificada o esquema produtivo da cerâmica vermelha.

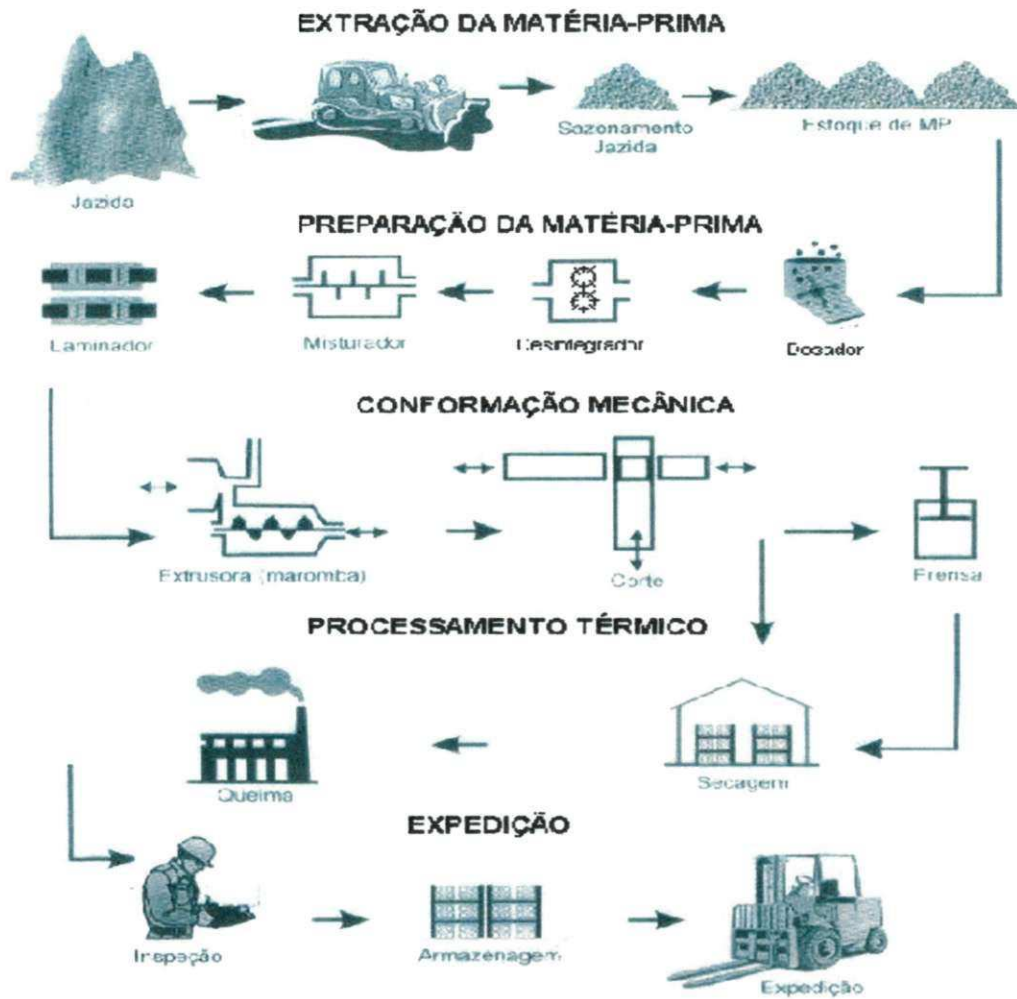


Figura 2.11 – Esquema produtivo da cerâmica vermelha. Fonte: Villar (1988), Cavaliere et al. (1997), Mafra (1999), Pauletti (2001).

2.3.2 Alguns defeitos em tijolos

Segundo Oliveira et al. (2005), podem ocorrer os seguintes defeitos em tijolos:

a) Eflorescência

Sobre as superfícies externas dos tijolos formam-se depósitos de sais que apresentam cores e manchas indesejáveis. O tijolo queimado absorve umidade da água da chuva, da atmosfera e do terreno. A umidade absorvida pelo tijolo dissolve os sais, mas, se o ambiente

externo se torna mais seco, ocorre o caminho inverso, evapora-se a água da superfície dando lugar a cristalização dos sais.

b) Coração negro

São manchas negras e cinzas que permanecem (se pode ver ao longo da secção transversal das peças no interior dos produtos, após processo de queima.

d) Empenamentos

São provocados por:

- Secagem diferencial: se uma face da peça seca mais rapidamente que a outra se formam gradientes de tensões residuais de contração, que podem deformar o produto.
- Mal posicionamento no suporte de secagem: a colocação de peças verdes sobre suportes planos, para secagem, pode provocar empenamentos no material.
- Boquilhas de feira: este tipo de empenamentos já se nota após a secagem.

e) Trincas

As trincas de secagem são pequenas fissuras causadas por secagem rápida. Geralmente inicia-se nas bordas e propagam-se até o centro da peça, sendo mais aberta na borda.

As trincas de queima podem ser de aquecimento ou resfriamento: as trincas de aquecimento caracterizam-se por serem pouco sinuosas, abertas e de bordas dentadas, enquanto que as de resfriamento caracterizam-se por serem muito finas de bordas fechadas, normalmente em forma de S.

Muitos defeitos que se manifestam à saída do secador têm sua origem em etapas anteriores do processo produtivo e não têm nada que ver com a secagem. Assim, uma homogeneização incorreta da pasta origina retrações locais diferenciais (mais contração onde

há mais umidade) que se traduzem em fissuras. Estas são bastante freqüentes nos processos de fabricação manuais.

Outra causa frequente de microfissuras são as laminações que produzem as boquilhas das extrusoras. Para reduzir este problema é aconselhável introduzir um redutor de plasticidade na pasta ou então modificar a geometria do molde para dar uma maior rugosidade. Um defeito associado é a presença de vazios. Se existe ar incorporado, a orientação preferencial resultante da extrusão funciona como um selante, podendo resultar no inchamento do material.

Outros fatores são devidos diretamente à fase de secagem, como a má colocação das peças no secador, ou seja, distribuição e disposição, ou a má aplicação dos vetores de secagem (elevação excessiva da temperatura e alta velocidade de ar).

Por último, vale a pena fazer uma referência ao problema da reabsorção de umidade. Dependendo do tipo de argila, se o tempo transcorrido desde que a argila deixa o secador até quando ela é introduzida no forno, é grande, e a umidade ambiente é muito alta, inicia-se um processo de re-hidratação (reabsorção) que pode provocar rupturas e/ou explosões, quando o material entra no forno (Elias, 1995).

Uma discussão detalhada dos defeitos em materiais cerâmicos oriundos do processo de secagem pode ser encontrada na literatura (Sanchez e Barba, 1998).

2.4 Secagem

2.4.1 Teoria e modelos de secagem

O processo de secagem envolve complexos fenômenos de transferência de calor, massa, quantidade de movimento e variações dimensionais, exigindo a necessidade de se gerar modelos matemáticos que simule o processo com grande realismo físico. Para que isso ocorra, é importante inserir no modelo de secagem, o máximo de informações, tais como: mecanismo

de transporte de calor e umidade dentro do sólido, coeficiente de difusão, encolhimento, transferência de calor e massa acoplados, condições ambientes externas próximo do sólido, entre outros, tornando possível relacionar corretamente o modelo com a situação real. 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 de experimentais, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (Almeida, 2003).

A secagem diferencia-se de outras técnicas de separação, tal como desidratação osmótica, entre outras, pela maneira como a água é retirada do sólido. Na secagem, a retirada de moléculas se dá por movimentação do líquido, graças a uma diferença de pressão parcial do vapor d'água entre a superfície do produto e o ar que o envolve. Várias teorias de secagem foram propostas para descrever o transporte de massa e calor em meios capilares porosos, tais como teoria da difusão líquida, teoria da vaporização-condensação, teoria capilar, teoria de Kricher, teoria de Luikov, teoria de Philip e De Vrie, teoria de Berger e Pei, e teoria de Fortes e Okos.

O fenômeno de migração de umidade no interior do produto pode ser uma combinação de movimentos de umidade por difusão de líquido e de vapor, cada um predominando em certas etapas da secagem (Steffe e Singh, 1980).

De acordo com as teorias listadas anteriormente, os seguintes mecanismos de transporte de umidade em sólidos têm sido fornecidos pela literatura (Fortes e Okos, 1980; Strumillo e Kudra, 1986; Keey, 1992; Brooker et al., 1992 e 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 pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- transporte por efusão (escoamento Knudsen). Ocorre quando o caminho livre médio das moléculas de vapor for da mesma ordem de grandeza do diâmetro dos poros. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, liofilização;
- transporte de vapor por termofusão devido a gradientes de temperatura;
- transporte de líquido por forças capilares devido a fenômenos de capilaridade;
- transporte de líquido por pressão osmótica devido a força osmótica;
- transporte de líquido devido a gravidade;
- transporte de líquido e de vapor, devido à diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;
- transporte por difusão superficial, devido a migração da mistura líquido mais vapor pelos poros da superfície do produto.

Embora aqui não se tenha detalhado cada um dos mecanismos de transporte de umidade listados acima, informações adicionais podem ser encontradas nos trabalhos citados neste item.

Devido a complexidade e importância do processo de secagem, o desenvolvimento de modelos matemáticos para descrevê-los tem sido objeto de estudo de muitos pesquisadores por várias décadas. Dependendo da espessura da camada do material estudado, estes modelos podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos à nível de partícula) e em camada espessa (modelos à nível de secador). A importância prática da secagem em camada fina possui limitações, porque geralmente os materiais são secos em

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

Numerosos modelos de camada fina tem sido propostos para descrever a taxa de perda de umidade durante a secagem, podendo ser divididos em dois grandes grupos:

- modelos de análise concentrada;
- modelos distribuídos.

As equações de secagem em camada fina nos modelos de análise concentrada podem ser classificadas em empíricas, semi-empíricas e teóricas. Estas equações negligenciam os efeitos de variação de temperatura e umidade no interior do material, durante o processo de secagem, assumindo que o produto alcança a temperatura média do ar imediatamente, no começo do processo. No caso contrário, tem-se a classe dos modelos distribuídos.

Diversos autores consideram a difusão de água líquida como principal mecanismo de transporte de umidade em sólidos cerâmicos. Neste caso a segunda lei de Fick, tem sido muito utilizada, uma vez que estabelece a difusão de umidade em termos do gradiente de concentração no sólido, como segue:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.1)$$

onde M é o teor de umidade [$\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{MS}}$], D o coeficiente de Difusão [m^2/s], t o tempo [s].

Em geral o coeficiente de difusão D é considerado constante, ou dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do sólido. Contudo, vale salientar que a compressão mecânica reduz a porosidade e a difusividade de umidade efetiva; portanto a pressão tem efeito negativo na difusividade de água (Karathanos et al., citado por Saravacos, 1995).

A Tabela 2.4 fornece um sumário de alguns dos vários modelos paramétricos empíricos expressando a difusão de umidade como função da temperatura e/ou do teor de umidade, reportados na literatura.

O conceito de difusão líquida como único mecanismo de transporte de umidade tem sido objeto de várias críticas, apresentando constantemente discrepâncias entre os valores experimentais e teóricos. Os principais problemas podem ser atribuídos à consideração do coeficiente de difusão constante, condições de contorno inadequadas e encolhimento do material (Lima, 1999), como também o fato de que a forma do corpo e fenômeno acoplado de calor e massa não são considerados.

Tabela 2.4 - Modelos paramétricos empíricos expressando o coeficiente de difusão como função da temperatura e/ou do teor de umidade do meio poroso.

MODELO PARAMÉTRICO	EQUAÇÃO
$D(M, T) = A_0 \exp(A_1 M) \exp\left(-\frac{A_2}{T_{abs}}\right)$	(2.2)
$D(M, T) = A_0 \exp\left(-\frac{A_1}{M}\right) \exp\left(-\frac{A_2}{T_{abs}}\right)$	(2.3)
$D(M, T) = A_0 \exp\left(\sum_{i=1}^3 A_i M^i\right) \exp\left(-\frac{A_4}{T_{abs}}\right)$	(2.4)
$D(M, T) = A_0 [1 - \exp(-A_1 M)] \exp\left(-\frac{A_2}{T_{abs}}\right)$	(2.5)
$D(M, T) = A_0 [1 + \exp(A_1 - A_2 M)]^{-1} \exp\left(-\frac{A_3}{T_{abs}}\right)$	(2.6)
$D(M, T) = A_0 \exp(A_1 M) \exp\left(-\frac{A_2 M + A_3}{T_{abs}}\right)$	(2.7)
$D(M, T) = A_0 (M) \exp\left[-\frac{A_1 \exp(-A_2 M) + A_3}{T_{abs}}\right]$	(2.8)

onde A_0 , A_1 , A_2 , A_3 e A_4 são constantes empíricas e T_{abs} a temperatura absoluta [K], T a temperatura [°C].

Fonte: Zogzas e Maroulis (1996).

O encolhimento do produto durante a secagem é um fenômeno físico observável que ocorre simultaneamente com a difusão de umidade. Este efeito pode produzir uma influência considerável no coeficiente de difusão de massa, e conseqüentemente na taxa de secagem. No entanto, apesar de alguns autores não considerar o encolhimento, a teoria da difusão líquida tem ganho ao longo do tempo a preferência dos pesquisadores. Para materiais cerâmicos, podem ser citados Hasatani e Itaia (1992), Nascimento (2002), Cadê (2004), Lucena (2005), Nascimento *et al.* (2005), Batista e Nascimento (2007) e Silva (2007).

Uma outra teoria bastante citada, baseia-se na termodinâmica dos processos irreversíveis e propõe que a água se move em meios capilares porosos, em condições isotérmicas, sob a ação de um gradiente de potencial de transferência de massa. Esse potencial de transferência de massa foi proposto por Luikov por analogia com a força motriz de transferência de calor, o gradiente de temperatura (Luikov, 1966). Este autor apresentou um modelo matemático para descrever o processo de secagem de produtos capilares porosos baseado 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 em casos de intensas secagem também a pressão. Nesse mesmo sentido caminha o modelo proposto por Fortes e Okos (1980) para descrever o transporte de líquido e vapor no interior do sólido. Podem-se ser encontradas mais discussões sobre estes modelos de secagem em Alvarenga *et al.* (1980), Parry (1985), Keey (1992), Parti (1993), Lima (1999), Oliveira (2001), Oliveira e Bernils (2006), Oliveira e Lima (2009).

2.4.2 Processo de secagem da argila

A secagem é uma etapa essencial da produção cerâmica, e que necessita de uma grande quantidade de energia térmica para evaporar a água adicionada durante o processo de extrusão das peças.

A secagem seja ela natural ou artificial, requer grandes quantidades de ar para cumprir quatro funções básicas: o transporte do calor necessário à evaporação, o arraste do vapor d'água produzido, a redução da camada de vapor saturado formado na superfície da peça e o movimento de líquido e/ou vapor no interior da peça.

Sob o aspecto termodinâmico, analisa-se a influência da temperatura e 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. A pressão de saturação do vapor d'água no ar aumenta com a temperatura e, quanto mais distante da pressão de saturação estiver a pressão parcial do vapor, maior a capacidade do ar de absorver o vapor d'água evaporada das peças a secar. Portanto, a capacidade do ar em absorver vapor d'água cresce com a temperatura, de modo que quanto maior a temperatura do ar, maior a sua capacidade de secagem, fixada a umidade relativa do ar ambiente. Além disto, se o ar estiver mais quente, o volume de ar necessário à secagem diminui e, em função disto, às potências dos exaustores e circuladores de ar são reduzidas, diminuindo-se os custos de secagem. O calor contido no ar quente é utilizado para aquecimento da massa de produtos a secar, da massa estática do secador, para evaporar a água dos produtos e compensar as perdas inevitáveis em todo o sistema.

No que se refere a velocidade de secagem, está limitada pelo comportamento da porosidade da peça. Como a umidade da peça se encontra no interior de seus poros, a forma e micro-estrutura destes terão uma grande influência sobre a secagem, de modo que, mesmo sob um ambiente termodinamicamente favorável à evaporação da água, a água 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 consegue transportar 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.

O processo de secagem em geral, é dividido em quatro fases distintas: adaptação, saída da água coloidal, formação de vazios e expulsão da umidade intersticial. Na primeira fase ocorre a adaptação do produto às condições ambientais (temperatura, umidade relativa e

pressão), nas quais será efetuada a secagem. Em seguida evapora a água coloidal ocorrendo variações sensíveis das dimensões da peça devido à aproximação das partículas da sua microestrutura. Ainda nesta fase a água continuamente migra até a superfície da peça, formando constantemente uma película úmida saturada que evapora, tornando assim a velocidade de evaporação aproximadamente constante e função principalmente da porosidade da peça. Na terceira fase ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, que muda de cor. Esta diminuição da quantidade de água que se desloca por capilaridade, ou difusão, acaba por formar vazios no interior da peça e a quantidade de água evaporada decresce gradativamente, havendo uma conseqüente redução da velocidade de evaporação e de secagem. A última fase da secagem, que nem sempre é alcançada nos secadores, sendo muitas vezes executada nos próprios fornos de queima, é a de expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial, onde a velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero (Hartke, 2003).

Segundo a Arte Brasil Materiais (2006), o processo de secagem é fundamental na fabricação de peças de cerâmica. Normalmente, quando se conforma uma peça cerâmica usando massas plásticas, quer em torno ou por modelagem, e ainda por fundição, estar-se-á trabalhando com pastas e barbotinas que, habitualmente, contém entre 25 a 50% de água, no caso das barbotinas. Toda essa água deverá ser retirada da peça antes da queima. Caso contrário, a peça vai explodir dentro do forno.

Para se entender o mecanismo da secagem, precisa-se ter algum conhecimento sobre as propriedades do ar no processo, que atua como elemento condutor de calor e transportador de vapor de água produzido. Para a água se evaporar, ela consome calor para passar 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. Para a secagem continuar, precisa-se fornecer calor à peça e remover a umidade de sua volta e, quem faz isso com bastante facilidade é o ar, principalmente se ele circular, estiver aquecido e com baixa umidade relativa.

Logo após a conformação da peça cerâmica, a água que está distribuída quase que homogeneamente, entre as partículas de argila e outros componentes da massa cerâmica,

precisa ser retirada homoganeamente, já que a saída da água faz com que as partículas se aproximem, diminuindo o tamanho da peça. Se essa diminuição não for igual poderá provocar trincas ou em casos extremos a quebra da peça. A primeira água a sair da peça é aquela que se encontra na superfície ou muito próxima dela. Em seguida, a água presente no interior da peça migra até a superfície e se evapora.

Na prática, no período de secagem das peças cerâmicas as condições climáticas do local como a temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar e a ventilação têm que ser levada em consideração. Temperatura do ar de secagem elevada e umidades relativas baixas implicam numa secagem mais rápida do material. Este efeito é mais acentuado que os gerados pelas relações área/volume e teor de umidade inicial (Batista, 2006).

Na secagem de peças extrudadas há a necessidade de uma avaliação experimental das principais variáveis envolvidas no processo, que servirá como ferramenta de projetos e análises de secadores, buscando possíveis soluções para alguns problemas relacionados (Santos, 2001).

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

Na secagem de peças cerâmicas, principalmente quando extrudadas necessita-se de grande quantidade 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. Deve-se analisar a influência da temperatura e da umidade 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).

Segundo Kawaguti (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 vapor de água cresce com a temperatura. Além disto, quando o ar está mais quente diminui-se o volume de ar necessário à secagem levando a uma economia nos custos de secagem.

Nas Figuras 2.12 e 2.13 tem-se as fases de secagem de uma argila úmida em uma seção transversal à superfície, e um gráfico mostrando esse fenômeno, respectivamente. As letras da Figura 2.12 correspondem às fases da Figura 2.13. Deve-se ter cuidado ao secar peças com variação de espessura. As partes mais finas secarão mais rapidamente, diminuindo de tamanho e perdendo a plasticidade. Quando a parte mais grossa secar e diminuir de tamanho, aparecerão trincas. Isso é importante em peças torneadas de fundo grosso, em esculturas, em placas ocadas e em todas as peças que tenham espessuras variáveis.

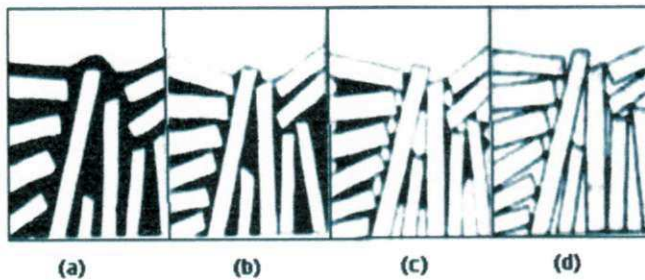


Figura 2.12 - Fases de secagem da argila. Fonte: www.b2b-bc.com.br/central/web/informa/dicas/secagem.htm.

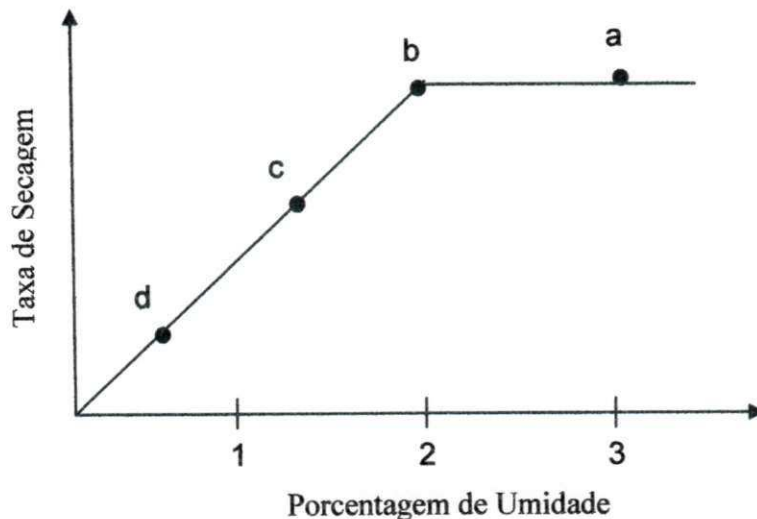


Figura 2.13 - Taxa de secagem durante as fases. Fonte: www.b2b-bc.com.br/central/web/informa/dicas/secagem.htm

Quanto maior, mais pesada e mais irregular for a peça, maiores serão as possibilidades de acontecer problemas durante a secagem. Também se deve tomar cuidado ao fazer peças que demoram vários dias para se concluir, pois a umidade da massa, que se está usando, pode variar e provocar problemas na secagem, principalmente nas emendas.

As massas chamotadas, ou com materiais que não diminuem de tamanho, como quartzo, alumina, dolomita, feldespato, etc, tem menor retração de secagem e, portanto, são mais indicadas para peças grandes, irregulares e pesadas. Além disso, todo início de secagem deve ser feito com a peça coberta por plástico, para impedir uma saída muito rápida da água que está mais próxima da superfície, causando uma retração localizada que pode originar trincas.

2.4.3 Água nos argilominerais

O conhecimento dos tipos de água presentes nos argilominerais é importante sob o ponto de vista científico, pois determinadas propriedades tais como plasticidade, resistência mecânica a úmido e a seco, retração linear e volumétrica são fortemente alteradas pela adição de água nos argilominerais. Nesse sentido para um melhor entendimento do estudo da secagem dos materiais cerâmicos, são descritos abaixo os tipos de ligações de água, geralmente contidos no interior de uma massa cerâmicos argilosa (Santos, 1989):

a) água não-combinada – é a água presente na massa de argila que não possui interação química com as partículas dos argilominerais, ou seja, não fazem parte da estrutura dos minerais de argila, não formando íons hidroxila. Neste contexto, pode-se definir seus tipos, como a água livre, que é a água em excesso presente no produto que foi conformado, ou seja, é a água presente no substrato sólido, sendo caracterizada como água interpartículas e água de poros;

b) água combinada

• água coordenada – é a água associada aos cátions presentes na massa cerâmica existindo interação entre os cátions e as moléculas de água; por exemplo, um cátion trivalente Al^{3+} forma íons hidratados $[Al(OH_2)_6]^{3+}$ com seis moléculas de água, ou seja, com número de coordenação seis;

- água adsorvida – é a água ligada à superfície externa e em volta das arestas das partículas dos argilominerais, devido a ligações quebradas;

- água zeolítica – é a água presente nos canais tubulares existentes entre as unidades estruturais fibrilares das redes cristalinas dos argilominerais sepiolita-paligorsquita, sendo uma água intercalada, muito específica. Segundo Santos (1989), não é comum existência desses argilominerais em matérias primas cerâmicas.

Estas águas podem ser eliminadas desde a temperatura ambiente até temperaturas da ordem de 110 °C (Santos, 1989).

c) água de constituição – é a água presente nos minerais de argila na forma de íons hidroxila, também chamada de água de constituição, estando contida na rede cristalina dos minerais de argila. Por exemplo, a caulinita que é um mineral de argila, possui água ligada quimicamente em sua estrutura, na forma de íons hidroxila. A água presente neste mineral só é liberada em temperaturas acima de 500 °C, provocando a decomposição deste tipo de mineral em alumina, sílica e água.

Deste modo, a retirada deste tipo de água do produto cerâmico que foi conformado, requer maiores níveis de energia do que aqueles requeridos para eliminação da água não-combinada, ou seja, é necessário o uso de temperaturas acima de 110° C.

Nesse sentido, de acordo com Bauer (1994), o tijolo comum (cerâmica vermelha estrutural), por exemplo, conserva cerca de 1 kg de água após a moldagem. Se a argila for levada ainda úmida para o forno, a umidade interior ficará retida pela crosta externa, gerando tensões internas e fendilhamento. Sendo assim, a água presente nas etapas de conformação devem ser eliminadas antes da queima, de forma lenta e cuidadosa, impedindo fraturas e trincas nas peças, que possam diminuir a sua qualidade ao final do processo (Fernandes, 1998).

Para se poder moldar a argila em pó tem-se de se adicionar água, da qual boa parte é retirada durante a secagem. Cada uma das partículas que constituem o pó do cerâmico é envolvida por uma película de água, então os materiais constituídos de partículas finas e que possuem maior superfície específica, precisam ser preparados com uma maior quantidade de água, o que possibilita altos índices de retração linear e volumétrica, e provoca o aparecimento de trincas e deformações no produto final, contribuindo para sua perda de qualidade.

As argilas muito maleáveis perdem na secagem de 5 à 8% do seu volume; os argilominerais menos maleáveis cerca de 3 à 5%, e as argilas com baixo teor de material argiloso, ainda menos, tudo depende, portanto do tamanho de grão da argila. A esmectita, uma argila muito maleável, de grão muito fino (baixa produtividade), que é geralmente utilizada em pequena percentagem para conferir uma maior maleabilidade a outras massas cerâmicas, chega a perder na secagem de 10 à 15% do seu volume quando posta para secar. Ao se acrescentar a esta, uma perda adicional sofrida durante a queima, a esmectita chega a perder de 40 à 50% do seu volume.

Segundo Santos (1989), o teor de umidade final de uma argila seca à 110°C, se situa entre 5 à 10 %. Contudo, este valor depende do tipo de argila, além de outros fatores do processo já citados no texto.

Do exposto, pode-se dizer que, quanto maior é a perda de massa e diminuição de volume durante a secagem, maior é também a tensão resultante, e no caso da secagem ser demasiadamente rápida, pode ocorrer o aparecimento de trincas e fraturas.

2.4.4 Difusão de umidade e calor em materiais cerâmicos

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, 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.

Experiências com argilas, citadas por Medeiros (1977), indicam que na secagem de várias peças de argila com fina granulometria, na temperatura ambiente, a evaporação praticamente só ocorre na superfície. Neste contexto, a teoria de difusão líquida pode ser aceita, sob adequadas condições de contorno, propriedades variáveis e ocorrência de encolhimento.

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 com forma paralelepípedica, considerando condições de contorno convectiva 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. Os resultados demonstram uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos. O efeito da temperatura no processo de deformação também foi analisado, evidenciando que maiores níveis das temperaturas, 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.

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 (Biot e Lewis). Evidenciaram também aumentos nas tensões termomecânicas com o aumento do número de Biot e encolhimento.

Su (1997), baseando-se na termodinâmica do não-equilíbrio, nas leis macroscópicas de conservação, nas relações de equilíbrio de líquido e vapor e assumindo um sistema poroso isotrópico, desenvolveu um sistema de equações não-lineares com condições de contorno convectivas, para descrever a transferência de calor e massa, durante a secagem de tijolos de argila. Nesse estudo, algumas conclusões foram obtidas: na transição do primeiro para o segundo período de taxa decrescente, acontece um relativo aumento da temperatura do sólido; no segundo período de taxa decrescente, o mecanismo dominante de transporte de umidade é o de evaporação-condensação, a porosidade decresce devido à expansão térmica e alteram-se também as propriedades elásticas do material. Os efeitos da porosidade foram significativos na pressão do poro, na distribuição de umidade e na distribuição de tensões. As máximas tensões trativas ocorreram na superfície do material e foram responsáveis pelo surgimento de trincas superficiais.

De acordo com Krause (1977), existem outros parâmetros importantes no processo de secagem além da velocidade, temperatura, umidade relativa do ar de secagem, natureza do

material cerâmico e geometria do produto, são a porosidade, retração (encolhimento) e sensibilidade à secagem.

– Porosidade e retração (encolhimento)

Segundo Elias (1995), as características de secagem dependem do argilomineral presente e de seu estado físico. Comparando duas argilas de mesma mineralogia, contrairá mais, a argila que tiver um tamanho de partícula menor. Isto é necessariamente assim porque uma maior trituração determina uma maior superfície específica e uma capacidade de adsorção de água maior. Paralelamente, uma distribuição granulométrica mais fina indica que a porosidade será mais tortuosa e angulosa. Para facilitar a secagem é preciso uma combinação de poros grandes, médios e pequenos.

Se a argila apresentar problemas de secagem deve-se recorrer à ação de redutores de plasticidade. Estes são sólidos inertes (a maioria das vezes seguem inertes durante a queima), que se misturam com as argilas para manter os caminhos de saída da água. A adição de um redutor de plasticidade a uma argila, aumenta a condutibilidade capilar e as velocidades de secagem são mais elevadas (Campregher, 2005).

A homogeneidade das partículas de uma argila, isto é, 100% das partículas com a mesma dimensão, resultará teoricamente, em um porosidade mínima em torno de 40%. Maiores quantidades de partículas finas e grossas e menores quantidades de partículas médias, favorecerão um empacotamento denso (menor porosidade) e uma resistência mecânica mais elevada, no entanto absorvem mais água, e encolhem muito mais que as de maior porosidade (Fernandes, 1998). À medida que se vai eliminando a água, vão aparecendo poros vazios. A soma do volume de poros mais o volume de argila seca equivale à dimensão final da peça.

Sabe-se que durante a secagem, dependendo do teor de umidade inicial do produto, maior encolhimento ocorrerá, portanto massas que exijam grandes quantidades de água devem ter uma secagem controlada, para evitar trincas, devido ao excessivo encolhimento (Fernandes, 1998).

Sabe-se ainda que a contração, muitas vezes, é necessária para que aconteça a desmoldagem posterior a secagem (de um molde de gesso, por exemplo), no entanto contrações excessivas, rápidas e desuniformes, provocarão trincas e fraturas.

Para produtos extrudados e moldados, o encolhimento é linear para contrações na faixa de 1,5% à 4% (Reed, 1991). A contração também depende da geometria do produto a secar, isto é, da relação área/volume. Quanto maior a superfície em relação ao seu volume mais rápido o sólido secará. A contração é menor na direção paralela à força de moldagem (extrusão, prensagem), e maior na direção perpendicular a ela (Fernandes, 1998). De acordo com a Figura 2.14, nota-se que durante a secagem, a peça diminui de volume de modo uniforme (Bouckaert, 1992), do ponto A até o ponto B (ponto de umidade crítica); deste ponto em diante não ocorrerá mais diminuição de volume e sim de massa, assim a partir deste ponto a secagem pode ser acelerada sem causar danos a peça. Estes valores dependem do tipo de material que está sendo submetido à secagem.

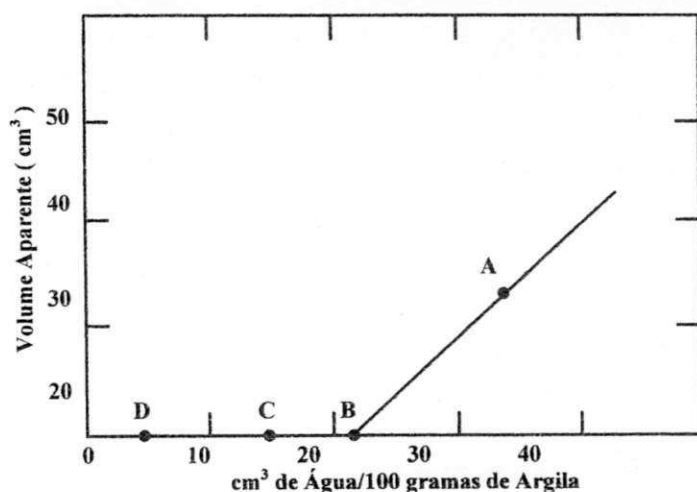


Figura 2.14 - Variação do volume aparente em função da quantidade de água contida na peça. Fonte: Bouckaert (1992).

A evolução da contração de secagem, em função da perda de umidade, é dada pela denominada curva de Bigot (Figura 2.15). A contração, dependendo do tipo de argila, pode oscilar entre 3% e 8% (Oller, 1981; Abajo, 2000).

Segundo Vieira *et al.* (2003), a adição de areia reduz a quantidade de água na massa reduzindo sua plasticidade e, conseqüentemente, a redução da retração linear dada em função do teor de umidade.

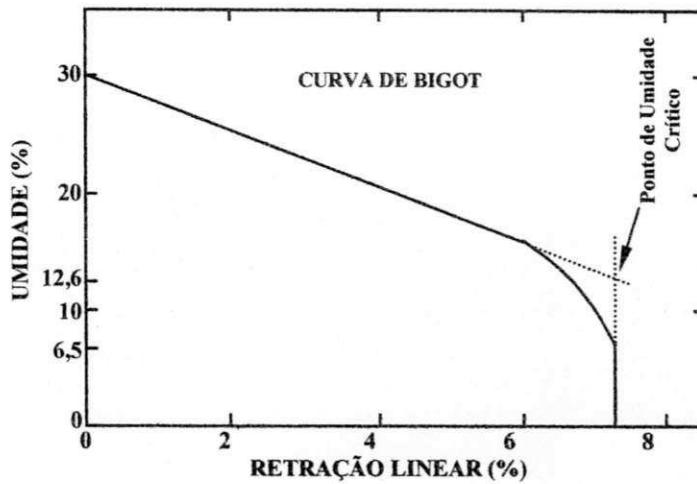


Figura 2.15 – Determinação do ponto de umidade crítica através da curva de Bigot.
Fonte: Elias (1995).

O ponto de umidade crítica não está perfeitamente definido em muitas argilas. Obviamente, quanto mais plástica a argila, maior a contração e maior o risco de que se produzam tensões que originem fissuras de secagem.

– A sensibilidade à secagem

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

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

A sensibilidade à secagem (S_s) pode ser diminuída adicionando-se à pasta determinadas matérias primas, como por exemplo, o quartzo, feldspato ou similares. Estas matérias primas, separadas por grupos, funcionam cada uma delas com um princípio físico diferente. Em se tratando de grês cerâmico, é preferível o feldspato porque a transformação alotrópica do

quartzo pode provocar rupturas durante o resfriamento. Já o hidróxido de cálcio e/ou similares, possuem ação coagulante, formando macro agrupamento de partículas. Estes materiais reduzem a microcapilaridade e facilitam a secagem. Certas matérias orgânicas como o papel de jornal, serragem, lodos de depuradoras, etc. aplicados em quantidades moderadas, exercem uma ação de ancoragem das partículas argilosas e, portanto facilitam a migração de água.

De acordo com Telljohann (2003), pode-se reduzir o gradiente de umidade, responsável pelo risco de trincas, diminuindo a velocidade de secagem. A tendência da peça trincar, também pode ser reduzida ao se aumentar o coeficiente de condutividade de umidade da peça.

Na literatura encontra-se alguns trabalhos mais recentes sobre o processo de secagem de materiais cerâmicos que são de grande importância para a compreensão dos mecanismos envolvidos e bastante relevante para a pesquisa e o desenvolvimento da produção cerâmica no país. A seguir são citados alguns desses trabalhos:

Batista e Nascimento (2005), através de um estudo experimental, apresentam a influência da temperatura e a forma do corpo na cinética de secagem de tijolos cerâmicos. No referido trabalho são apresentados resultados sobre a cinética de secagem e variações volumétricas em corpos de forma paralelepípedica através de equações que mostraram bons resultados tanto para cinética de secagem quanto para retração volumétrica.

Santana (2006) mostra resultados experimentais da análise das propriedades físico-mecânicas de placas cerâmicas, submetidas à secagem em estufas, com diferentes temperaturas (60, 80 e 110°C) e queima nas temperaturas de 900 e 950°C. O mesmo apresenta curvas da cinética de secagem e de encolhimento dos corpos de provas. Verifica-se que quanto menor a taxa de aquecimento na secagem melhor são as propriedades físico-mecânicas.

Silva (2007) apresenta resultados da cinética de secagem em peças cerâmicas em forma de tubos cilíndricos. O estudo oferece uma equação de difusão em regime transiente escrita em coordenadas generalizadas.

Nascimento *et al.* (2008) relatam a importância das análises térmicas no controle das matérias-primas. O trabalho mostra a aplicabilidade destas análises além de nomear as análises, térmica diferencial e termogravimétrica, como essencial na caracterização das matérias-primas empregadas na cerâmica. Nascimento *et al.*, (2008), também 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 para tijolos cerâmicos.

Luz *et al.* (2008) abordam a importância da caracterização da matéria-prima a fim de se obter informações sobre as propriedades de materiais argilosos para que se tenha um ótimo entendimento das suas características levando a obtenção de um produto de boa qualidade e evitando a perda de peças.

2.5 Uma abordagem sobre tensão e deformação

Devido à importância do pós-processamento (secagem e queima) na qualidade da peça cerâmica, é apresentado a seguir uma breve discussão sobre a tensão e deformação em sólidos, baseando-se no trabalho de Hibbeler (2004).

2.5.1 Tensão

Considere que a seção da área mostrada Figura 2.16 seja subdividida em áreas pequenas ΔA sombreada escuro. Quando se reduz ΔA a tamanhos cada vez menores, deve-se considerar que o material seja contínuo, isto é, possui continuidade ou distribuição uniforme da matéria, sem vazios, em vez de ser composto por um número finito de átomos ou moléculas distintos.

Além disso, o material deve ser coeso, o que significa que todas as suas partes estão muito bem unidas, em vez de ter trincas, separações ou outras falhas.

Uma força finita ΔF , atuando sobre uma área associada ΔA é mostrada na Figura 2.16. Essa força como todas as demais, tem direção única, mas para as discussões que se seguem substitui-se-a por suas três componentes, a saber ΔF_x , ΔF_y , ΔF_z , assumidas como tangente e normal a área. Da mesma forma que a área ΔA tende a zero, a força ΔF e seus componentes também tendem a zero; entretanto, a relação (divisão) entre a força e a área, em geral, tende para um limite finito. Essa relação é chamada de tensão e , como observado, descreve a intensidade da força interna sobre um plano específico (área) que passa por um determinado ponto. Pode ser de dois tipos: tensão normal e tensão de cisalhamento.

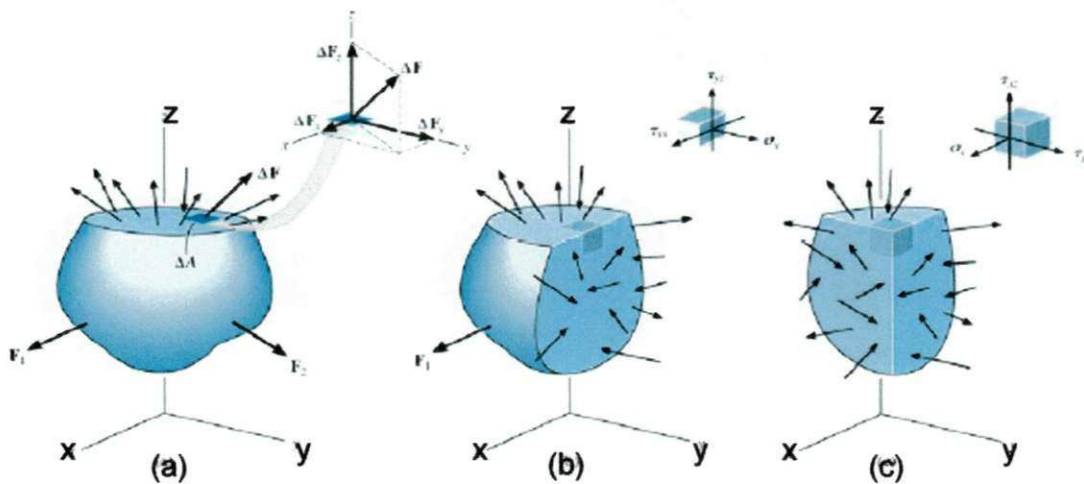


Figura 2.16 - (a) Aplicação de ΔF sobre Área ΔA ; (b) Seção do plano paralelo ao plano $x-z$; (c) Seção do plano paralelo ao plano $y-z$. Fonte: Hibbeler (2004).

a) Tensão normal

A intensidade da força, ou força por unidade de área, que atua no sentido perpendicular a ΔA , é definida como tensão normal, σ . Visto que ΔF_z na Figura 2.16a é normal a área, então:

$$\sigma_z = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_z}{\Delta A} \Rightarrow \sigma_z = \frac{dF_z}{dA} \quad (2.9)$$

Se a força normal ou tensão “puxa” o elemento de área ΔA como mostrado na Figura 2.16a, é denominada tensão de tração, ao passo que se “empurra” ΔA é chamada de tensão de compressão.

b) Tensão de Cisalhamento

A intensidade da força, ou força por unidade de área, que atua tangente a ΔA , é chamada tensão de cisalhamento, τ . As componentes de tensão são:

$$\tau_{zx} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_x}{\Delta A} \Rightarrow \tau_{zx} = \frac{dF_x}{dA} \quad (2.10)$$

$$\tau_{zy} = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_y}{\Delta A} \Rightarrow \tau_{zy} = \frac{dF_y}{dA} \quad (2.11)$$

Observa-se que o índice z em σ_z , é usado para indicar a direção que se afasta da reta normal, a qual especifica a orientação da área ΔA (Figura 2.17). São usados dois índices para as componentes τ_{zx} , τ_{zy} ; o eixo de z especifica a orientação da área, enquanto x e y referem-se às retas de direção das tensões de cisalhamento.

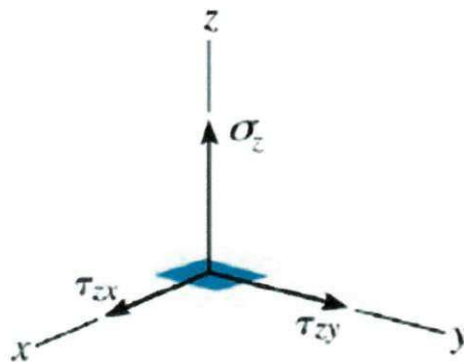


Figura 2.17 - Orientação das tensões. Fonte: Hibbeler (2004).

b) Estado geral da tensão

Se o corpo for também seccionado por planos paralelos ao plano x-z (Figura 2.16b) e ao plano y-z (Figura 2.16c), pode-se então “cortar” um elemento cúbico do volume do material. Esse elemento cúbico representa o estado de tensão que atua em torno do ponto escolhido do corpo (Figura 2.18). Esse estado de tensão é então caracterizado pelas três componentes que atuam em cada face do elemento. Essas componentes da tensão descrevem o estado de tensão no ponto apenas para o elemento orientado ao longo dos eixos x, y, z. Caso o corpo tivesse sido seccionado em um cubo com outra orientação, então o estado de tensão seria definido por meio de um conjunto diferente de componentes da tensão.

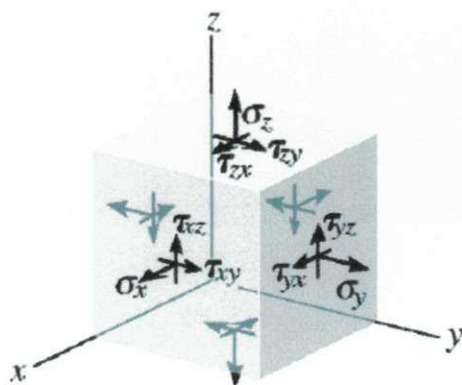


Figura 2.18 - Estado geral da tensão. Fonte: Hibbeler (2004).

2.5.2 Deformação

Quando uma força é aplicada ao corpo, tende a mudar a forma e o tamanho dele. Tais mudanças são denominadas deformações e podem ser perfeitamente visíveis ou praticamente imperceptíveis sem o uso de equipamentos para fazer medições precisas.

De uma maneira geral, a deformação do corpo não é uniforme em todo seu volume e, assim, a mudança na geometria de qualquer segmento de reta do corpo pode variar ao longo do comprimento. Por exemplo, uma parte da reta pode alongar-se, enquanto outra pode contrair-se. Entretanto, à medida que se considera segmentos de reta cada vez menores, eles

permanecem retos após a deformação e, assim, para estudar mudanças de deformações de maneira mais uniforme, considera-se as retas como muito pequenas e localizadas na vizinhança de um ponto. Desse modo, imagina-se que qualquer segmento de reta localizado em um ponto do corpo muda com valor diferente do segmento localizado em algum outro ponto. Além disso, essas mudanças também dependem da orientação do segmento de reta no ponto. Por exemplo, um segmento de reta pode alongar-se quando orientado em uma direção e contrair-se quando orientado em outra.

A fim de descrever as deformações por meio de mudanças no comprimento dos segmentos de reta e mudanças dos ângulos entre eles, desenvolve-se seu conceito. As medições de deformações são feitas, na prática, por meio de experimentos e, uma vez obtidos seus valores, é possível relacioná-los às cargas aplicadas ou as tensões que atuam no interior do corpo.

a) Deformação Normal

O alongamento ou contração de um segmento de reta por unidade de comprimento é denominado deformação normal. Para desenvolver uma definição formal de deformação normal, considera-se a reta AB, contida no interior do corpo sem deformação mostrado na Figura 2.19a. A reta localiza-se ao longo do eixo n e tem comprimento original Δs . Após a deformação, os pontos A e B são deslocados para as posições A' e B', e a reta torna-se curva, tendo comprimento de $\Delta s'$ (Figura 2.19b); a mudança de comprimento da reta é, portanto, $\Delta s' - \Delta s$. Define-se a deformação normal média usando o símbolo $\epsilon_{\text{méd}}$ e é dada por:

$$\epsilon_{\text{méd}} = \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (2.12)$$

Como o ponto B é escolhido cada vez mais próximo do ponto A, o comprimento da reta torna-se cada vez menor, de modo que $\Delta s \rightarrow 0$. Além disso, isso faz com que B' aproxime-se de A', tal que $\Delta s' \rightarrow 0$, como consequência, no limite, a deformação normal no ponto A e na direção n será dada por:

$$\varepsilon = \lim_{B \rightarrow A \text{ eixo } n} \frac{\Delta s' - \Delta s}{\Delta s} \quad (2.13)$$

Se a deformação normal for conhecida, pode-se usar a equação (2.13) para obter o comprimento final aproximado de um segmento de reta menor na direção de n depois da deformação, como segue:

$$\Delta s' \approx (1 + \varepsilon) \Delta s \quad (2.14)$$

Portanto, quando ε é positivo, a reta inicial alonga-se; ao contrário, se ε é negativo, a reta contrai-se.

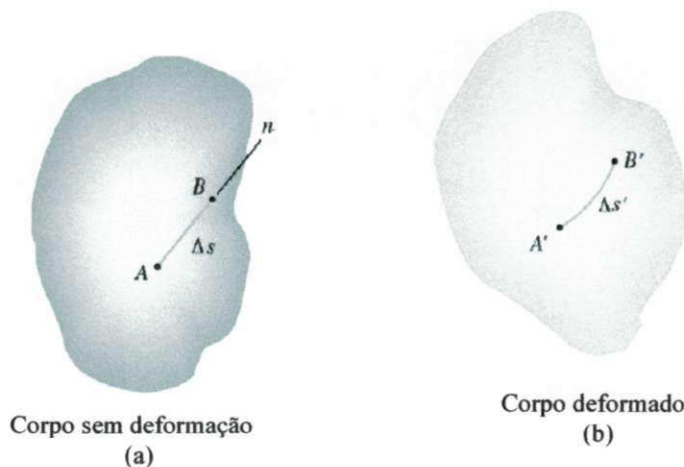


Figura 2.19 - (a) Reta AB sem deformação normal; (b) Reta AB sob deformação normal.
Fonte: Hibbeler (2004)

b) Deformação por cisalhamento

A mudança de ângulo ocorrida entre dois segmentos de retas originalmente perpendiculares entre si é denominada deformação por cisalhamento. O ângulo é designado por γ (gama) e medido em radianos (rad). Para mostrar como essa deformação ocorre, consideram-se os segmentos da reta AB e AC com origem no mesmo ponto A de um corpo e direcionados ao longo dos eixos perpendiculares n e t (Figura 2.20a). Após a deformação, as extremidades das retas são deslocadas e as próprias retas transformam-se em curvas, de modo

que o ângulo entre elas em A é θ' (Figura 2.20b). Portanto, define-se a deformação por cisalhamento no ponto associada aos eixos n e t como:

$$\gamma_m = \frac{\pi}{2} - \lim_{\substack{B \rightarrow A \text{ eixo } n \\ C \rightarrow A \text{ eixo } t}} \theta' \quad (2.15)$$

Observe que, se θ' é menor do que $\pi/2$, a deformação por cisalhamento é positiva; entretanto, se θ' é maior do que $\pi/2$, a deformação por cisalhamento é negativa.

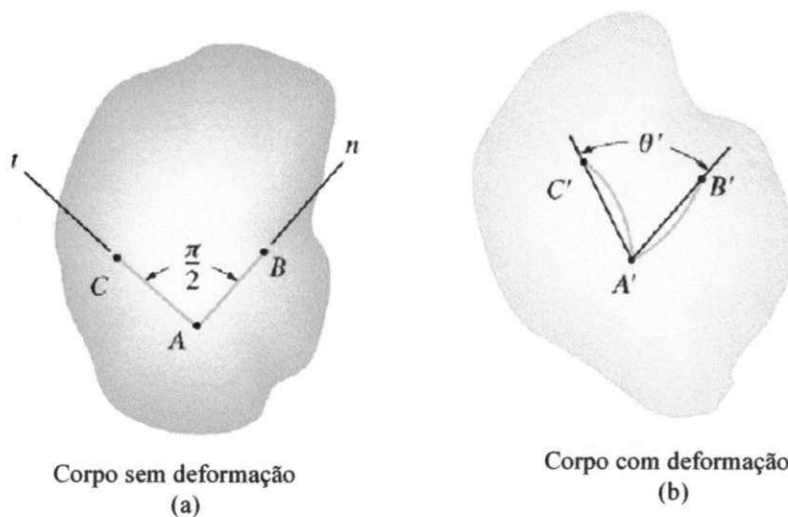


Figura 2.20 - (a) Reta AB e AC sem deformação de cisalhamento; (b) Reta AB e AC sob deformação de cisalhamento. Fonte: Hibbeler (2004).

c) Componentes cartesianas da deformação

Usando as definições anteriores de deformação normal e por cisalhamento, mostra-se agora como elas são usadas para descrever a deformação do corpo (Figura 2.21a). Imagina-se o corpo subdividido em pequenos elementos tais como mostrado na Figura 2.21b. O elemento é retangular, tem dimensões não deformadas Δx , Δy e Δz e está localizado nas vizinhanças de um ponto do corpo (Figura 2.19). Supondo que suas dimensões sejam muito pequenas, seu formato deformado será um paralelepípedo (Figura 2.20b), uma vez que segmentos de reta muito pequenos permaneceram aproximadamente retos após a deformação do corpo. Para atingir o formato deformado, deve-se considerar antes como a deformação normal muda os

comprimentos dos lados do elemento retangular e, depois como a deformação por cisalhamento muda os ângulos de cada lado. Portanto, usando a equação (2.14), em relação as retas Δx , Δy e Δz , tem-se que os comprimentos aproximados dos lados do paralelepípedo são:

$$(1 + \epsilon_x)\Delta x \quad (1 + \epsilon_y)\Delta y \quad (1 + \epsilon_z)\Delta z$$

Os ângulos aproximados entre os lados, originalmente definidos pelos lados Δx , Δy e Δz , são:

$$\frac{\pi}{2} - \gamma_{xy} \quad \frac{\pi}{2} - \gamma_{yz} \quad \frac{\pi}{2} - \gamma_{xz}$$

Observa-se, em particular, que deformações normais provocam mudança de volume do elemento retangular, enquanto deformações por cisalhamento provocam mudanças no seu formato. Naturalmente, ambos os efeitos ocorrem simultaneamente durante a deformação.

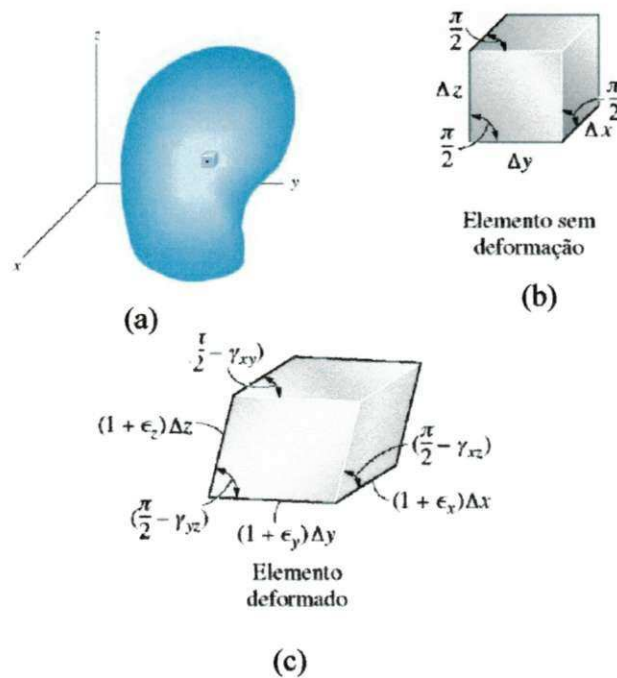


Figura 2.21 - (a) Corpo; (b) Elemento do corpo não deformado; (c) Elemento do corpo sob deformação normal e deformação por cisalhamento. Fonte: Hibbeler (2004).

Resumindo, então, o estado de deformação em um ponto do corpo requer a especificação de três deformações normais ϵ_x , ϵ_y e ϵ_z e três deformações por cisalhamento γ_{xy} , γ_{xz} e γ_{yz} . Tais

deformações descrevem completamente a deformação de um elemento de volume retangular do material localizado num ponto e orientado de modo que seus lados são originalmente paralelos aos eixos y e z . Uma vez que as deformações sejam definidas em todos os pontos do corpo, o formato deformado do corpo pode então ser descrito. Acrescente-se que, conhecendo-se o estado de deformação em um ponto, definidos por suas seis componentes, é possível determinar os componentes da deformação em um elemento orientado em qualquer outra direção.

Vale salientar que todo este estudo apresentado refere-se a tensão e deformação puramente mecânica. Quando uma peça está sendo secada geram-se deformações e tensões devido ao aquecimento e perda de água do produto, que deverão ser adicionadas às tensões oriundas de forças puramente mecânicas.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Metodologia experimental

3.1.1 Análises térmica, química e mineralógica

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

A princípio, a argila foi seca em estufa a 100°C, desintegrada manualmente, peneirada em malha ABNT n° 200 (0,074 mm) e caracterizada, em termos de composição química e mineralógica. 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.

A distribuição do tamanho de partícula foi realizado por difração à laser. A amostra foi passada em peneira ABNT n° 200 (0,074 mm) 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.



Figura 3.1 - Granulômetro a laser (CILAS 1064)

A 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°/min e passo de 0,02°. 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 termodiferenciais (ATD) e termogravimétricas (ATG) das amostras foram realizadas em equipamento BP Engenharia, Modelo RB 3000, operando a 12,5°C/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

3.1.2 Secagem em estufa

3.1.2.1 - Materiais e equipamentos usados na secagem

Os materiais utilizados para secagem em estufa foram tijolos cerâmicos vazados de forma paralelepípedica e com 8 furos retangulares com as mesmas características dos tijolos utilizados em secador industrial da Cerâmica Cincera.

Para a determinação dos parâmetros de secagem os seguintes equipamentos foram utilizados:

- a) paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm, Figura (3.3);
- b) balança digital KC-01 com divisão de 1 grama, Figura (3.4);
- c) termômetro de infravermelho com escala de -50 à 1000°C TI 890, Figura (3.5);
- d) termohigrômetro de fabricação da ICEL, mod. HT 208, Figura (3.6);
- e) escalímetro com precisão de 1 mm, Figura (3.7);

f) estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM mod. 320E com controlador digital de temperatura, Figura (3.8);

g) anemômetro de palhetas com leitura digital marca AMI 300 marca Instrutemp com precisão de leitura de $\pm 2\%$, Figura (3.9).



Figura 3.3- Paquímetro digital



Figura 3.4 - Balança digital



Figura 3.5 - Termômetro digital, modelo TI – 890

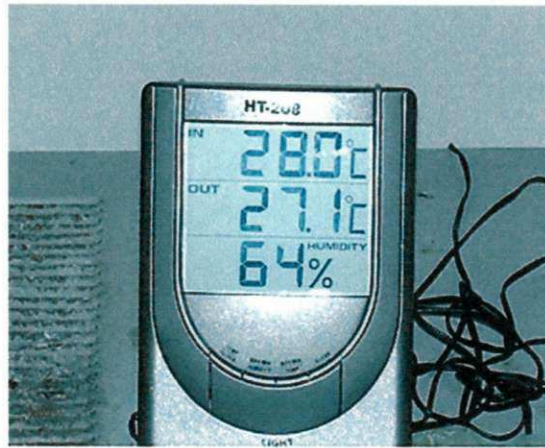


Figura 3.6 - Termohigrômetro digital

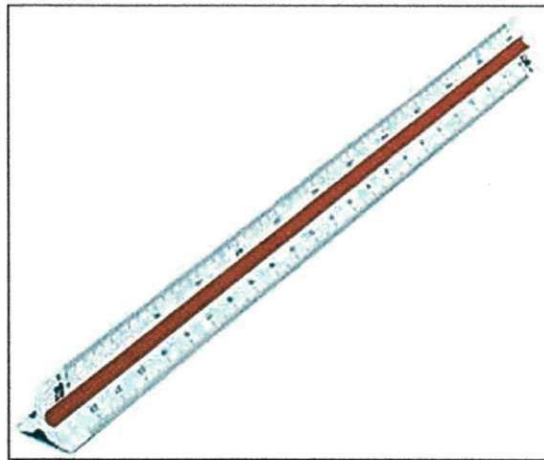


Figura 3.7 - Escalímetro



Figura 3.8 - Estufa com circulação de ar forçada



Figura 3.9 – Anemômetro de palhetas com leitura digital

3.1.2.2 - Procedimentos Experimentais

Todos os experimentos com tijolos industriais foram realizados no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande-PB.

Inicialmente foram medidas as dimensões, massa, temperatura do tijolo, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Em seguida, as amostras foram levadas ao interior da estufa onde se realizava a secagem. Nesse processo, a temperatura interna da estufa era fixada

na temperatura desejada (50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C) através do controlador de temperatura. Em intervalos pré-definidos a amostra era retirada da estufa, possibilitando a medição da temperatura, massa e dimensões da mesma. Em princípio as medições foram feitas de 10 em 10 minutos até que a massa tivesse variação mínima. Em seguida, as medições passaram ser de 30 em 30 minutos, sendo as próximas medições feitas de 60 em 60 minutos até a massa constante. Logo após, a amostra foi submetida a uma secagem por 24 horas para obtenção da massa de equilíbrio e depois por mais 24 horas para obter-se a massa de seco. Este procedimento para obtenção da massa de equilíbrio e de seco.

A Figura 3.10 ilustra o modelo do corpo de prova utilizado, bem como as posições onde foram obtidas as medidas do comprimento (R_1), da largura (R_2), da altura (R_3), das dimensões que caracterizam os furos dos tijolos, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 e da temperatura do tijolo. A Tabela (3.1) apresenta para cada experimento a denominação das amostras, suas dimensões e volume, e temperatura de secagem utilizada na estufa.

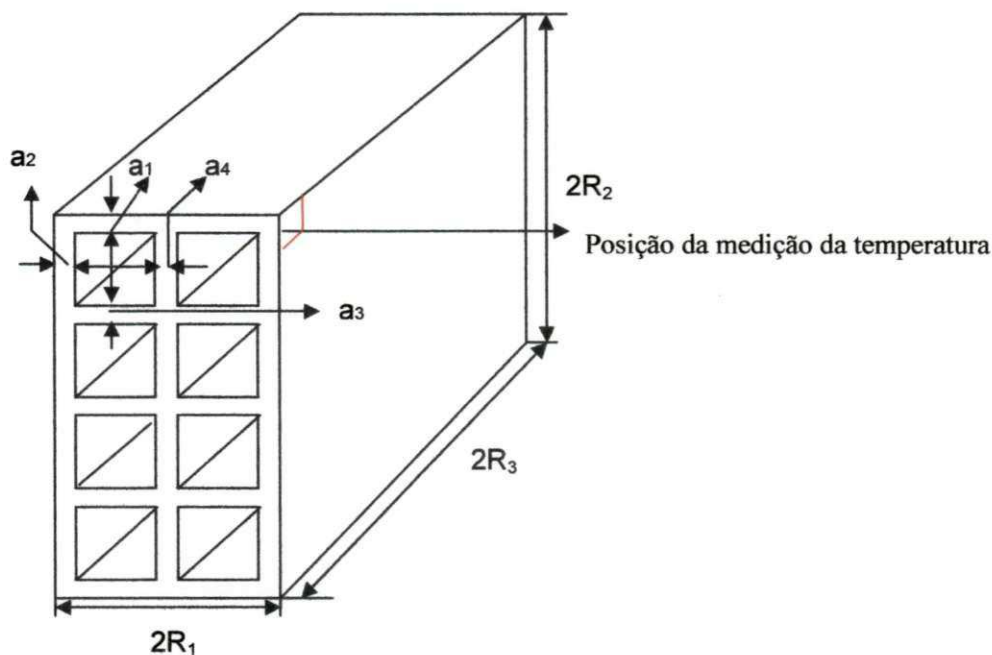


Figura 3.10 - Modelo do tijolo mostrando a largura ($2R_1$), a altura ($2R_2$), o comprimento ($2R_3$), as dimensões que caracterizam os furos, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 e local da medição da temperatura do tijolo.

Tabela 3.1 – Parâmetros experimentais do ar e dimensões dos tijolos cerâmicos vazados utilizados nos experimentos.

Teste	Ar			Tijolo vazado								
	UR (%)	T (°C)	V (m/s)	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	*V _f (mm ³)	*V (mm ³)
1	20,8	50	1,0	93,36	197	200	9,04	7,10	7,88	6,30	282843	1415644
2	13,5	60	1,0	92,75	195	200	8,34	7,32	7,11	6,45	281248	1367269
3	7,6	70	1,0	93,16	197	203	8,54	9,87	7,99	6,96	262998	1621581
4	4,6	80	1,0	92,76	197	201	8,16	7,20	7,84	6,66	283118	1408075
5	3,3	90	1,0	93,13	197	201	8,88	7,95	6,57	6,78	282377	1428652
6	1,8	100	1,0	92,8	198	202	11,7	9,41	8,74	8,0	247200	1734026

* Calculados pelas Equações (3.6) e (3.8)

3.1.2.3 - Cálculos auxiliares

Após a secagem de todas as amostras, a partir das dimensões e massa dos tijolos, foram feitos alguns cálculos auxiliares para determinação de novos parâmetros, que são de suma importância para obtenção dos resultados e discussão do trabalho em questão.

- Massa de água

O cálculo da quantidade de água em cada tijolo (m_a) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de tijolo inicial (m_o) e na massa de tijolo seco (m_s), da seguinte forma:

$$m_a = m_o - m_s \quad (3.1)$$

- Teor de umidade em base seca

O cálculo do teor de umidade de cada tijolo (M) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa de água do tijolo (m_a) e na massa do tijolo seco (m_s), da seguinte forma:

$$M = m_a/m_s \quad (3.2)$$

- Teor de umidade adimensional

O cálculo do teor de umidade adimensional de cada tijolo (M^*) e em cada tempo de medição, foi feito com base no valor do teor de umidade (M), do teor de umidade inicial (M_o) e do teor de umidade de equilíbrio (M_e), da seguinte forma:

$$M^* = (M - M_o) / (M_o - M_e) \quad (3.3)$$

- Temperatura adimensional

O cálculo temperatura adimensional de cada tijolo (θ^*) em cada tempo de medição, foi feito com base na temperatura no vértice do tijolo (θ), da temperatura inicial (θ_o) e da temperatura de equilíbrio (θ_e), da seguinte forma:

$$\theta^* = (\theta - \theta_e) / (\theta_o - \theta_e) \quad (3.4)$$

- Volume do tijolo

O cálculo do volume do tijolo (V) em cada tempo de medição, foi feito com base no valor das suas dimensões, comprimento (R_1), largura (R_2), altura (R_3) e das dimensões que caracterizam os furos dos tijolos, a_1 , a_2 , a_3 e a_4 , usando as seguintes equações:

$$V_p = 2R_1 R_2 R_3 \quad (\text{volume do tijolo incluindo os furos}) \quad (3.5)$$

$$V_f = a_v a_h R_3 \quad (\text{volume dos furos do tijolo}) \quad (3.6)$$

$$V = V_p - 8V_f \quad (\text{volume total do tijolo}) \quad (3.7)$$

onde:

$$a_v = [2R_2 - (2a_1 + 3a_3)] / 4 \quad (\text{altura de um furo}) \quad (3.8)$$

$$a_h = [2R_1 - (2a_2 + a_4)] / 2 \quad (\text{largura de um furo}) \quad (3.9)$$

3.2 Metodologia Matemática

3.2.1 Modelo para o transporte de calor e massa

O processo de difusão transiente de massa e calor em tijolos cerâmicos vazados pode ser descrito através da equação geral de difusão representando a Lei de Fick para difusão de massa e a Lei de Fourier para transferência de calor.

Para modelar o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados com oito furos, as seguintes considerações foram feitas:

- Propriedades termofísicas e mecânicas constantes;
- A água migra no interior do sólido na forma líquida e evapora na superfície;
- Geração interna de massa e de calor desprezível;
- O tijolo é constituído de água na fase líquida e matéria sólida;
- Corpo homogêneo e isotrópico;
- As variações dimensionais foram consideradas pequenas, assumindo que o material se contrai linearmente com o teor de umidade;
- As tensões no interior de tijolos são consideradas provenientes das tensões hídricas e das tensões térmicas, que surgem no tijolo devido às variações do teor de umidade e da temperatura, respectivamente;
- Condição de contorno convectiva na superfície do sólido, com teor de umidade, temperatura, dimensões do corpo e tensões internas dependendo da posição e do tempo;

- O campo do teor de umidade e temperatura no interior do corpo é uniforme no início do processo;

- Os coeficientes de transferência de massa e de calor convectivos são constantes para todas as faces do sólido.

Segundo Avelino e Lima (2007), conhecendo-se a distribuição de umidade, temperatura e tensão no interior dos tijolos, em vários instantes durante o processo de secagem, é possível evitar problemas como trincas, fraturas e deformações, oriundos das variações de temperatura e umidade dentro do produto, que acarretam fortes tensões termo-hidromecânicas internas.

Para modelar o processo de secagem, considere o problema de difusão de uma variável $\Phi = (x, y, z, t)$ em um tijolo cerâmico vazado com as dimensões $2R_1 \times 2R_2 \times 2R_3$ com oito furos, como ilustra a Figura 3.11.

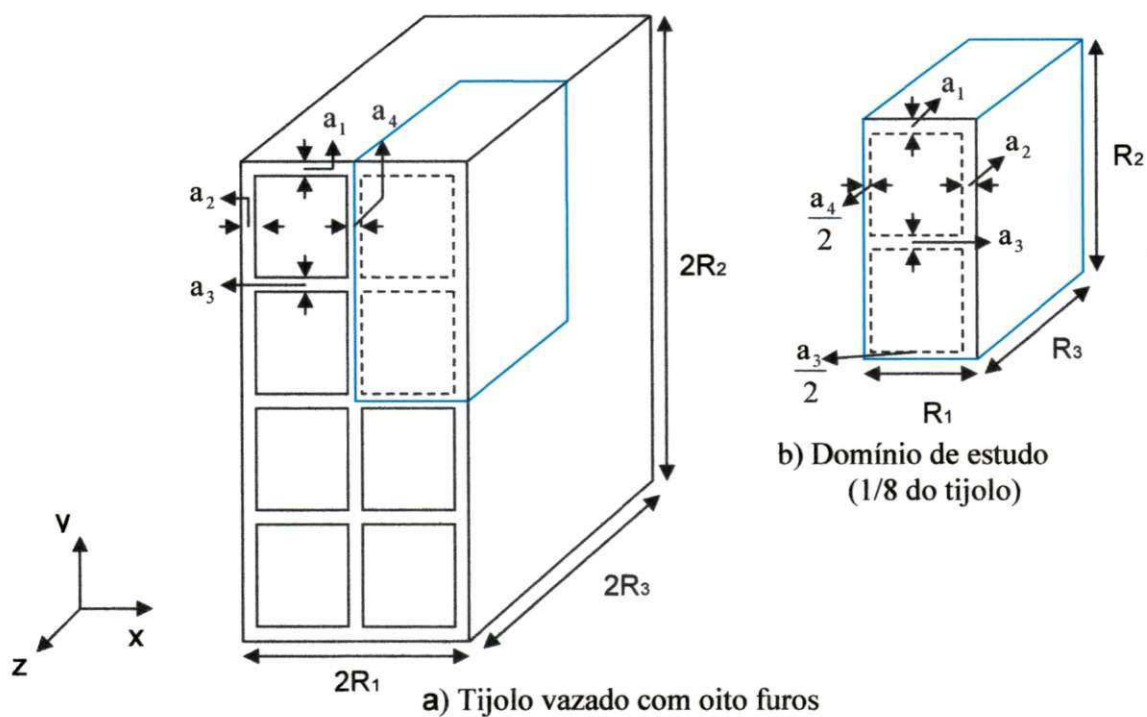


Figura 3.11- Configuração do problema físico.

A equação diferencial parcial geral, em coordenadas cartesianas e em função da variável Φ , que governa o fenômeno difusivo no interior do tijolo, é dada por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\zeta\Phi) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma\Phi\frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) \quad (3.10)$$

Desde que a Equação (3.10) é uma equação tridimensional transiente, necessita-se de, no mínimo, seis condições de contorno e uma condição inicial. Devido à simetria que existe no sólido, considera-se apenas 1/8 do seu volume. Sendo assim as condições iniciais, de simetria e de contorno são dadas por (Figura 3.12).

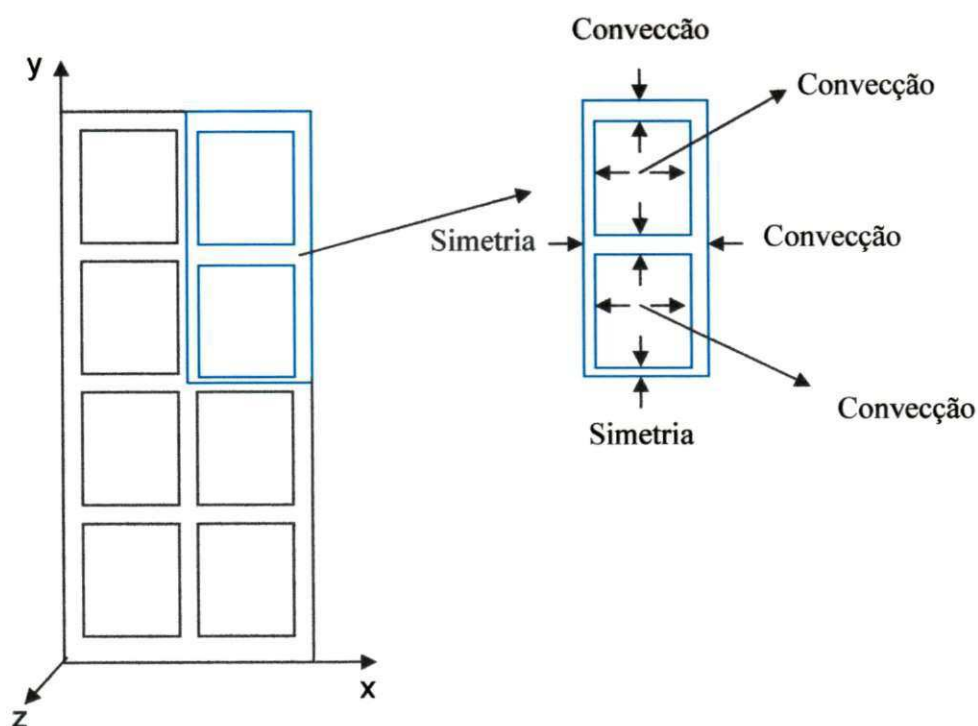


Figura 3.12 - Condições de contorno do problema físico

a) Condição inicial:

$$\Phi(x, y, z, t = 0) = \Phi_0 \quad (3.11)$$

b) Condição de simetria:

$$\frac{\partial \Phi(x = 0, y, z, t)}{\partial x} = \frac{\partial \Phi(x, y = 0, z, t)}{\partial y} = \frac{\partial \Phi(x, y, z = 0, t)}{\partial z} = 0 \quad (3.12)$$

c) Condição de contorno convectiva nas superfícies interna e externa do tijolo:

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial x} = h [\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e] \quad (3.13)$$

Nas equações apresentadas, para o caso de transferência de calor $\Gamma^\Phi = k$, $\zeta = \rho c_p$, $h = hc$ e $\Phi = \theta$ (a temperatura do sólido), enquanto que para transferência de massa, $\Gamma^\Phi = D$, $\zeta = 1$, $h = hm$ e $\Phi = M$ (o teor de umidade do sólido).

3.2.2 Modelo de retração volumétrica

Existindo a retração volumétrica, o volume do corpo é mudado a cada intervalo de tempo. Normalmente é assumido que o material se contrai linearmente com o teor de umidade. Neste trabalho, para a determinação do volume do corpo em qualquer instante, é usada a seguinte equação:

$$V_t = V_0 \left(b_1 \bar{M}^3 + b_2 \bar{M}^2 + b_3 \bar{M} + b_4 \right) \quad \text{ou} \quad \frac{V_t}{V_0} = b_1 \bar{M}^3 + b_2 \bar{M}^2 + b_3 \bar{M} + b_4 \quad (3.14)$$

onde os parâmetros b_1 , b_2 , b_3 e b_4 são obtidos a partir de ajuste da equação aos dados experimentais.

Considerando que o encolhimento é isotrópico e que a taxa de variação de $(R_1)_t$, $(R_2)_t$ e $(R_3)_t$, relacionam-se entre si, (Figura 3.13), de tal forma que as taxas de variações permaneçam constantes, pode-se mostrar que:

$$\operatorname{tg}\alpha_2 = \frac{(R_3)_t}{(R_1)_t} = \frac{(R_3)_{t=0}}{(R_1)_{t=0}} = \text{cte1} \quad (3.15)$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{(R_2)_t}{\sqrt{(R_1)_t^2 + (R_3)_t^2}} = \frac{(R_2)_{t=0}}{\sqrt{(R_1)_{t=0}^2 + (R_3)_{t=0}^2}} = \text{cte2} \quad (3.16)$$

Sabendo-se o volume do sólido em estudo e usando as Equações (3.7), (3.8) e (3.9), pode-se determinar as dimensões do sólido em qualquer instante, e assim com estes últimos resultados determina-se a área superficial e o volume do tijolo em qualquer tempo, como segue:

$$A_s = 4(R_1)(R_2) + 4(R_2)(R_3) + 4(R_1)(R_3) - 16(a_v)(a_h) + 16(a_v)(R_3) + 16(a_h)(R_3) \quad (3.17)$$

$$(V)_t = 8[(R_1)(R_2)(R_3) - 8(a_v)(a_h)(R_3)] \quad (3.18)$$

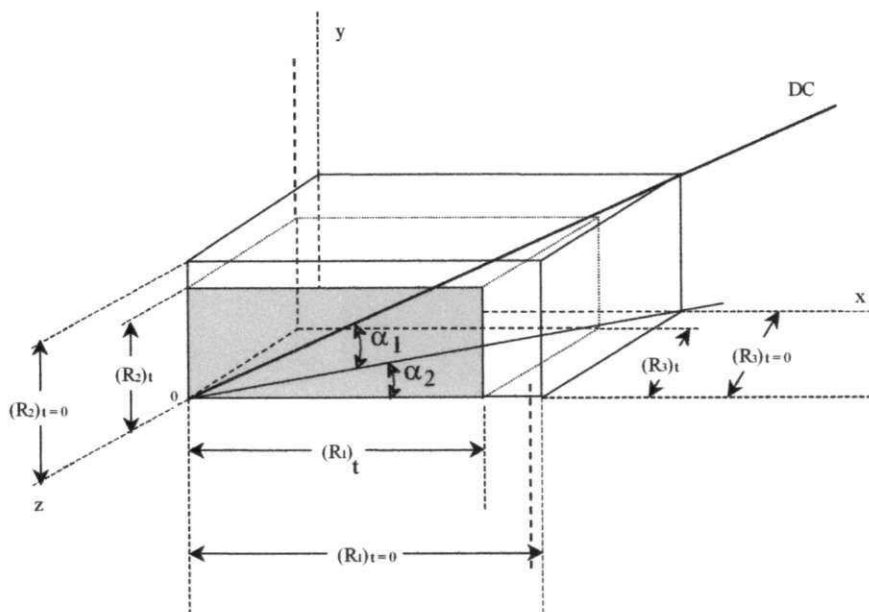


Figura 3.13 – Esquema do encolhimento volumétrico.

3.2.3 Modelo para tensões internas

A tensão no interior de tijolos durante a secagem é dado pela soma das tensões térmicas decorrentes da temperatura θ e as tensões hídricas decorrentes do teor de umidade M como segue (Keum *et al.*, 2000a; Keum *et al.*, 2000b; Keum e Oh, 2005):

$$\sigma = E(e - \bar{\gamma}\Delta\theta - \bar{\beta}\Delta M) + \sigma_0 \quad (3.19)$$

onde e é a deformação mecânica total, σ é a tensão total, σ_0 é a tensão inicial, E é o módulo de elasticidade, $\bar{\gamma}$ é o coeficiente de expansão térmica, $\Delta\theta$ é a variação de temperatura, $\bar{\beta}$ é o coeficiente de contração por umidade e ΔM é a variação do teor de umidade.

Partindo-se da teoria da elasticidade (Timoshenko e Goodier, 1980), considerou-se que:

- a) Nenhuma tensão inicial σ_0 atua no tijolo;
- b) As deformações mecânicas são desprezíveis ($\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0$);
- c) As tensões mecânicas (internas) σ_x , σ_y , e σ_z são originadas apenas pelas deformações térmicas e hídricas sofridas pelo corpo durante a secagem e encolhimento;
- d) As deformações térmicas e hídricas possuem particularmente uma natureza de dilatação (expansão ou contração) que mudam o volume dos elementos, e não causam nenhum cisalhamento, de maneira que o formato do elemento permanece inalterado;
- e) Não há tensões de cisalhamento, de forma que as tensões mecânicas σ_x , σ_y , e σ_z são as próprias tensões principais, ou seja, as máximas tensões normais em cada ponto do tijolo, (Figura 3.14).

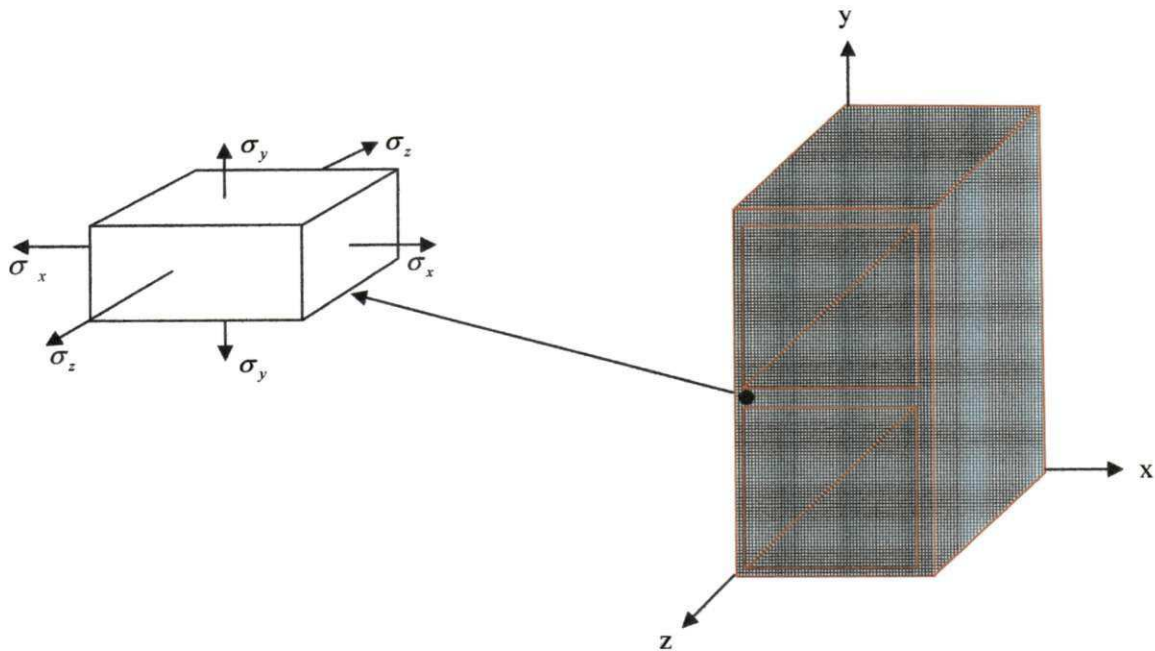


Figura 3.14 - Tensões principais σ_x , σ_y , e σ_z atuando em um ponto do tijolo.

Desta forma, usando a Equação (3.19), as tensões normais nas direções x, y e z podem ser dadas por:

$$(-\alpha_{\theta x} \Delta\theta - \alpha_{Mx} \Delta M)E = \sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z) \quad (3.20)$$

$$(-\alpha_{\theta y} \Delta\theta - \alpha_{My} \Delta M)E = \sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z) \quad (3.21)$$

$$(-\alpha_{\theta z} \Delta\theta - \alpha_{Mz} \Delta M)E = \sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad (3.22)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson, e representa a influência da deformação transversal sobre a deformação longitudinal, $\alpha_{\theta x} = \alpha_{\theta y} = \alpha_{\theta z} = \alpha_{\theta}$ é o coeficiente de dilatação térmica linear e $\alpha_{Mx} = \alpha_{My} = \alpha_{Mz} = \alpha_M$ é o coeficiente de dilatação hídrica linear.

Isolando-se σ_x na Equação (3.20) e σ_y na Equação (3.21) e combinando-as, obtém-se:

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{[(-\alpha_\theta \Delta\theta - \alpha_M \Delta M)E + \nu \sigma_z]}{1 - \nu} \quad (3.23)$$

Com isso, σ_z é facilmente encontrado substituindo σ_x e σ_y na Equação (3.22), de tal forma que:

$$\sigma_z = \frac{[2(-\alpha_\theta \Delta\theta - \alpha_M \Delta M)E]}{2\nu - 1} \quad (3.24)$$

Obtendo-se a solução numérica da equação de difusão, encontra-se o teor de umidade e temperatura para cada volume de controle e na superfície, e com isso pode-se facilmente descobrir as tensões atuante em cada volume de controle, através da Equação (3.23) e (3.24), já que estas são dependentes apenas de constantes e de $\Delta\theta$ e ΔM . Conseqüentemente, com os valores das tensões internas em todos os pontos, obtém-se a distribuição das mesmas ao longo do tijolo, podendo-se fazer uma análise criteriosa do comportamento e efeito dessas tensões. Os valores de $\Delta\theta$ e ΔM são encontrada pela diferença da variável (θ ou M) no tempo atual e um valor de referência (por exemplo, um valor inicial) de tal forma que pode-se escrever: $\Delta\theta = \theta - \theta_0$ e $\Delta M = M - M_0$.

3.2.4 Solução Numérica

3.2.4.1 Malha numérica

Para geração da malha foi usado foi usado o método dos volumes finitos, em que consiste em dividir o domínio de estudo em um número finito de subdomínios de volumes de controle, tal que há um volume de controle ao redor em cada ponto da malha.

As malhas cartesianas devido a sua simplicidade na realização dos balanços e na solução dos sistemas lineares resultantes são mais largamente utilizadas. No entanto, existem pontos negativos, principalmente na grande dificuldade para se modelar problemas com geometrias

complexas. Nestes casos, deve-se empregar uma discretização coincidente com as fronteiras, como por exemplo, um sistema de coordenadas generalizadas.

Para simular o processo de secagem de tijolos cerâmicos vazados, foi utilizada uma malha cartesiana regular, conforme mostra a Figura 3.15. O refinamento de malha e de intervalo de tempo foi apresentado em trabalhos anteriores (Nascimento, 2002; Cadé et al., 2005; Avelino e Lima, 2006).

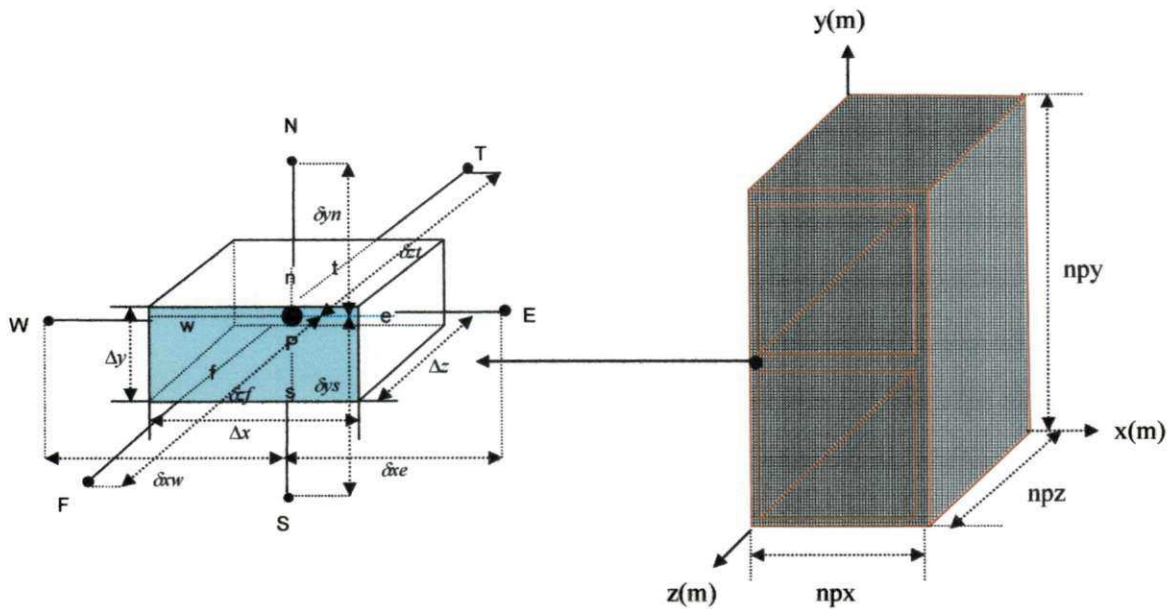


Figura 3.15 - Malha numérica utilizada para simulação.

A posição dos pontos nodais no interior do domínio foi obtida por:

$$x_i = y_j = z_k = 0 \quad \text{para } i = j = k = 1$$

$$x_i = \frac{\Delta x}{2}, \text{ para } i = 2; \quad x_i = x_{i-1} + \Delta x, \text{ para } i = 3, \dots, \text{np}x-1; \quad x_i = R_1, \text{ para } i = \text{np}x;$$

$$y_j = \frac{\Delta y}{2}, \text{ para } j = 2; \quad y_j = y_{j-1} + \Delta y, \text{ para } j = 3, \dots, \text{np}y-1; \quad y_j = R_2, \text{ para } j = \text{np}y;$$

$$z_k = \frac{\Delta z}{2}, \text{ para } k = 2; \quad z_k = z_{k-1} + \Delta z, \text{ para } k = 3, \dots, \text{np}z-1; \quad z_k = R_3, \text{ para } k = \text{np}z;$$

3.2.4.2 Discretização da equação de difusão

A discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno no volume e no tempo para cada volume de controle do domínio. O resultado é a equação discretizada contendo os valores de grandeza de interesse para um grupo de pontos da malha. A solução resultante implica que a conservação das quantidades de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente do domínio em estudo (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 1995; Maliska, 2004).

A discretização das Equações deve ser feita para uma malha de volumes que deve abranger todo o domínio de estudo.

Aplicando-se a integral em todos os termos da Equação (3.10) no volume de controle tridimensional da Figura 3.15 e no tempo, e levando em consideração que não existem geração de calor e massa no interior do corpo, tem-se:

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta \Phi) dv dt = \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dv dt + \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dv dt + \int_{v,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dv dt \quad (3.25)$$

Para o problema físico proposto têm-se apenas efeitos difusivos, então é mais simples utilizar uma função linear como função de interpolação espacial entre os pontos nodais. Assim as derivadas diretas relativas ao fluxo difusivo, referentes à Figura 3.5, são dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e &= \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\delta x_e}; & \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w &= \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\delta x_w} & \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n &= \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\delta y_n} \\ \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s &= \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\delta y_s} & \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t &= \frac{\Phi_P - \Phi_T}{\delta z_t} & \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b &= \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\delta z_b} \end{aligned}$$

Realizando-se a integração da Equação (3.25), termo a termo, e usando suas derivadas aproximadas, obtêm-se:

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta \Phi) dv dt = \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} (\zeta \Phi) dt dx dy dz = \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \left[(\zeta \Phi)^{t+\Delta t} - (\zeta \Phi)^t \right] dx dy dz =$$

$$= \left[(\zeta \Phi)^{t+\Delta t} - (\zeta \Phi)^t \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\left(\zeta_p \Phi_p \right) - \left(\zeta_p^o \Phi_p^o \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.26a)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dv dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \int_{xw}^{xe} \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dx dt dy dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) \Big|_w^e dt dy dz =$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \right) dt dy dz = \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \right) \Delta t \Delta y \Delta z =$$

$$= f \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E^o - \Phi_P^o)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P^o - \Phi_W^o)}{(\delta x)_w} \right] \Delta t \Delta y \Delta z \quad (3.26b)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dv dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \int_{ys}^{yn} \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dy dt dx dz = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) \Big|_s^n dt dx dz =$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{zt}^{zf} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \right) dt dx dz = \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \right) \Delta t \Delta x \Delta z =$$

$$= f \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta y)_s} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N^o - \Phi_P^o)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P^o - \Phi_S^o)}{(\delta y)_s} \right] \Delta t \Delta x \Delta z \quad (3.26c)$$

$$\int_{v,t} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dv dt = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \int_{zt}^{zf} \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) dz dt dx dy = \int_t^{t+\Delta t} \int_{xw}^{xe} \int_{ys}^{yn} \left(\Gamma \Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_t^f dt dx dy =$$

$$\begin{aligned}
&= \int_t^{t+\Delta t} \int_{x_w}^{x_e} \int_{y_s}^{y_n} \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t \right) dt dx dy = \left(\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t \right) \Delta t \Delta x \Delta y = \\
&= f \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] + (1-f) \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F^\circ - \Phi_P^\circ)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P^\circ - \Phi_T^\circ)}{(\delta z)_t} \right] \Delta t \Delta x \Delta y \quad (3.26d)
\end{aligned}$$

Todos os valores de Φ são avaliados como uma função linear entre os instantes anterior e atual e, portanto são parcialmente conhecidas. Estes valores são dados por: $\Phi_p = f \Phi_p + (1-f) \Phi_p^\circ$, onde f é um fator de peso, que varia entre 0 e 1.

Será usada uma formulação totalmente implícita devido ao fato desta ser incondicionalmente estável, onde todos os termos difusivos são avaliados no instante $t+\Delta t$ (Maliska, 2004), tem-se que $f = 1$, e portanto, pode-se escrever:

$$\begin{aligned}
&\left[\left(\zeta_p \Phi_p \right) - \left(\zeta_p^\circ \Phi_p^\circ \right) \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta z \Delta t + \\
&+ \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta x)_s} \right] \Delta x \Delta z \Delta t + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \Delta t \quad (3.27a)
\end{aligned}$$

ou ainda:

$$\begin{aligned}
&\frac{\left[\left(\zeta_p \Phi_p \right) - \left(\zeta_p^\circ \Phi_p^\circ \right) \right]}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_W)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta z + \\
&+ \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_S)}{(\delta x)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_T)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \quad (3.27b)
\end{aligned}$$

Reorganizando os termos que são comuns, pode-se escrever a Equação (3.27b), na forma algébrica linear discretizada, aplicada ao ponto P, como segue:

$$A_P \Phi_P = A_E \Phi_E + A_W \Phi_W + A_N \Phi_N + A_S \Phi_S + A_F \Phi_F + A_T \Phi_T + B \quad (3.28)$$

onde:

$$A_E = \Gamma_e^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e} \quad A_W = \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} \quad A_N = \Gamma_n^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n} \quad A_S = \Gamma_s^\phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s}$$

$$A_F = \Gamma_f^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_f} \quad A_T = \Gamma_t^\phi \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_t} \quad A_P^0 = \frac{\zeta_P^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \quad B = A_P^0 \Phi_P^0$$

$$A_P = A_E + A_W + A_N + A_S + A_F + A_T + \frac{\zeta_P^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t}$$

A Equação (3.28) possui importante significado físico. Os coeficientes A_E , A_W , A_N , A_S , A_T e A_F representam a condutância entre o ponto P e seus vizinhos. O termo A_P^0 representa a influência do valor da variável Φ no tempo anterior, sobre o seu valor no tempo atual. Nesta equação $\Delta V = \Delta x \Delta y \Delta z$, é o volume do elemento infinitesimal considerado na Figura 3.15.

A Equação (3.28) é aplicada em todos os pontos internos ao domínio computacional, exceto aos pontos de fronteira, onde as condições de contorno devem ser incorporadas na formulação. Neste caso usam-se os volumes adjacentes à superfície do corpo, denominados de volumes de controle de fronteira. Para tais volumes, precede-se a integração da equação de conservação, tal qual descrito anteriormente, considerando-se as condições de contorno existentes.

Como a condição de contorno usada nesta pesquisa é do tipo convectiva, a equação de difusão da variável Φ para os volumes de controle de fronteira, para o sólido considerado na Figura 3.15, são dadas, por exemplo para:

- Superfície externa (Face direita):

$$\left[\frac{(\zeta_p \Phi_p) - (\zeta_p^o \Phi_p^o)}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\Phi_x - \frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_p - \Phi_w)}{(\delta x)_w} \right] \Delta y \Delta z +$$

$$+ \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_p)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_p - \Phi_s)}{(\delta x)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_f - \Phi_p)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_p - \Phi_t)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \quad (3.29)$$

Como o sistema é tridimensional, os pontos de fronteira não possuem vizinhos posteriores, então o termo A_E na Equação (3.29) não existirá nestes pontos nodais. O mesmo é substituído pelo fluxo da variável Φ na superfície do material, como mostrado na Equação (3.39) para a face direita. Para as demais faces, superior e frontal, o procedimento é o mesmo, para obtenção das equações discretizadas.

- Superfície interna (face direita do furo)

$$\left[\frac{(\zeta_p \Phi_p) - (\zeta_p^o \Phi_p^o)}{\Delta t} \right] \Delta x \Delta y \Delta z = \left[\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_e - \Phi_p)}{(\delta x)_e} + \Phi_x \right] \Delta y \Delta z +$$

$$+ \left[\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_p)}{(\delta y)_n} - \frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_p - \Phi_s)}{(\delta x)_s} \right] \Delta x \Delta z + \left[\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_f - \Phi_p)}{(\delta z)_f} - \frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_p - \Phi_t)}{(\delta z)_t} \right] \Delta x \Delta y \quad (3.30)$$

Novamente os pontos de fronteira não possuem vizinhos, então o termo A_w não existirá nestes pontos nodais. O mesmo é substituído pelo fluxo da variável Φ na superfície do material, como mostrado na Equação (3.30). O procedimento é o mesmo para obtenção das equações discretizadas nas outras faces.

Como mencionado, as condições de contorno na superfície livre do tijolo são obtidas, assumindo que o fluxo difusivo é igual ao fluxo convectivo, na superfície do tijolo, então pode-se escrever:

a) Transferência de massa

Para transferência de massa tem-se:

$$-D \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial x} = h_m [M(x, y, z, t) - M_e] \text{ em } t > 0, \quad (3.31a)$$

válido para:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Face A: } x = \frac{a_2}{2}, \left(\frac{a_1}{2} + \ell_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + a_3 + 2\ell_y\right) \\ \text{Face C: } x = R_1 - a_4, \left(\frac{a_1}{2} + \ell_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + a_3 + 2\ell_y\right) \\ \text{Face J: } x = R_1, 0 \leq y \leq R_2 \\ \text{Face E: } x = \frac{a_2}{2}, \left(\frac{a_1}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + \ell_y\right) \\ \text{Face G: } x = R_1 - a_4, \left(\frac{a_1}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + \ell_y\right) \end{array} \right.$$

$$-D \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial y} = h_m [M(x, y, z, t) - M_e] \text{ em } t > 0, \quad (3.31b)$$

válido para:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Face B: } y = R_2 - a_1, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + \ell_x\right) \\ \text{Face D: } y = \frac{a_1}{2} + \ell_y + a_3, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + \ell_x\right) \\ \text{Face F: } y = \frac{a_1}{2} + \ell_y, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + \ell_x\right) \\ \text{Face H: } y = \frac{a_1}{2}, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + \ell_x\right) \\ \text{Face I: } y = R_2, 0 \leq x \leq R_1 \end{array} \right.$$

$$-D \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial z} = h_m [M(x, y, z, t) - M_e] \text{ para } t > 0, z = R_3 \quad (3.31c)$$

b) Transferência de calor

Para transferência de calor tem-se:

$$-k \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial x} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_e] \text{ em } t > 0, \quad (3.31d)$$

válido para:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Face A: } x = \frac{a_2}{2}, \left(\frac{a_1}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + a_3 + 2l_y\right) \\ \text{Face C: } x = R_1 - a_4, \left(\frac{a_1}{2} + l_y + a_3\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + a_3 + 2l_y\right) \\ \text{Face J: } x = R_1, 0 \leq y \leq R_2 \\ \text{Face E: } x = \frac{a_2}{2}, \left(\frac{a_1}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + l_y\right) \\ \text{Face G: } x = R_1 - a_4, \left(\frac{a_1}{2}\right) \leq y \leq \left(\frac{a_1}{2} + l_y\right) \end{array} \right.$$

$$-k \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial y} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_e] \text{ em } t > 0, \quad (3.31e)$$

válido para:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Face B: } y = R_2 - a_1, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + l_x\right) \\ \text{Face D: } y = \frac{a_1}{2} + l_y + a_3, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + l_x\right) \\ \text{Face F: } y = \frac{a_1}{2} + l_y, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + l_x\right) \\ \text{Face H: } y = \frac{a_1}{2}, \left(\frac{a_2}{2}\right) \leq x \leq \left(\frac{a_2}{2} + l_x\right) \\ \text{Face I: } y = R_2, 0 \leq x \leq R_1 \end{array} \right.$$

$$-k \frac{\partial \Phi(x, y, z, t)}{\partial z} = h_c [\theta(x, y, z, t) - \theta_e] \text{ em } t > 0, z = R_3 \quad (3.31f)$$

Considerando a face x (superfície externa) como referência, tem-se que:

$$\underset{\text{I}}{\Phi_x''} = \underset{\text{II}}{h[\Phi(x, y, z, t) - \Phi_e]} = -\underset{\text{III}}{\Gamma_e^\Phi} \left(\frac{\Phi(x, y, z, t) - \Phi_p}{(\delta x)_e} \right) \quad (3.32)$$

Então, igualando os termos II e III, isolando-se Φ , e substituindo na equação II, tem-se que :

$$\Phi_x'' = \frac{\Phi_p - \Phi_e}{\left(\frac{1}{h} + \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\Phi} \right)} \quad (3.33a)$$

Para a transferência de massa, pode-se escrever:

$$M_x'' = \frac{M_p - M_e}{\left(\frac{1}{h_m} + \frac{\delta x_e}{D_e} \right)} \quad (3.33b)$$

Para a transferência de calor, pode-se escrever:

$$\theta_x'' = \frac{\theta_p - \theta_e}{\left(\frac{1}{h_c} + \frac{\delta x_e}{k_e} \right)} \quad (3.33c)$$

É importante conhecer também o teor de umidade e temperatura média do sólido em qualquer instante do processo. Estas grandezas são obtida a partir da seguinte equação:

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{V} \int_V \Phi dV \quad (3.34)$$

onde V é o volume do sólido em estudo.

Então substituindo a Equação (3.33a) na Equação (3.29) por exemplo, aplicada a face do sólido, rearranjando os termos, tem-se a Equação de difusão, na sua forma discretizada, sendo o coeficiente A_T e A_p^0 iguais aos apresentados para a Equação (3.28). Procedendo-se igual para as demais faces, pode-se escrever, por exemplo:

a) Nas superfícies externas do tijolo:

$$A_E = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face direita (leste)} \\ \Gamma_e^\Phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_e} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35a)$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face superior (norte)} \\ \Gamma_n^\Phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35b)$$

$$A_F = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face frontal} \\ \Gamma_f^\Phi \frac{\Delta x \Delta y}{\delta z_f} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35c)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_x} + \frac{\delta x_e}{\Gamma_e^\phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } x = R_1 \end{cases}$$

(3.35d)

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{\delta y_n}{\Gamma_n^\phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } y = R_2 \end{cases} \quad (3.35e)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta y}{\frac{1}{h_z} + \frac{\delta z_f}{\Gamma_f^\phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } z = R_3 \end{cases} \quad (3.35f)$$

A quantidade \overline{SM} é o termo fonte associado aos termos convectivos nas superfícies do sólido e que é adicionado aos pontos nodais que precedem as fronteiras externa e interna do mesmo.

b) Nas superfícies internas do tijolo, tem-se:

$$A_w = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face esquerda (oeste)} \\ \Gamma_w^\phi \frac{\Delta y \Delta z}{\delta x_w} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35g)$$

$$A_N = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face inferior do furo} \\ \Gamma_n^\Phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_n} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35h)$$

$$A_S = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos de fronteira da face superior do furo} \\ \Gamma_s^\Phi \frac{\Delta x \Delta z}{\delta y_s} & \text{para os demais pontos internos} \end{cases} \quad (3.35i)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta y \Delta z}{\frac{1}{h_x} + \frac{\delta x_w}{\Gamma_w^\Phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } x = R_1 \text{ (esquerdo do furo)} \end{cases} \quad (3.35j)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{\delta y_n}{\Gamma_n^\Phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } y = R_2 \text{ (superior do furo)} \end{cases} \quad (3.35l)$$

$$\overline{SM} = \begin{cases} 0 & \text{para os pontos internos} \\ \left(\frac{\Delta x \Delta z}{\frac{1}{h_y} + \frac{\delta y_s}{\Gamma_s^\Phi}} \right) & \text{para os pontos do plano } y = R_2 \text{ (inferior do furo)} \end{cases} \quad (3.35m)$$

$$A_P = \sum A_K + A_P^0 + \overline{SM} \quad (3.35n)$$

3.2.4.3 Software computacional

Para resolver o sistema de equações gerado pela Equação (3.10), um programa computacional, desenvolvido por Nascimento (2002) utilizando o software Mathematica, foi adaptado para este trabalho. Nele, o sistema de equações lineares são resolvidas iterativamente usando o método de Gauss-Seidel.

Assumiu-se que a solução numérica convergiu quando, partindo de uma condição inicial, o seguinte critério foi satisfeito, em cada ponto do domínio computacional, num certo instante de tempo:

$$|\Phi^{n+1} - \Phi^n| \leq 10^{-8} \quad (3.36)$$

Os pontos de simetria não entram no conjunto de equações a serem resolvidos. Após o sistema de equações ter sido resolvido, sua estimativa é feita. Assim, assume-se que o fluxo de Φ (transferência de massa ou calor) que sai do ponto adjacente ao ponto de simetria é igual ao fluxo de Φ que chega neste ponto. Então pode-se escrever:

a) Para os pontos situados no plano ($x = 0, y, z$), ($0 \leq z \leq R_3$), ($0 \leq y \leq R_2$)

$$-\Gamma_w^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w = -\Gamma_e^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \quad (3.37)$$

Na forma discretizada, têm-se:

$$-\frac{\Gamma_w^\Phi (\Phi_P - \Phi_w)}{(\delta x)_t} = -\frac{\Gamma_e^\Phi (\Phi_E - \Phi_P)}{(\delta x)_e} \quad (3.38)$$

ou ainda:

$$\Phi_w = \left(\frac{\Gamma_e^\Phi (\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi (\delta x)_e} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_e^\Phi (\delta x)_w}{\Gamma_w^\Phi (\delta x)_e} \Phi_E \quad (3.39)$$

b) Para os pontos situados no plano $(x, y, z = 0)$, $(0 \leq y \leq R_2)$ e $(0 \leq x \leq R_1)$

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_t = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \quad (3.40)$$

Na forma discretizada:

$$-\frac{\Gamma_t^\Phi (\Phi_P - \Phi_t)}{(\delta z)_t} = -\frac{\Gamma_f^\Phi (\Phi_F - \Phi_P)}{(\delta z)_f} \quad (3.41)$$

ou ainda

$$\Phi_t = \left(\frac{\Gamma_f^\Phi (\delta z)_t}{\Gamma_t^\Phi (\delta z)_f} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_f^\Phi (\delta z)_t}{\Gamma_t^\Phi (\delta z)_f} \Phi_F \quad (3.42)$$

c) Para os pontos situados no plano $(x, y = 0, z)$, $(0 \leq x \leq R_1)$ e $(0 \leq z \leq R_3)$

$$-\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s = -\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \quad (3.43)$$

Discretizando obtêm-se:

$$-\frac{\Gamma_s^\Phi (\Phi_P - \Phi_s)}{(\delta y)_s} = -\frac{\Gamma_n^\Phi (\Phi_N - \Phi_P)}{(\delta y)_n} \quad (3.44)$$

$$\Phi_s = \left(\frac{\Gamma_n^\phi (\delta y)_s}{\Gamma_s^\phi (\delta y)_n} + 1 \right) \Phi_P - \frac{\Gamma_n^\phi (\delta y)_s}{\Gamma_s^\phi (\delta y)_n} \Phi_N \quad (3.45)$$

Para os pontos situados na superfície do material, após a discretização da equação da condição de contorno na superfície, o valor da variável de interesse pode ser calculado por:

a) Nas superfícies externas, tem-se:

$$\Phi_e = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta x)_e}{\Gamma_e^\phi}} \quad (3.46)$$

$$\Phi_n = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\phi}} \quad (3.47)$$

$$\Phi_f = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta z)_f}{\Gamma_f^\phi}} \quad (3.48)$$

b) Nas superfícies internas, tem-se:

$$\Phi_w = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta x)_w}{\Gamma_w^\phi}} \quad (3.49)$$

$$\Phi_n = \frac{\Phi_P}{1 + h \frac{(\delta y)_n}{\Gamma_n^\phi}} \quad (3.50)$$

$$\Phi_s = \frac{\Phi_p}{1 + h \frac{(\delta y)_s}{\Gamma_s^\Phi}} \quad (3.51)$$

Estas equações não entram no sistema de equações a ser resolvido, servindo apenas para determinar o valor de Φ na superfície do sólido em estudo, uma vez conhecido o seu valor nos pontos de fronteira. Além disso, as mesmas foram introduzidas para calor e massa fazendo nas variáveis as devidas alterações que neste trabalho já foram citadas.

3.3 Tratamento estatístico dos dados

A partir dos dados obtidos do teor de umidade ao longo do processo de secagem, foi possível verificar que no período inicial, as taxas de perda de umidade são mais elevadas, requerendo do pesquisador a leitura destes dados em intervalos de tempo menores, podendo ser ampliado, à medida que o processo foi se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. É estatisticamente mais adequado realizar o ajuste de parâmetros a partir de uma distribuição uniforme de pontos ao longo do processo. Desta forma, propõe-se um ajuste destes dados experimentais a uma equação exponencial a 2 termos e 4 parâmetros. A equação tem a forma:

$$\bar{M} = c_1 \exp(k_1 t) + c_2 \exp(k_2 t) \quad (3.52)$$

onde t é dado em minutos. A estimativa dos parâmetros c_1 , c_2 , k_1 e k_2 da Equação (3.52) foi realizada utilizando os métodos numéricos de Rosembrock e quasi-Newton empregando o Software Statistica[®], com critério de convergência de 0,001. Similarmente foram obtidos os coeficientes da Equação (3.14).

A escolha da forma desta equação foi baseada nos trabalhos de Lima (1995), Lima e Mata (1996), Nascimento (2002) onde verificaram que equações exponenciais com maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais.

Com a equação ajustada, estabeleceram-se instantes de “tomada de dados” ao longo do processo em que o teor de umidade médio pudesse ser determinado, de forma que a distribuição destes pontos ficasse aproximadamente uniforme. Posteriormente, estas equações foram utilizadas no programa computacional, para ajustar os coeficientes de difusão efetivo e convectivo de transferência de massa para o tijolo.

Os desvios entre os valores experimentais e calculados e a variância foram obtidos como segue:

$$ERMQ = \sum_{i=1}^n (\Phi_{i,Num}^* - \Phi_{i,Exp}^*)^2 \quad (3.53)$$

$$\bar{S}^2 = \frac{ERMQ}{(n - \hat{n})} \quad (3.54)$$

onde n é o número de pontos experimentais e \hat{n} o número de parâmetros ajustados (número de graus de liberdade), (Figliola e Beasley, 1995).

Os menores valores de ERMQ e \bar{S}^2 obtidos durante a comparação foram usados para obter os melhores valores do coeficiente de difusão D e α , e os coeficientes de transferência de massa h_m na superfície do sólido. No caso da estimativa de D e h_m , Φ foi substituído por M , enquanto que para estimar α , Φ foi substituído pela temperatura (θ) na superfície do produto.

O coeficiente de transferência de calor convectivo foi obtido usando as correlações de Reynolds e Nusselt (Incropera e De Witt, 2002), aplicado a uma placa plana como segue:

$$Re = \frac{\rho v R_3}{\mu} \quad (\text{com intervalo de validade } 5.10^5 < Re \leq 10^8) \quad (3.55)$$

$$\bar{Nu} = 0,664Re^{1/2}Pr^{1/3} \quad (3.56)$$

Em que:

$$\bar{h}_c = \frac{\bar{Nu}k}{R_3} \quad (3.57)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimental

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 massa cerâmica utilizada nesta pesquisa.

4.1.1.1 Análise química

A Tabela 4.1 mostra a composição química da massa cerâmica utilizada na confecção dos tijolos estudados oriundos da indústria Cerâmica Cincera. Analisando os resultados, verifica-se que a argila estudada apresenta teor de sílica (SiO_2) superior à 57% e teor de alumina (Al_2O_3) superior a 24%. A essa grande quantidade de sílica presente na argila, pode-se afirmar que a matéria-prima tem grande quantidade de material não plástico, elevando a porosidade do tijolo e conseqüentemente diminuindo o tempo de secagem e a retração volumétrica.

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

Substâncias	Porcentagem
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) podem atuar 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.

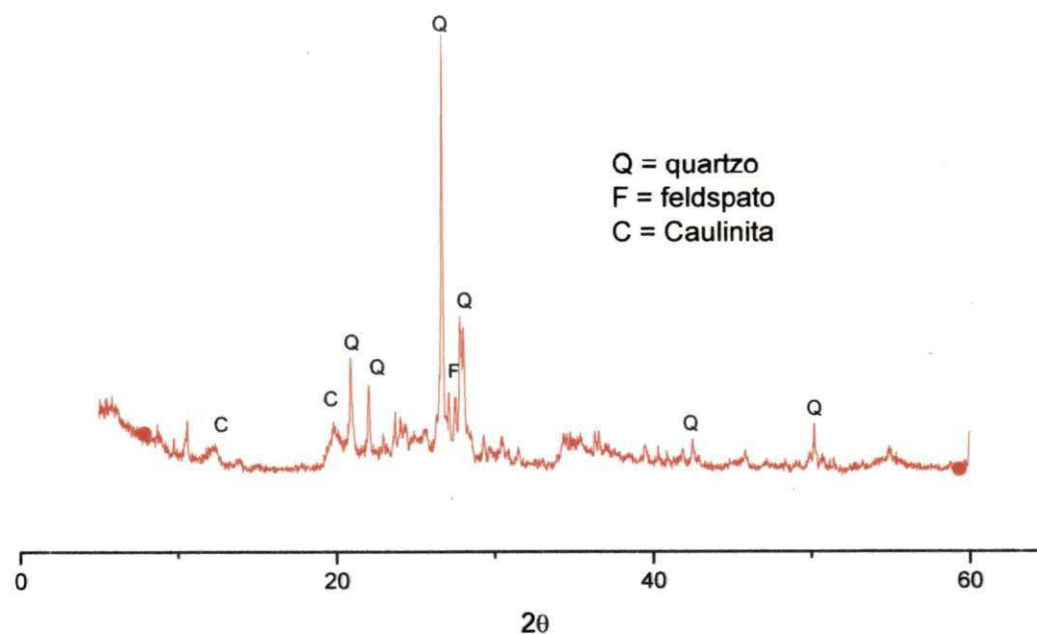


Figura 4.1 – Análise mineralógica da amostra estudada via difratograma de Raios X

4.1.1.3 Análise granulométrica

Está representada na Tabela 4.2 os valores da 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 (aproximadamente 87%) e fração de argila de 12,96% e diâmetro médio de 17,33 μm .

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

Está representada na Figura 4.2 a curva de distribuição de tamanho da partícula da argila. Observa-se, através da distribuição granulométrica, uma grande concentração de partículas em torno dos 10 – 100 μm . O gráfico apresenta um tamanho médio de 17,33 μm e D10, D50 e D90 de 1,55, 11,23 e 42,92 μm , respectivamente.

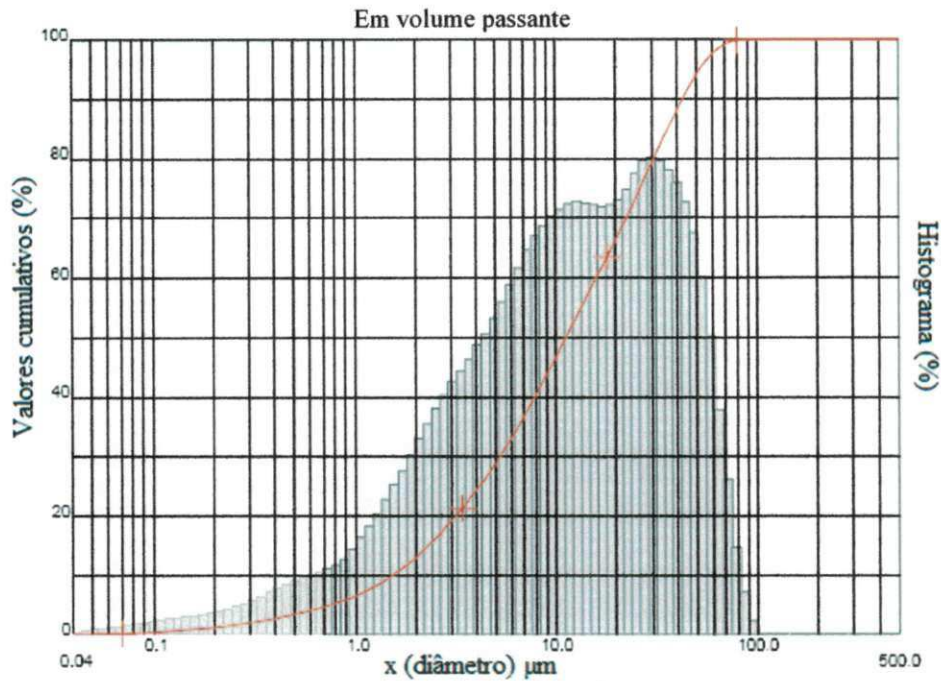


Figura 4.2 – Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila

4.1.1.4 Análise térmica e gravimétrica

A Figura 4.3 mostra as curvas termodiferencial e gravimétrica da argila estudada. Analisando a curva térmica diferencial (TD), verifica-se um pico endotérmico à 140°C, caracterizado pela perda de água livre; uma banda exotérmica entre 200 e 480°C, caracterizado pela perda de matéria orgânica; um pico endotérmico à 570°C caracterizado pela presença de hidroxila; à 900°C verifica-se um pico exotérmico correspondente a nucleação da mulita.

Em relação à curva térmica gravimétrica (TG), verifica-se uma perda de massa em torno de 5%, correspondente a água livre, à uma temperatura entre 80 e 180°C; cerca de 10% de

matéria orgânica, à uma temperatura entre 180 e 540°C e perda de 10% de hidroxila, aproximadamente, à uma temperatura acima de 540°C.

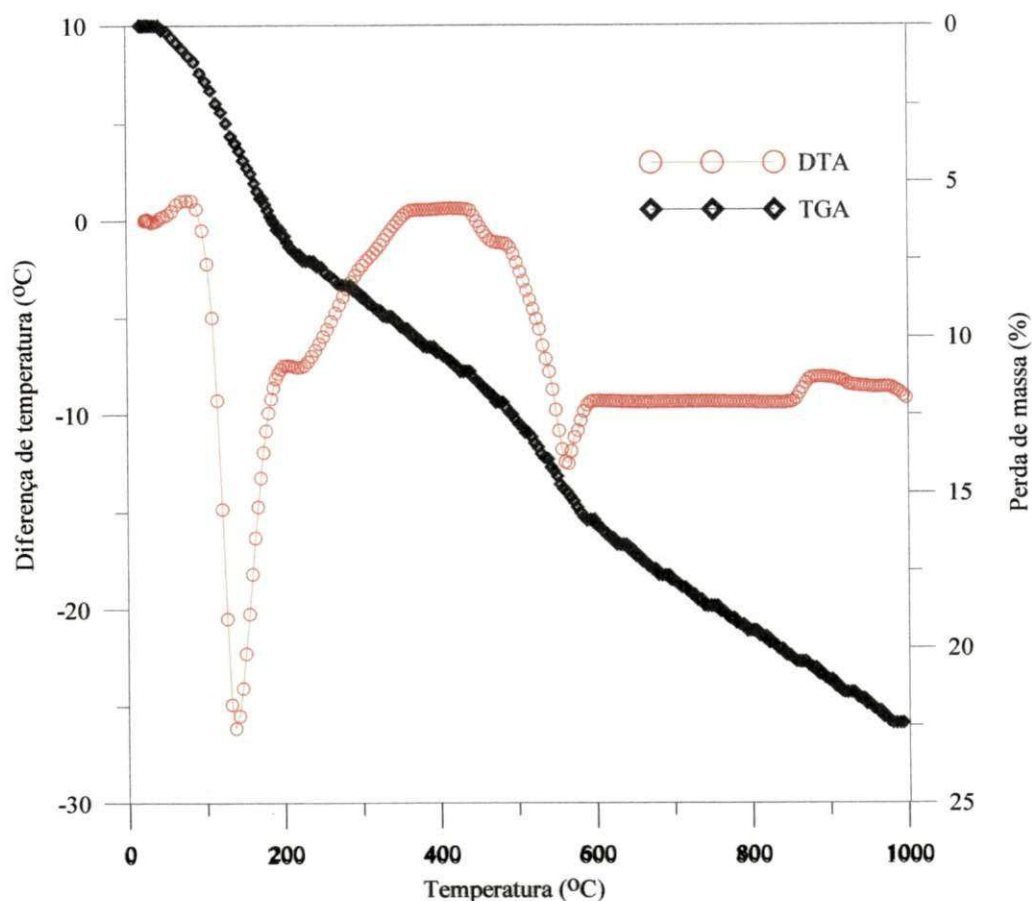


Figura 4.3 - Curva termogravimétrica (TGA) e termodiferencial (DTA) da matéria-prima

4.1.2 Secagem do tijolo

Nos experimentos foram utilizadas diversas temperaturas e umidades relativas no ambiente de secagem da estufa conforme ilustram as Tabelas 3.1 e 4.3 com o objetivo de analisar os efeitos das condições do ar de secagem na remoção de umidade do tijolo cerâmico vazado.

Tabela 4.3 – Parâmetros experimentais do ar e tijolo para cada teste de secagem

Teste	Ar			Tijolo					t (h)
	T (°C)	UR (%)	V (m/s)	M ₀ (b.s)	M _f (b.s)	M _e (b.s)	θ ₀ (°C)	θ _f (°C)	
1	50	80	0,05	0,13969	0,0	0,00011	20,6	41,0	18,5
2	60	79	0,06	0,14795	0,0	0,00268	20,5	50,2	13,7
3	70	69	0,07	0,15414	0,0	0,00076	26,0	64,5	17,8
4	80	66	0,08	0,15248	0,0	0,00039	21,4	69,2	15,0
5	90	68	0,09	0,15921	0,0	0,00151	21,0	78,5	11,5
6	100	52	0,10	0,16903	0,0	0,00038	26,1	93,2	12,3

Nas Tabelas A₁–A₆, do Apêndice, encontram-se todos os dados obtidos experimentalmente. A diferença entre a temperatura ajustada na estufa e a temperatura final do tijolo é devido a posição do tijolo dentro da estufa.

O tijolo que apresenta menor teor de umidade inicial, e maiores relações área/volume, tem uma secagem mais rápida. O aumento da temperatura e a diminuição da umidade relativa do ar de secagem aumenta a taxa de secagem e o tijolo alcança mais depressa a temperatura e sua umidade de equilíbrio. Esta situação pode causar danos ao tijolo, interferindo na sua qualidade. Não são recomendados altos gradientes térmicos ao longo do tijolo porque isto produz uma secagem não uniforme e grandes tensões térmica, hídrica e mecânica no tijolo, o que pode causar rachaduras, fissuras, deformação no sólido, comprometendo sua qualidade no fim do processo de secagem. Uma secagem prévia, 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.

Durante a secagem geram-se, tensões de sentido contrário entre a camada externa e a interna do sólido, e quanto maior a perda de água, maior também será a tensão resultante, fazendo o material deformar-se e inclusive com possibilidade de trincar. 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.

As Figuras 4.4 à 4.9, que mostram o comportamento da evolução do teor de umidade e temperatura média adimensional em função do tempo quando o tijolo está sendo seco à temperatura de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C, respectivamente. Nos primeiros 400 minutos, Figuras 4.4 à 4.6, há uma variação no teor de umidade e temperatura um pouco mais lento se comparadas com os das Figuras 4.7 à 4.9, já que as maiores variações estão nos primeiros 200 minutos. Após este períodos verifica-se uma variação praticamente constante em todas as figuras

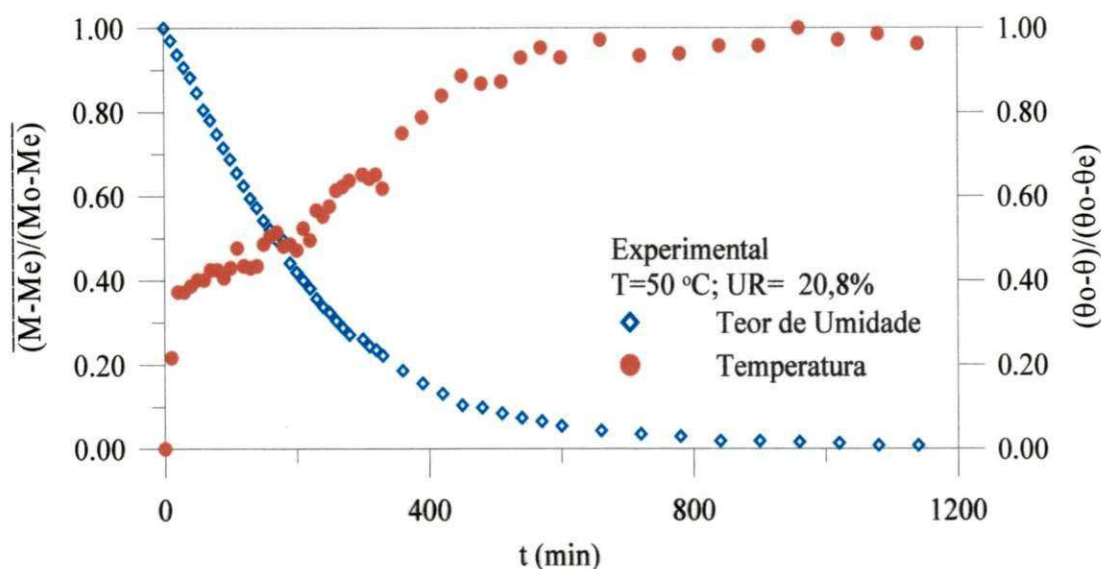


Figura 4.4 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 50°C e UR 20,8%.

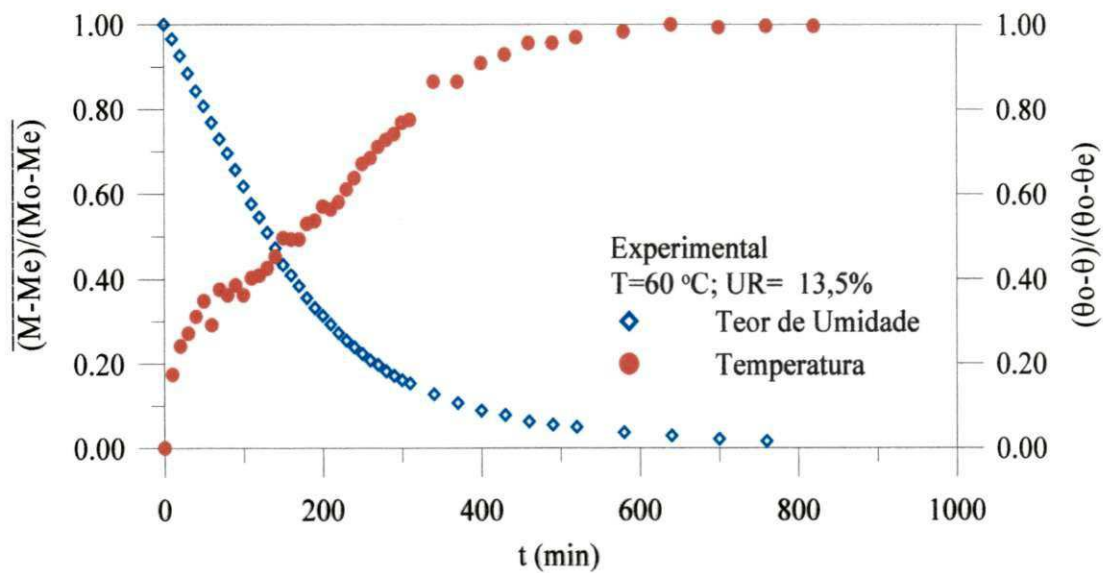


Figura 4.5 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 60°C e UR 13,5%.

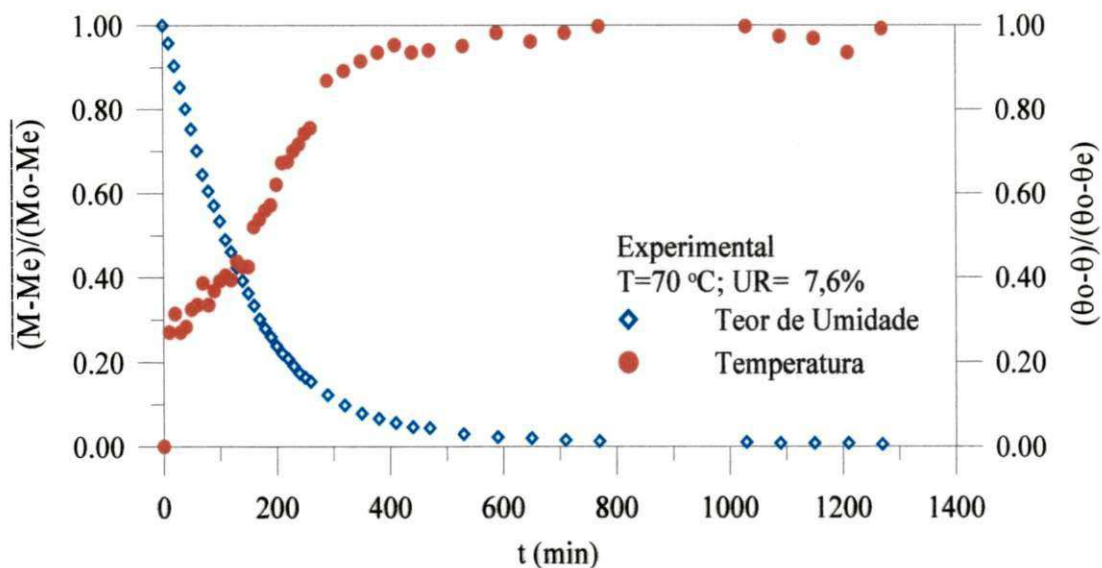


Figura 4.6 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 70°C e UR 7,6%.

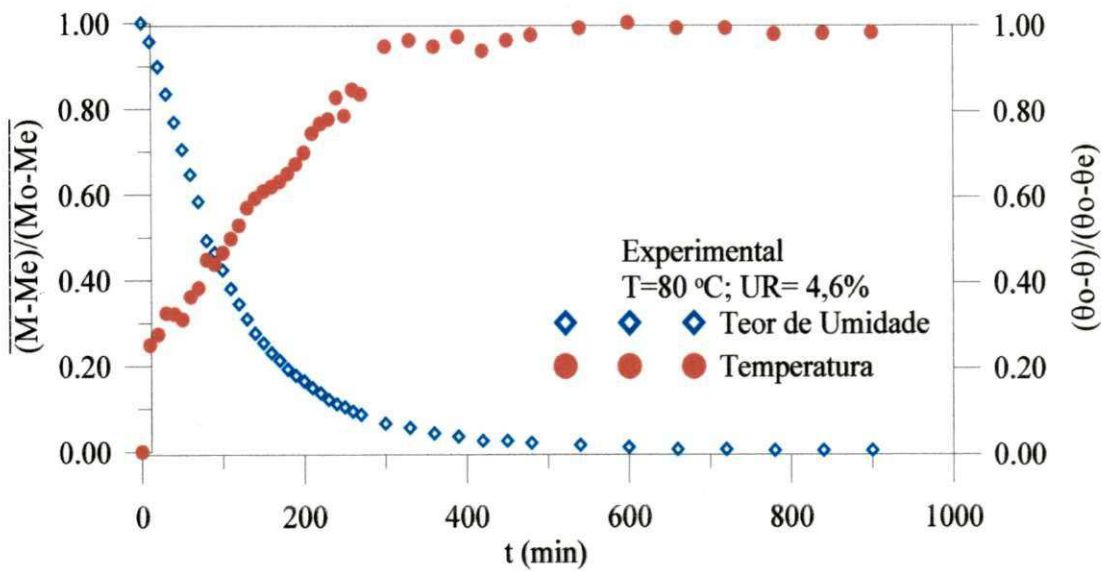


Figura 4.7 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 80°C e UR 4,6%.

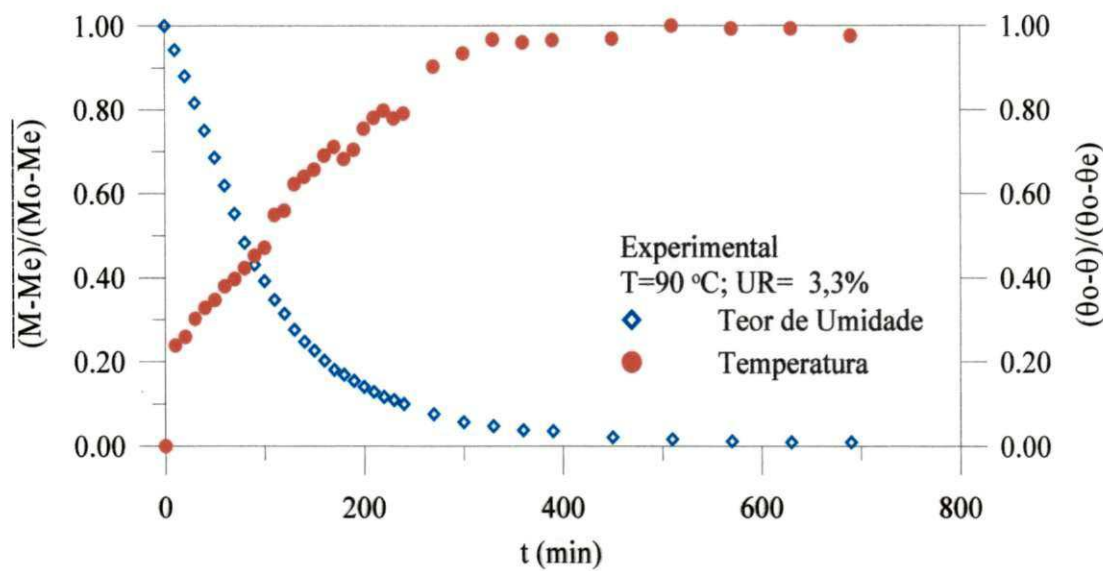


Figura 4.8 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 90°C e UR 3,3%.

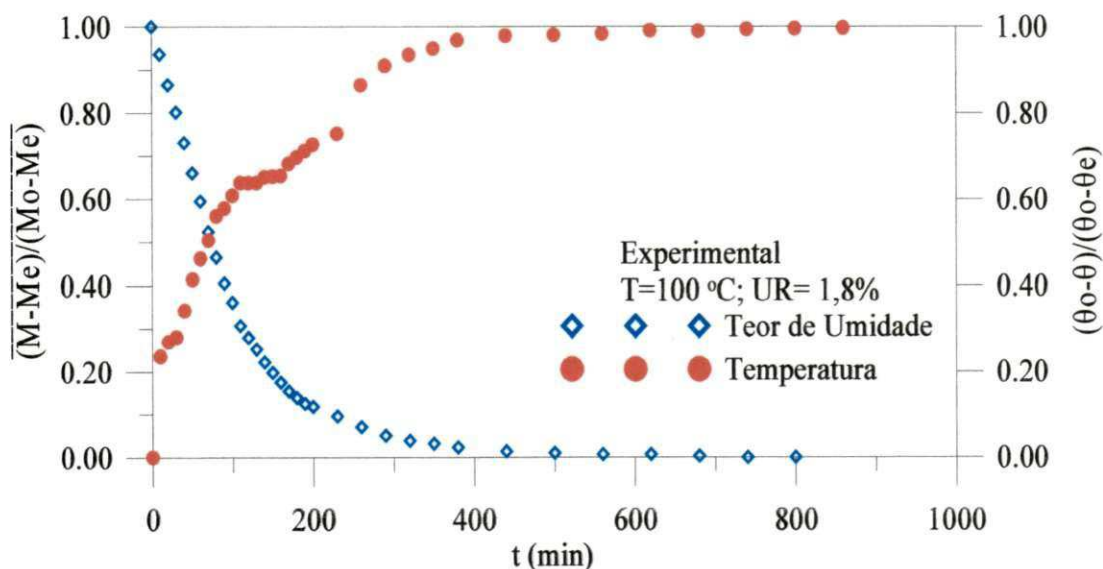


Figura 4.9 - Variação do teor de umidade médio adimensional e da temperatura adimensional no vértice da amostra durante a secagem a 100°C e UR 1,8%

As Figuras 4.10 a 4.15 ilustram as variações dimensionais sofrida pelo tijolo representada pela razão entre o volume medido e o volume inicial do tijolo ao longo do tempo, para as temperaturas constantes de secagem utilizado na estufa de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C. Percebe-se que na secagem em 50°C, 60°C e 70°C, o teor de umidade varia lentamente com o tempo e na secagem em temperaturas mais elevadas como 80°C, 90°C e 100°C, as variações de temperatura e de umidade são mais bruscas. Na Figura 4.15, que mostra a razão entre variação do volume medido e o volume inicial do tijolo em função do tempo na secagem a 100°C, verifica-se, principalmente a partir de 200 minutos de secagem que há uma variação brusca do volume do tijolo, ou seja, aumento e diminuição do volume, deixando a curva bastante desuniforme. Esse fato acontece por causa da dilatação sofrida devido ao aumento da temperatura e, em seguida, a contração devido a saída de líquido.

Nas Figuras 4.16 a 4.21 estão representadas as variações dimensionais sofrido pelo tijolo representada pela razão entre o volume medido e o volume inicial do tijolo em função do teor de umidade médio, para as mesmas temperaturas em questão. Nota-se que, para todas as temperaturas de secagem avaliadas, no início do processo há uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões do sólido mudam desde uma velocidade de encolhimento alta até não variar mais. Porém comparando-se os gráficos, observa-se que para temperaturas de

secagem baixas como, por exemplo, 50°C e 60°C (Figuras 4.16 e 4.17), a variação no volume do tijolo ocorre de forma mais uniforme, devido ao fato da retirada de água ser mais lenta, promovendo a secagem e aquecimento mais demorados, como foi citado anteriormente, porém sem danos ao produto. Já para temperaturas elevadas como, por exemplo, 90°C e 100°C (Figuras 4.20 e 4.21), logo no início do processo há uma grande perda de água do tijolo, causando assim, redução brusca no seu volume e conseqüentemente danos ao produto como o aparecimento de trincas, conforme mostra as figuras 4.42 a,b e 4.44 a,b.

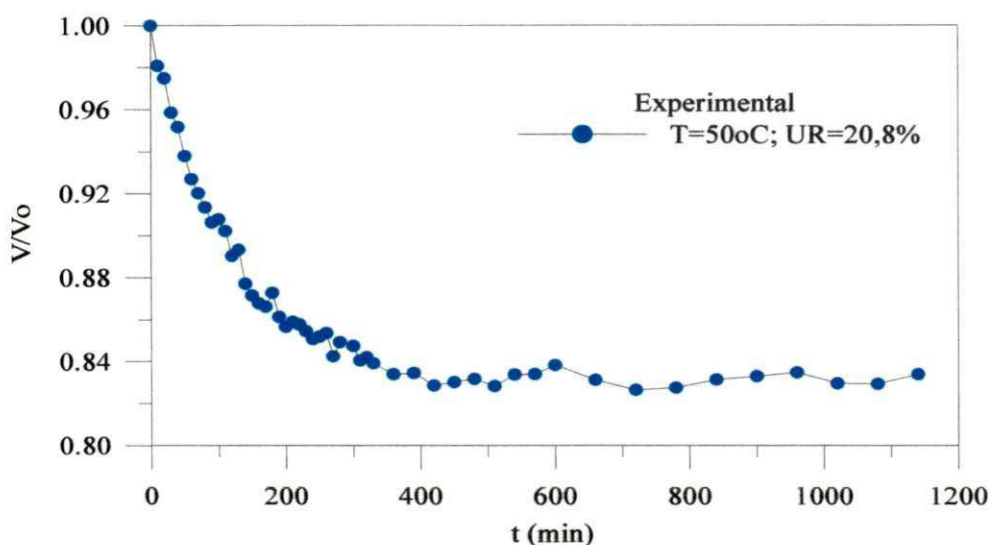


Figura 4.10 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 50°C e UR = 20,8%.

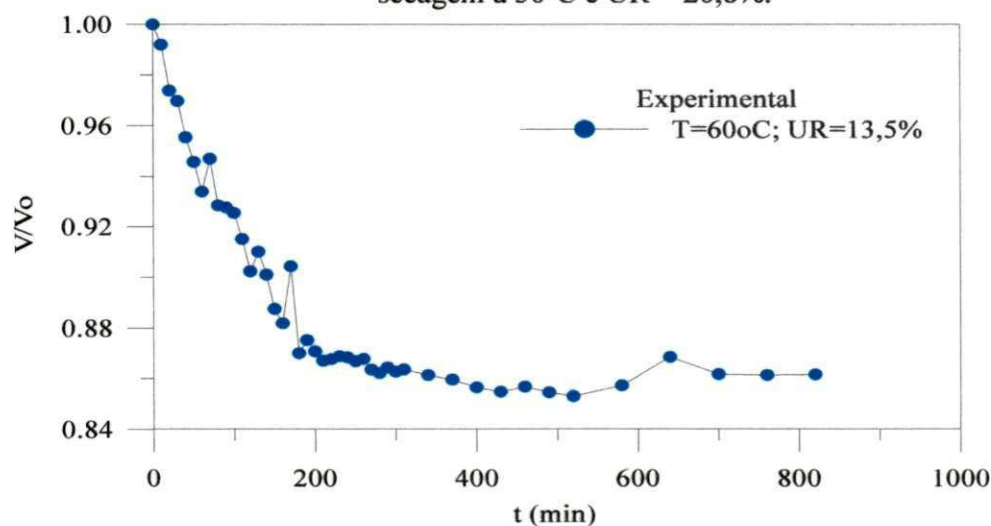


Figura 4.11 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 60°C e UR = 13,8%.

secagem baixas como, por exemplo, 50°C e 60°C (Figuras 4.16 e 4.17), a variação no volume do tijolo ocorre de forma mais uniforme, devido ao fato da retirada de água ser mais lenta, promovendo a secagem e aquecimento mais demorados, como foi citado anteriormente, porém sem danos ao produto. Já para temperaturas elevadas como, por exemplo, 90°C e 100°C (Figuras 4.20 e 4.21), logo no início do processo há uma grande perda de água do tijolo, causando assim, redução brusca no seu volume e conseqüentemente danos ao produto como o aparecimento de trincas, conforme mostra as figuras 4.42 a,b e 4.44 a,b.

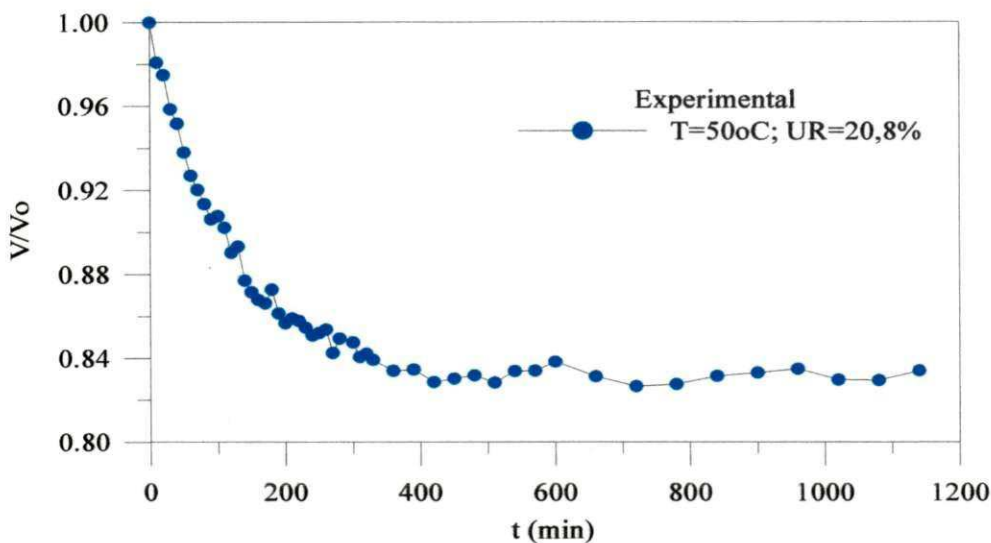


Figura 4.10 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 50°C e UR = 20,8%.

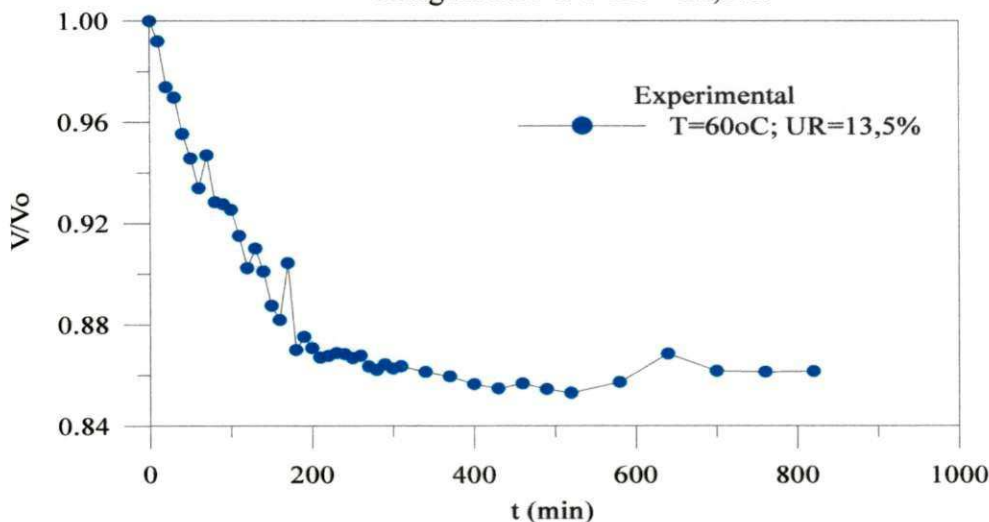


Figura 4.11 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 60°C e UR = 13,8%.

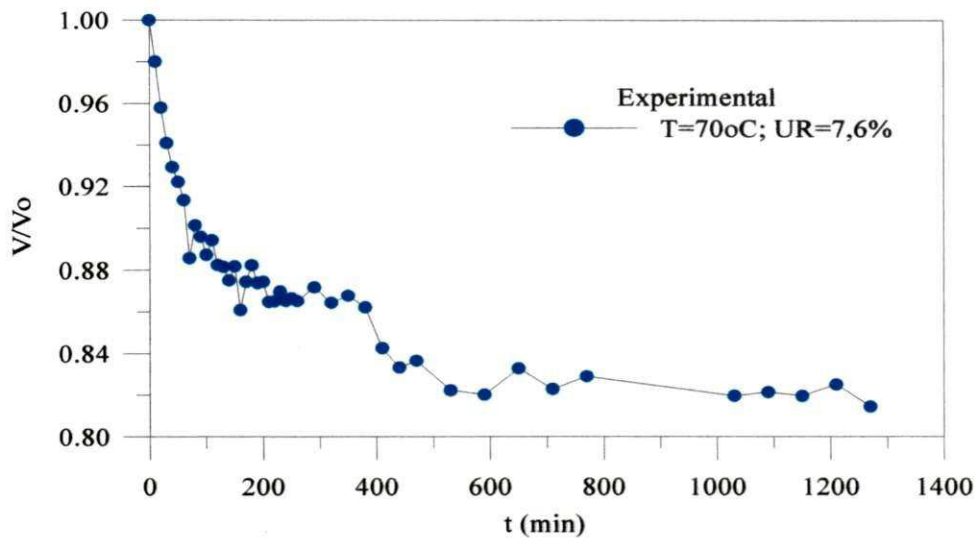


Figura 4.12 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 70°C e UR = 7,6%.

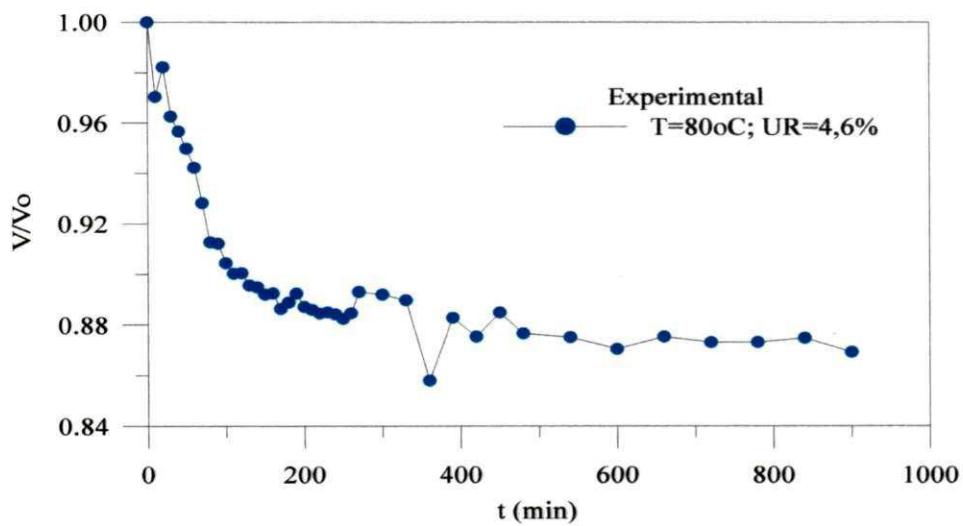


Figura 4.13 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 80°C e UR = 4,6%.

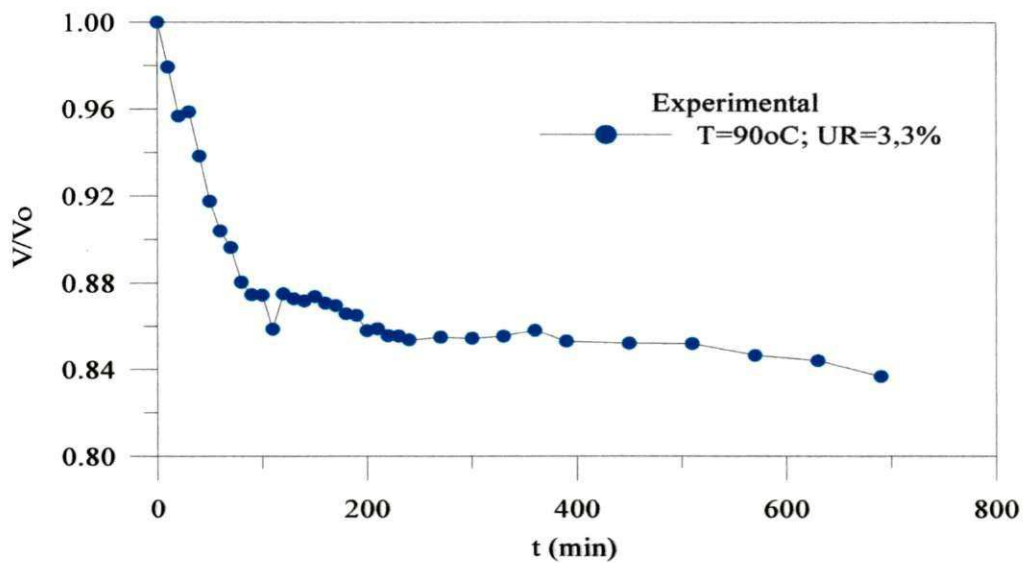


Figura 4.14 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 90°C e UR = 3,3%.

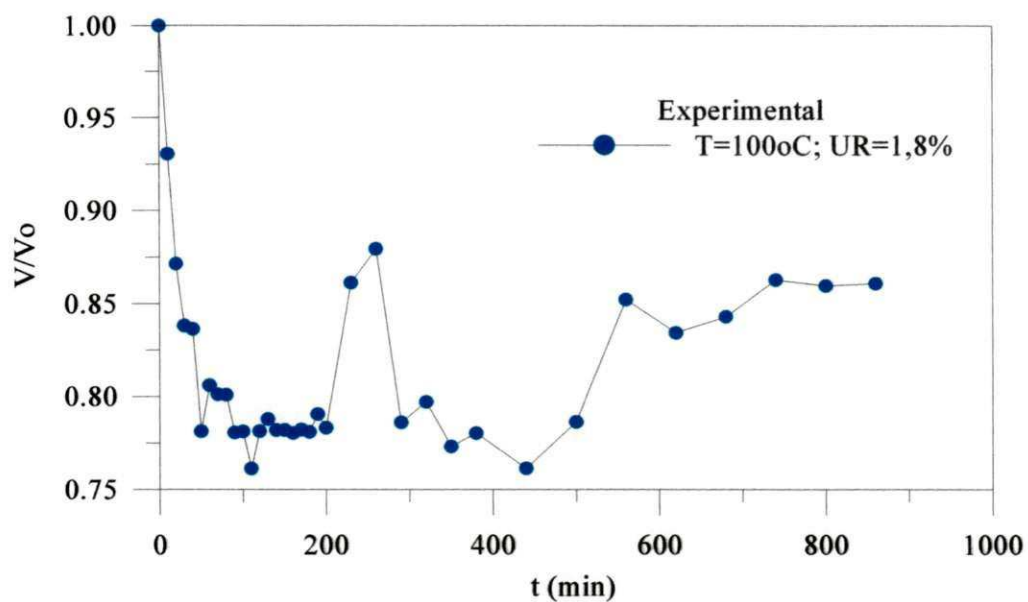


Figura 4.15 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função do tempo durante a secagem à 100°C e UR = 1,8%.

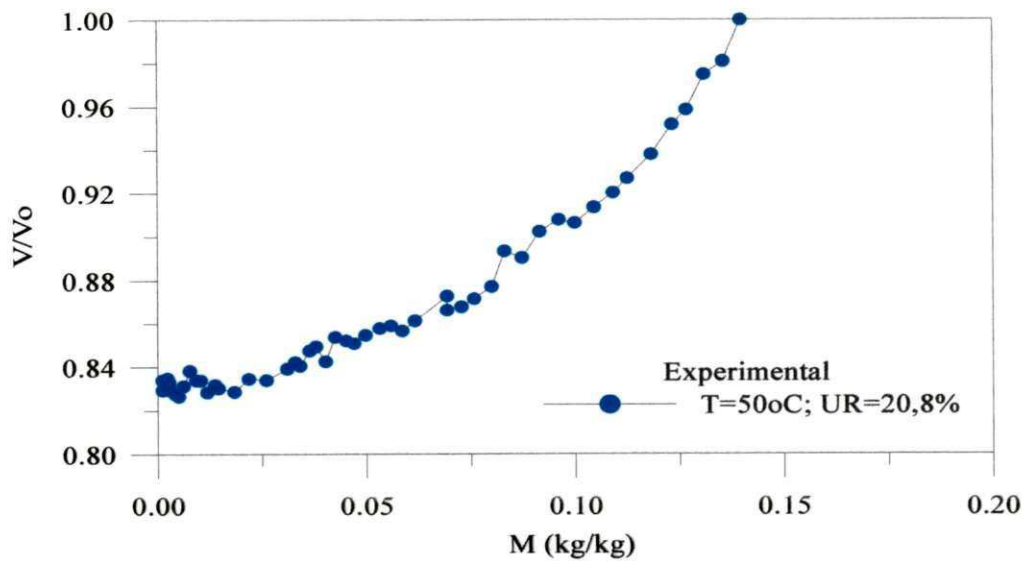


Figura 4.16 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem à 50°C e UR = 20,8%.

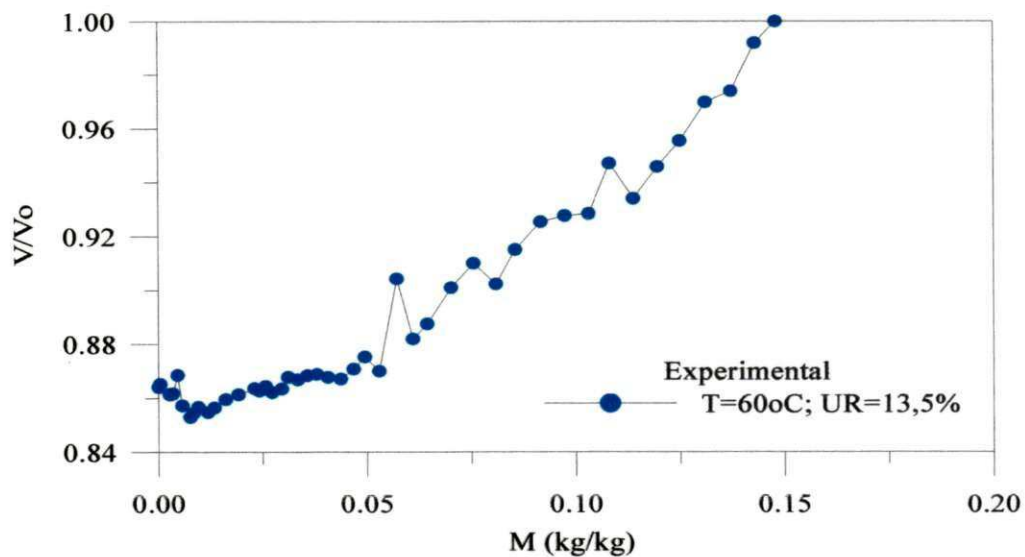


Figura 4.17 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem à 60°C e UR = 13,5%.

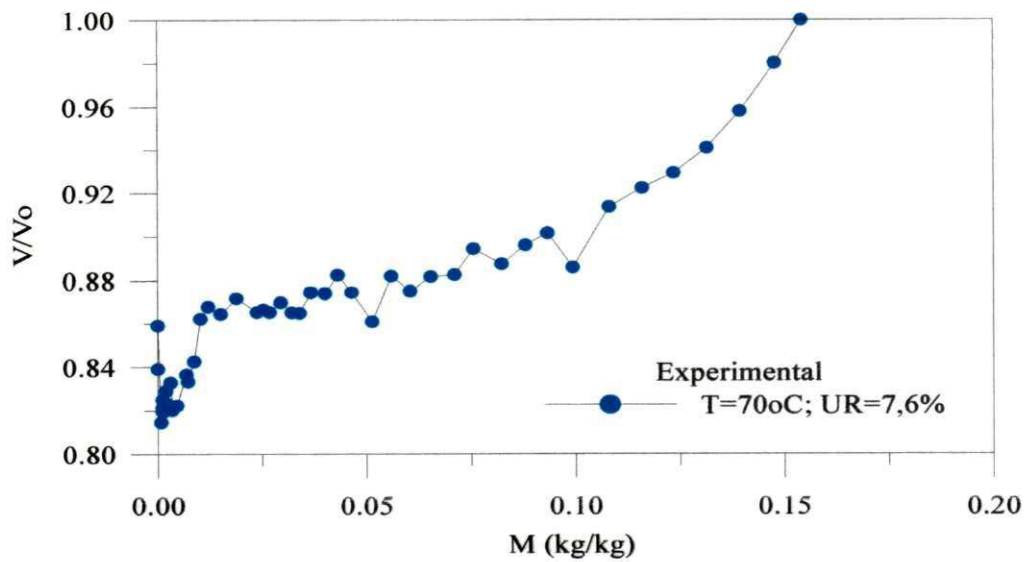


Figura 4.18 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem à 70°C e UR = 7,6%.

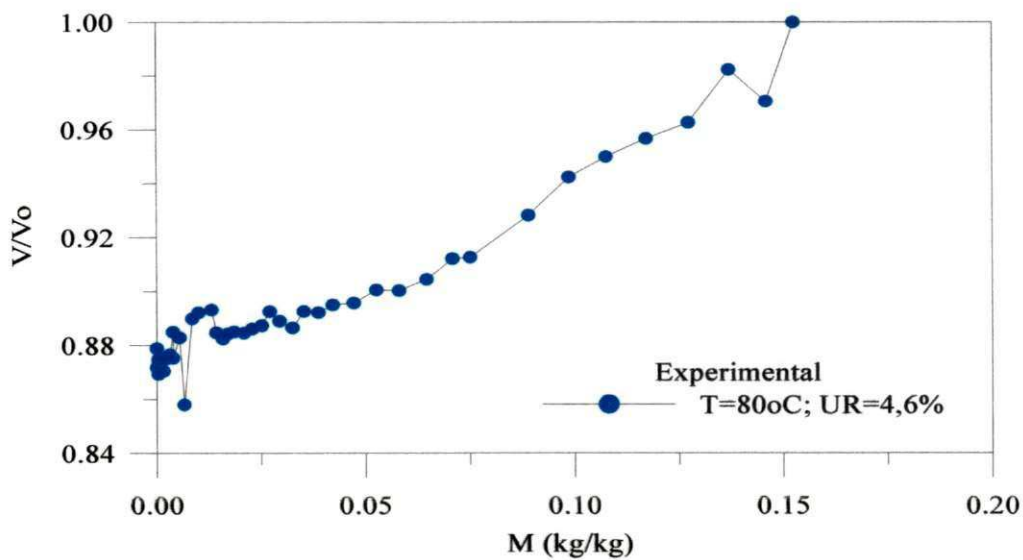


Figura 4.19 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem à 80°C e UR = 4,6%.

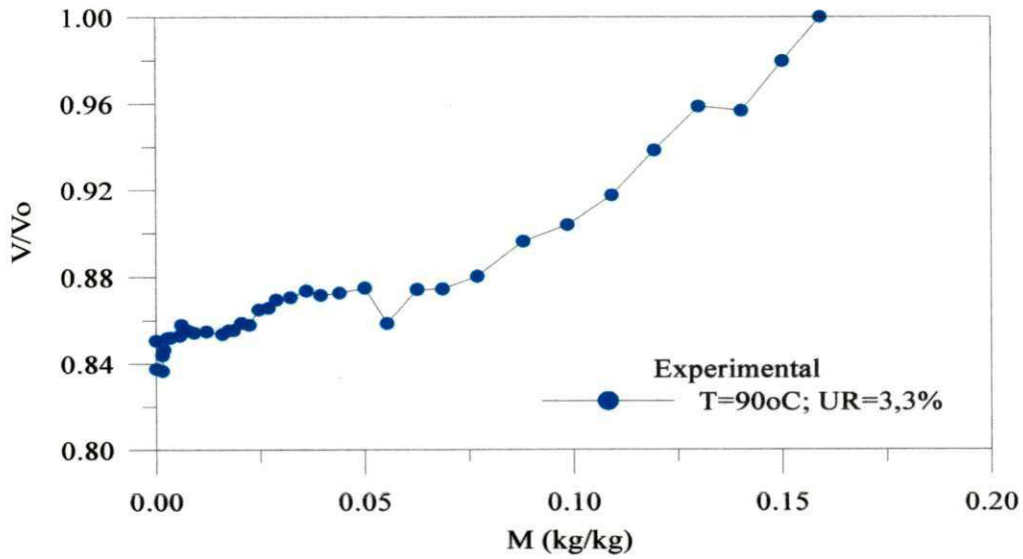


Figura 4.20 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem à 90°C e UR = 3,3%.

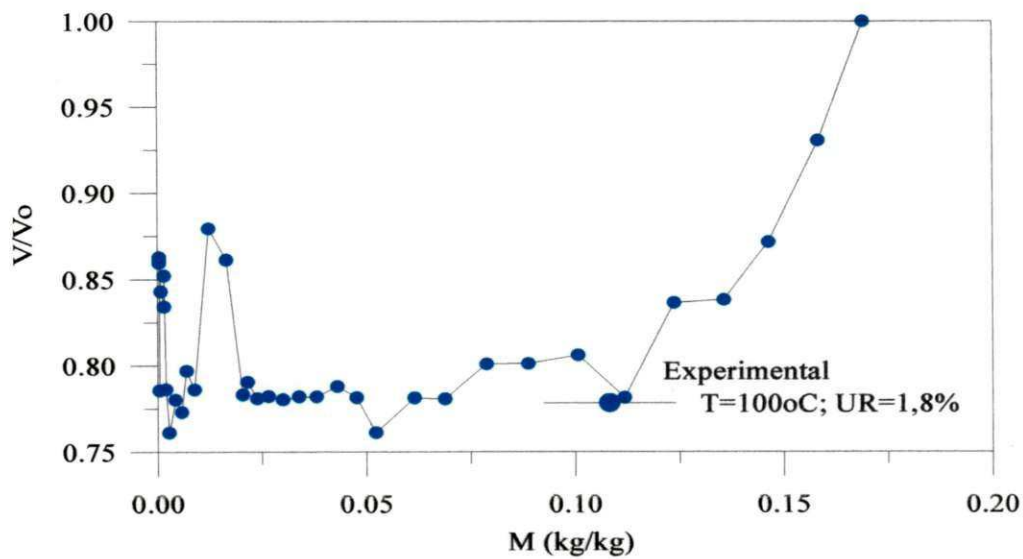


Figura 4.21 – Razão entre o volume medido e inicial do tijolo em função da umidade em base seca durante a secagem a 100°C e UR = 1,8%.

As Figuras 4.22 - 4.27 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade versus tempo de secagem. É evidenciado na Tabela 4.4 e gráficos apresentados, a excelente concordância entre os valores preditos e experimentais, caracterizados por coeficientes de correlação próximos de 1,0.

Tabela 4.4 – Parâmetros da Equação (3.52) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade

Experimento	Parâmetros				R	Proporção da variância	Função de perda (obs-pred) ²
	c ₁	k ₁	c ₂	k ₂			
50 °C	0,576178	-0,004711	0,482232	-0,004711	0,997676745	0,995358888	0,232407380
60 °C	0,547740	-0,005945	0,513349	-0,005945	0,997968284	0,995940696	0,016286299
70 °C	0,00000	0,006781	1,045050	-0,0070948	0,999112861	0,998226509	0,007265462
80 °C	0,535201	-0,009190	0,527668	-0,009190	0,998502641	0,997007523	0,011178723
90 °C	10,63554	-0,014298	-9,613313	-0,015018	0,998876724	0,997754709	0,007220079
100 °C	4,875507	-0,008383	-3,827964	-0,007881	0,998297496	0,996597890	0,010995176

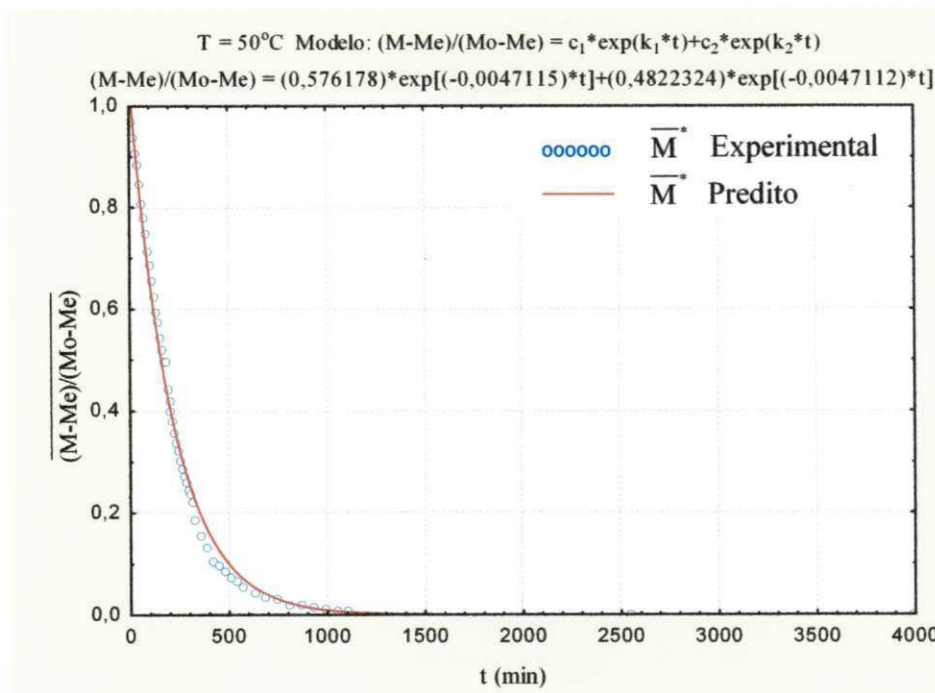


Figura 4.22 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

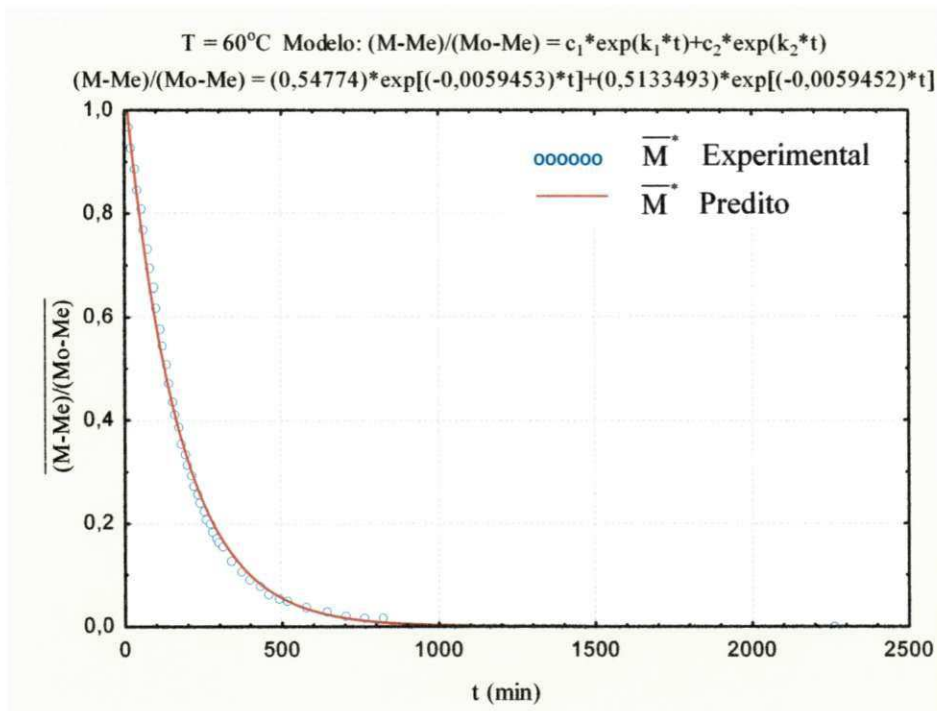


Figura 4.23 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

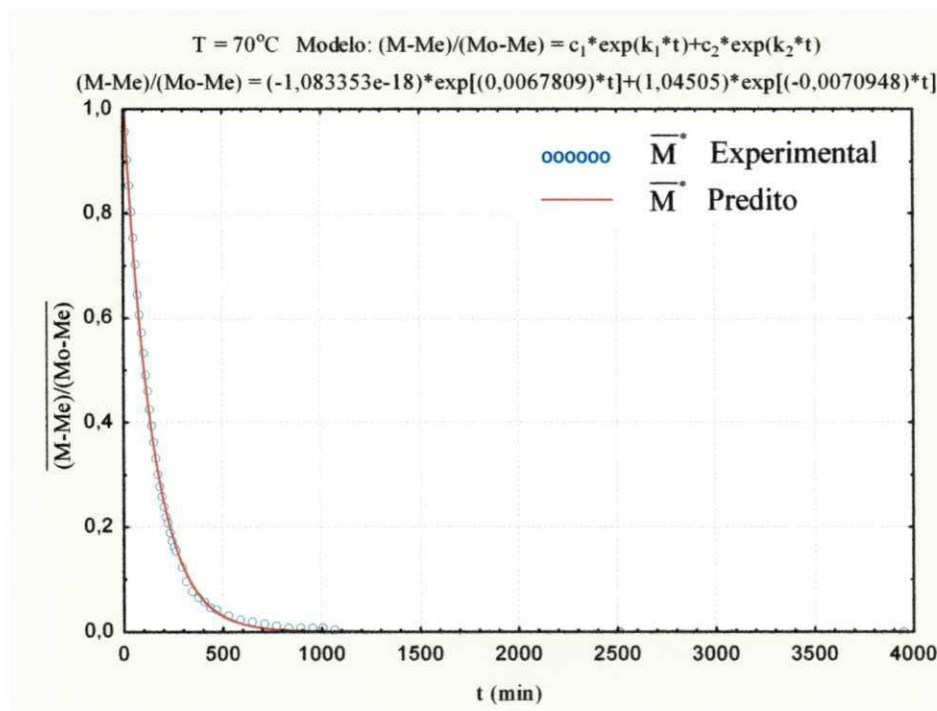


Figura 4.24 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

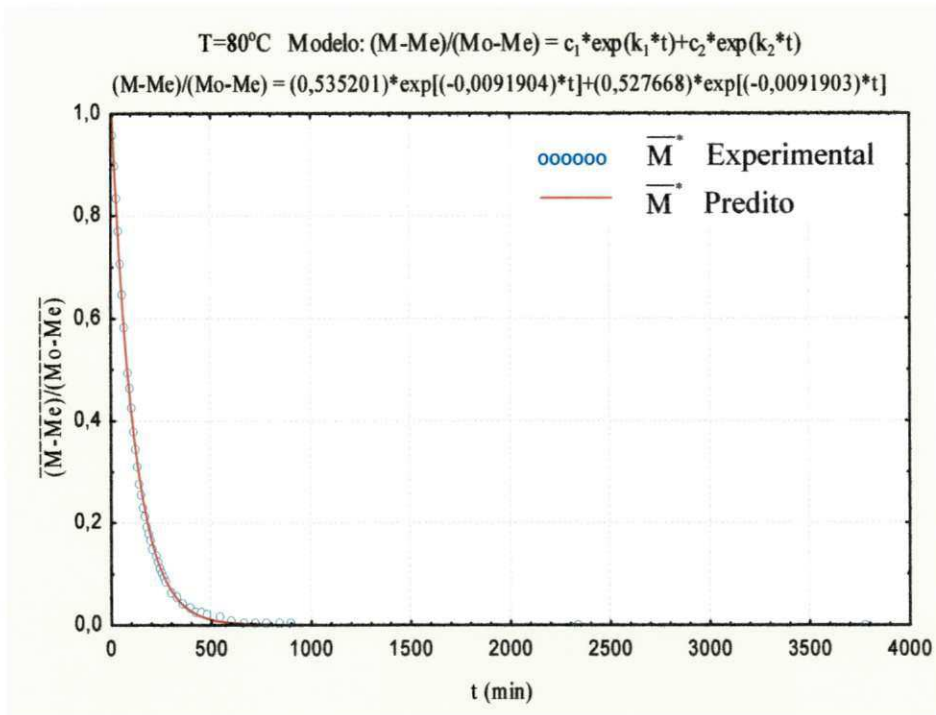


Figura 4.25 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

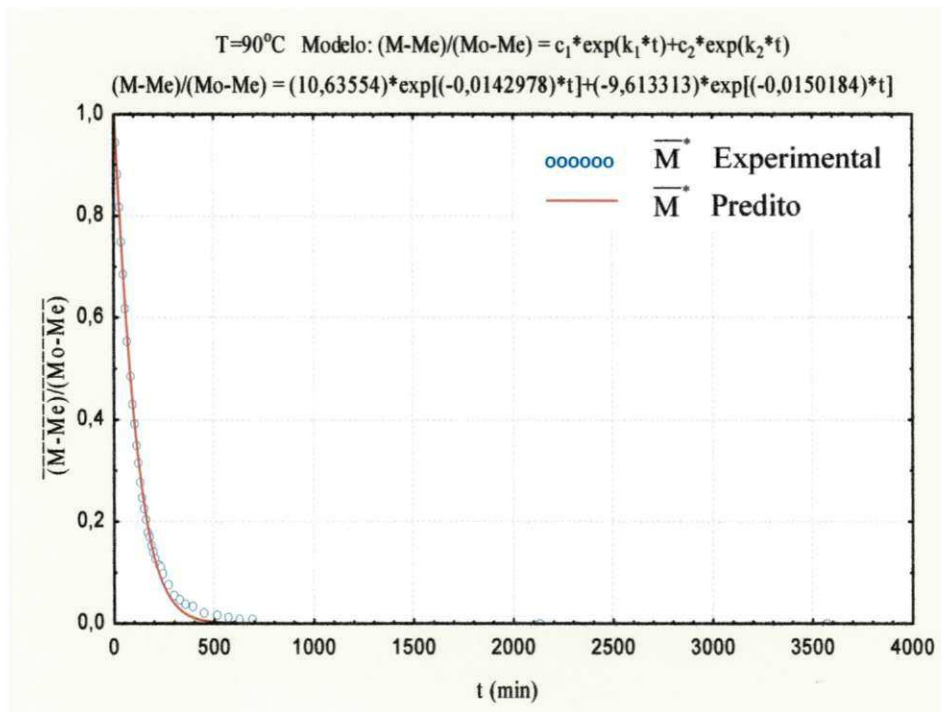


Figura 4.26 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.

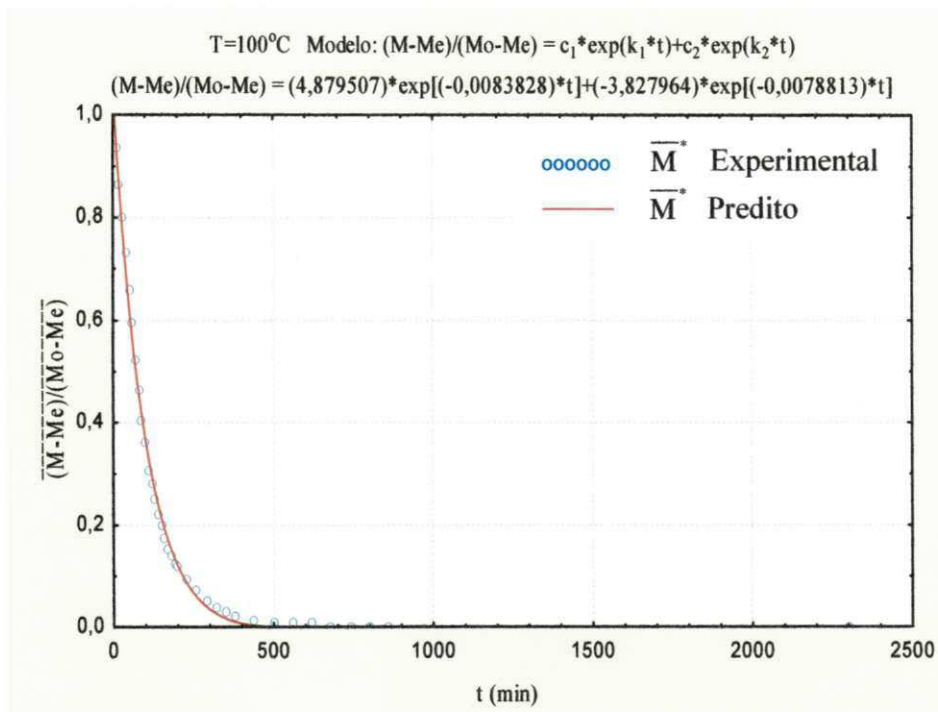


Figura 4.27 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 100°C.

As Figuras 4.28 a 4.33 ilustram as curvas de ajuste da variação volumétrica versus teor de umidade em base seca. A Tabela 4.5 apresenta os parâmetros da Equação (3.14) onde se verifica que um bom ajuste foi obtido caracterizado por coeficientes de correlação próximos de 1,0, com exceção para 100°C.

Tabela 4.5 – Parâmetros da equação (3.14) ajustados aos dados experimentais

Experimento	Parâmetros				R	Proporção da variância(%)	Função de perda (obs-pred) ²
	b ₁	b ₂	b ₃	b ₄			
50 °C	34,0993	1,55899	0,293364	0,829659	0,99554	99,111	0,000952957
60 °C	-25,025	10,6732	-0,13045	0,860039	0,98946	97,903	0,001568921
70 °C	135,247	-26,758	2,04903	0,826835	0,97374	94,818	0,004169198
80 °C	0,828871	1,11288	0,54739	0,873409	0,97941	95,924	0,001892657
90 °C	44,1061	-4,9523	0,648921	0,847226	0,98842	97,698	0,001325490
100 °C	62,1398	1,46258	-1,0842	0,822142	0,82683	68,366	0,028967105

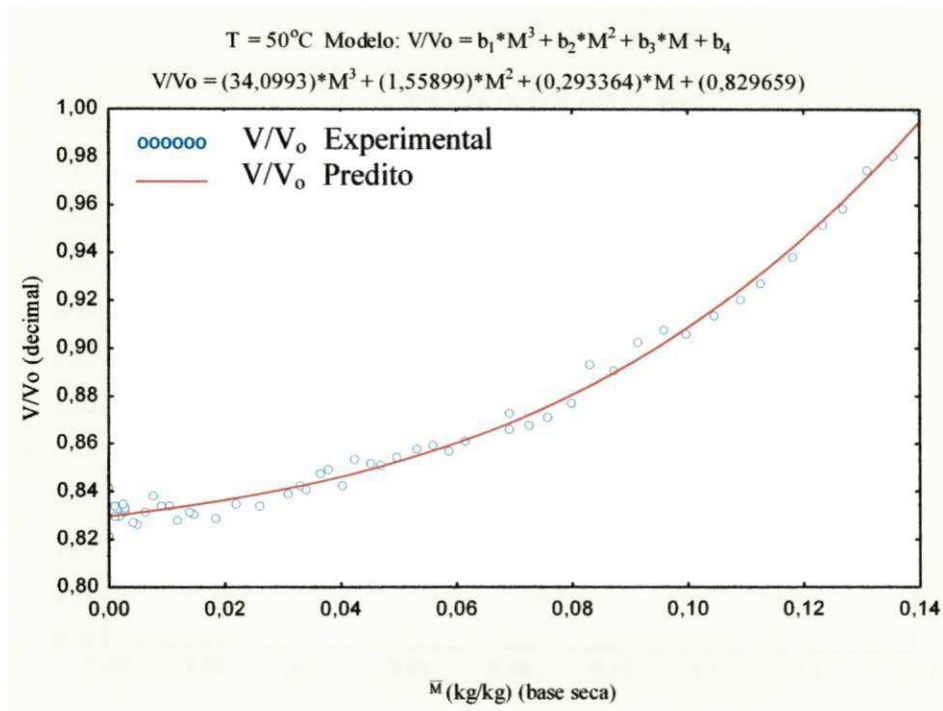


Figura 4.28 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

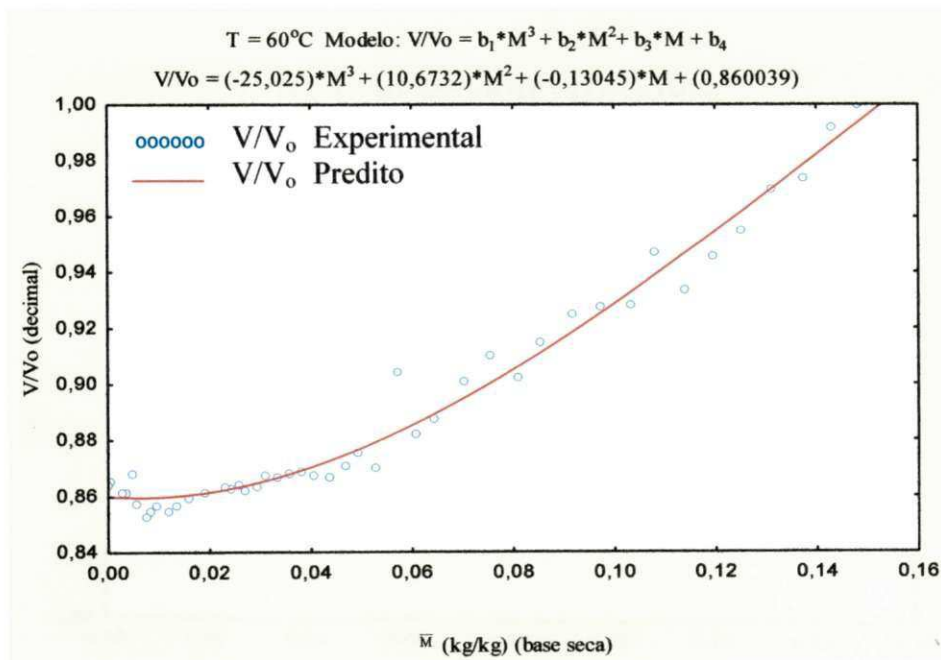


Figura 4.29 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

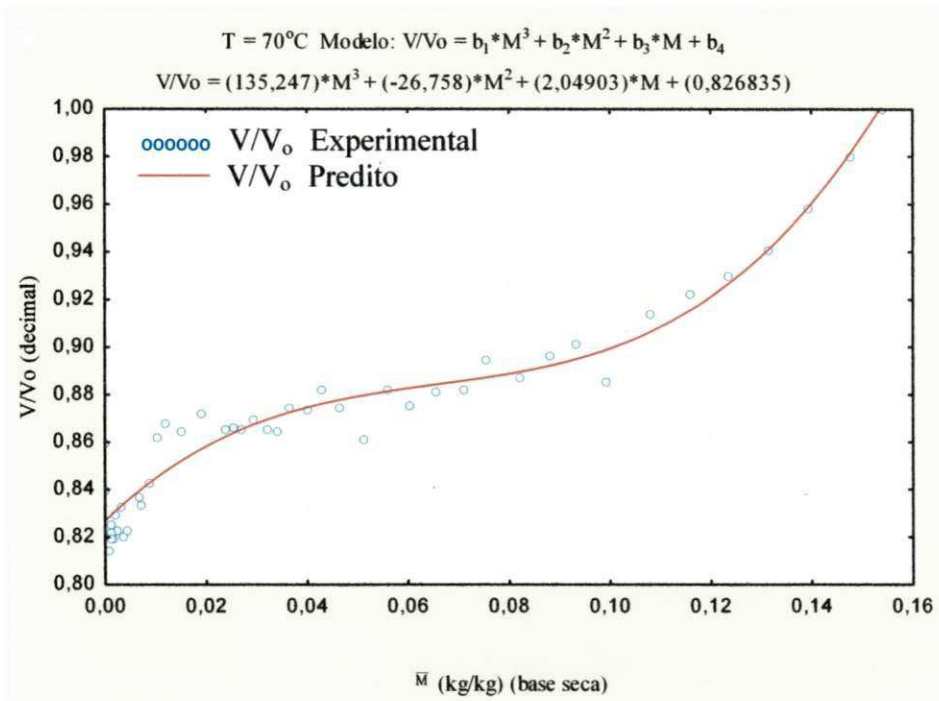


Figura 4.30 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

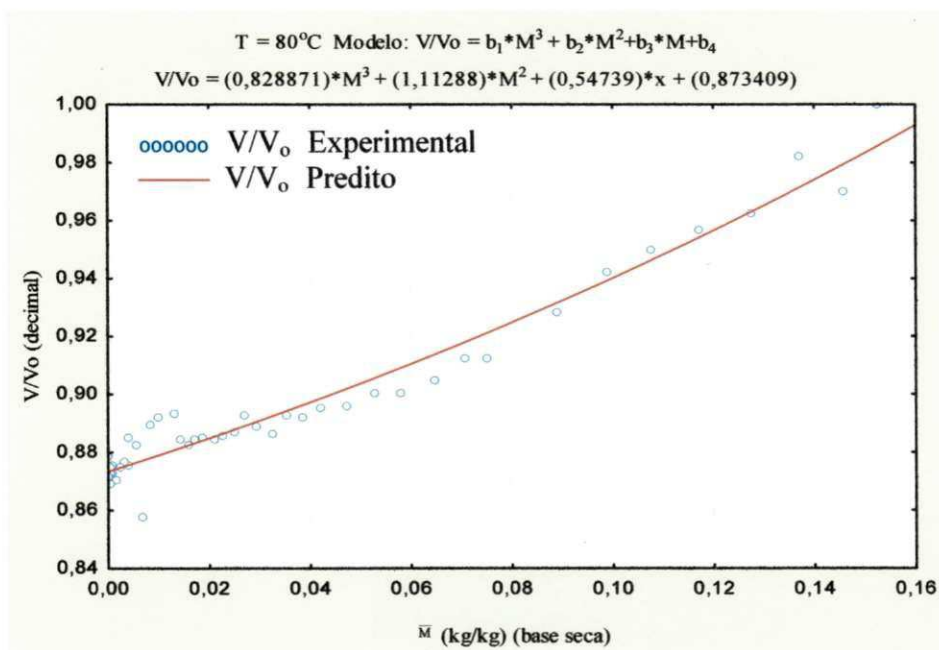


Figura 4.31 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

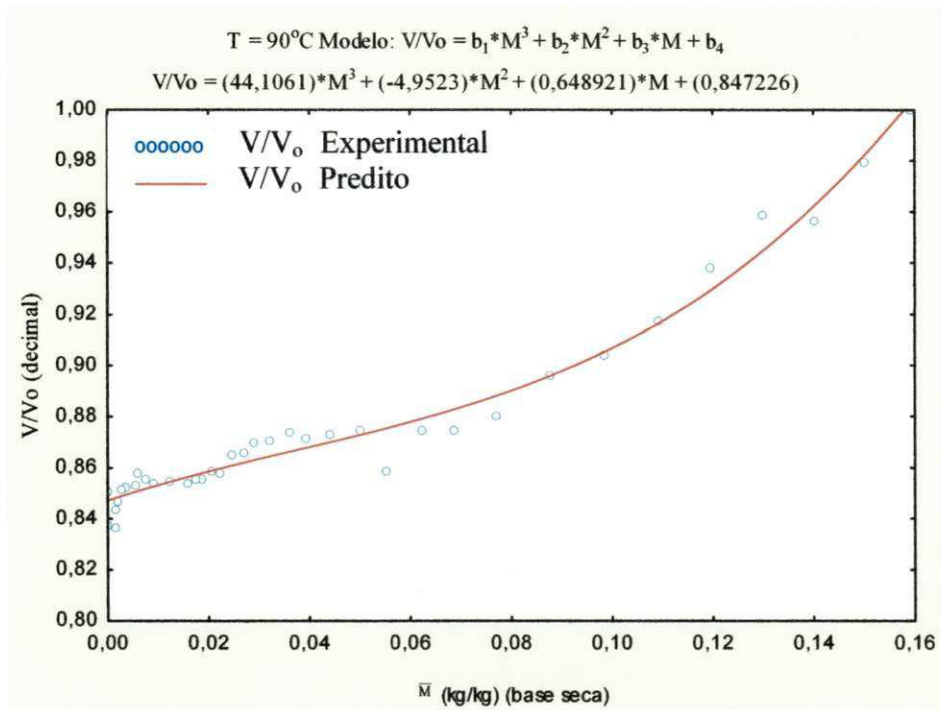


Figura 4.32 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 90°C.

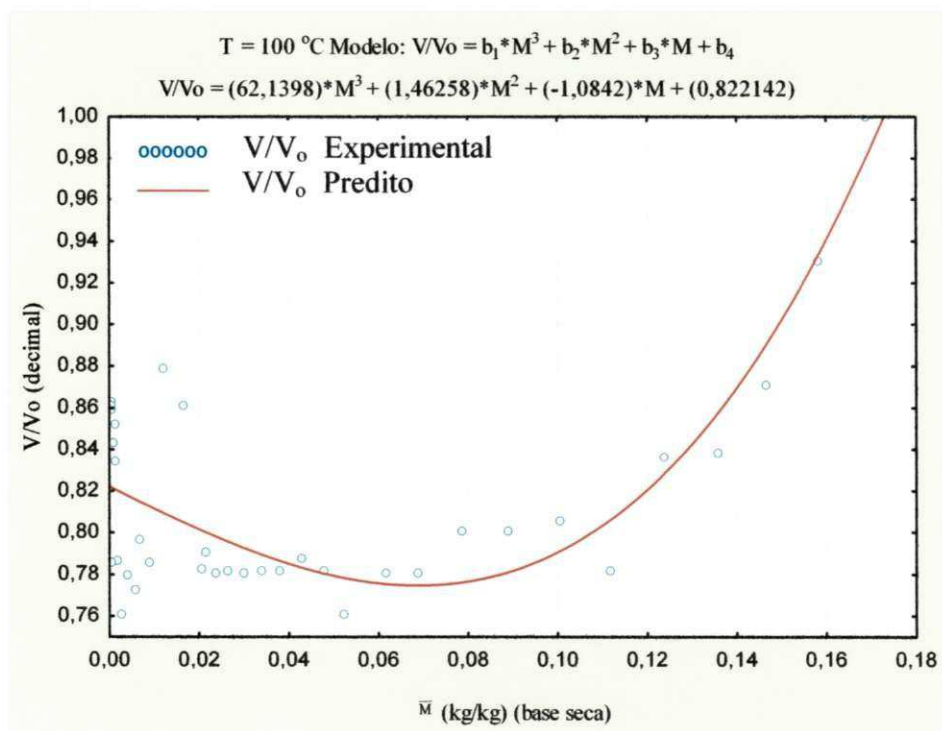


Figura 4.33 - Comparação entre V/V_0 da amostra, experimental e predito para o experimento realizado na temperatura de 100°C.

A Tabela 4.6 apresenta os resultados de encolhimento no final do processo de secagem, para cada experimento realizado.

Tabela 4.6 – Dados de retração volumétrica durante a secagem

Teste	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	t (h)
1	89,28	188	191	7,58	6,82	7,12	5,64	253161	1180579	18,5
2	89,28	187	191	7,64	6,92	6,82	5,84	251349	1178024	13,7
3	89,56	188	194	7,92	8,26	7,13	6,52	243209	1320764	17,8
4	89,98	189	193	7,44	6,99	6,98	6,38	257278	1223973	15,0
5	90,00	189	192	8,18	7,05	6,19	5,90	258912	1195353	11,5
6	90,91	189	195	10,48	8,53	8,12	7,54	232231	1492641	14,3

Nas Tabelas 4.7 à 4.12, observa-se que o volume do tijolo varia em média 14,5%, enquanto o volume do furo varia 9,0%. As maiores dimensões do tijolo tiveram uma maior retração linear. Observa-se ainda que há uma pequena diferença entre o percentual da variação do volume do tijolo e o teor de umidade. Isso se dá devido a pequenos erros de medição e uso do equipamento no momento da leitura.

Tabela 4.7 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 50 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	93,36	197	200	282843	1415644	0,13969
Término da secagem	89,28	188	191	253161	1180579	0,00115
Variação	4,08	9,0	9,0	29682	235065	0,13854
Percentual	4,4 %	4,6 %	4,5 %	10,5 %	16,6 %	99,2 %

Tabela 4.8 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 60 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	92,75	195	200	281248	1367269	0,14795
Término da secagem	89,28	187	191	251349	1178024	0,00268
Variação	3,47	8,0	9,0	29899	189245	0,14527
Percentual	3,7 %	4,1 %	4,5 %	10,6 %	13,8 %	98,2 %

Tabela 4.9 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 70 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	93,16	197	203	262998	1621581	0,15414
Término da secagem	89,56	188	194	243209	1320764	0,00076
Variação	3,6	9,0	9,0	19789	300817	0,15338
Percentual	3,8 %	4,5 %	4,4 %	7,5 %	18,5 %	99,5 %

Tabela 4.10 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 80 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	92,76	197	201	283118	1408075	0,15248
Término da secagem	89,98	189	193	257278	1223973	0,00039
Variação	2,78	8,0	8,0	25840	184102	0,15209
Percentual	3,4 %	4,1 %	4,0 %	9,1 %	13,1 %	99,7

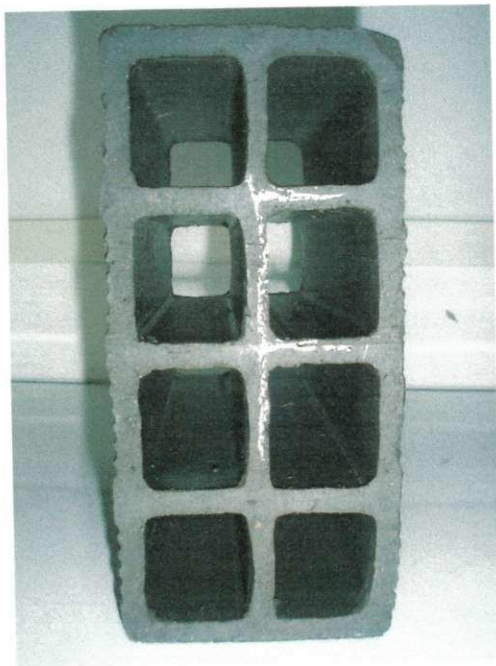
Tabela 4.11 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 90 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	93,13	197	201	282377	1428652	0,159212
Término da secagem	90,00	189	192	258912	1195353	0,001516
Variação	3,13	8,0	9,0	23465	233299	0,157696
Percentual	3,3 %	4,0 %	4,5 %	8,3 %	16,3 %	99,1%

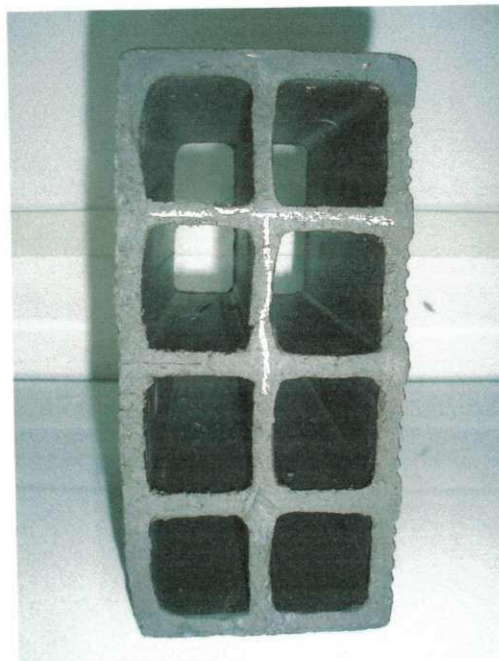
Tabela 4.12 – Variação dimensional, volumétrica e teor de umidade da amostra submetida a secagem na temperatura de 100 °C

	2R ₁ (mm)	2R ₂ (mm)	2R ₃ (mm)	V _f (mm ³)	V (mm ³)	\bar{M} (kg/kg)
Início da secagem	92,80	198	202	247200	1734026	0,169036
Término da secagem	90,91	189	195	232231	1492641	0,000384
Variação	1,89	9,0	7,0	14969	241385	0,168652
Percentual	2,0 %	4,5 %	3,5 %	6,0 %	13,9 %	99,8

As Figuras 4.34 a 4.48 ilustram as faces das amostras em diversos instantes de processo de secagem. Verifica-se que secagem a baixa temperatura e alta umidade relativa, implica em produto de melhor qualidade, contudo o tempo de secagem é elevado.



a)



b)

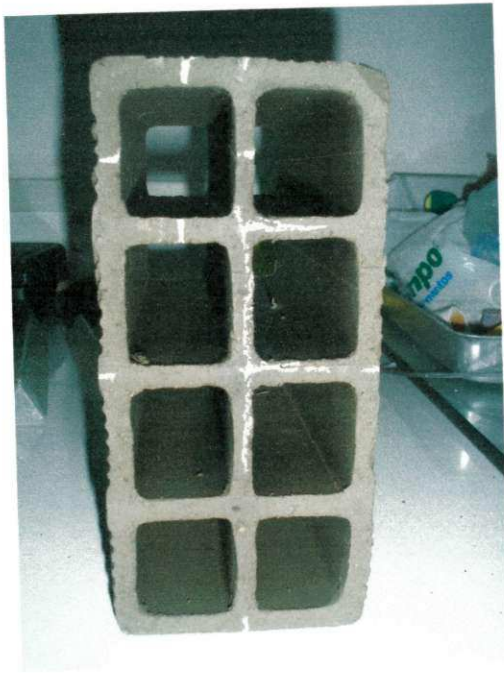


c)



d)

Figura 4.34 – Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 50°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

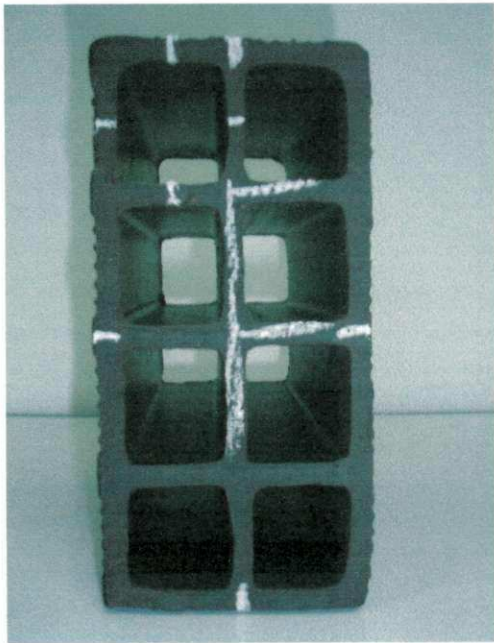


c)

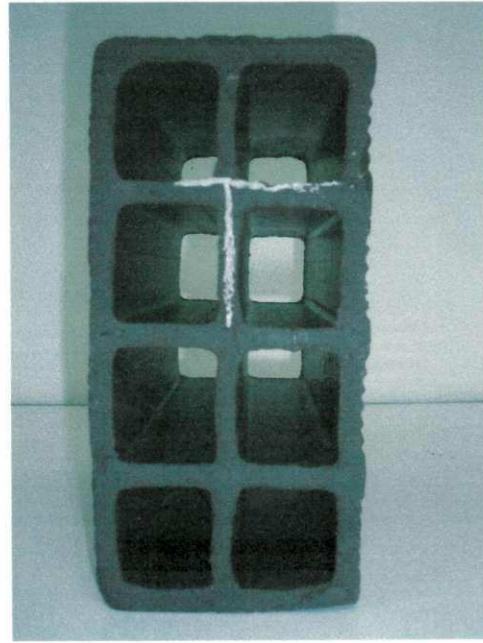


d)

Figura 4.35 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 260$ minutos) na temperatura constante de 50°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 33,6^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,4^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 74\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

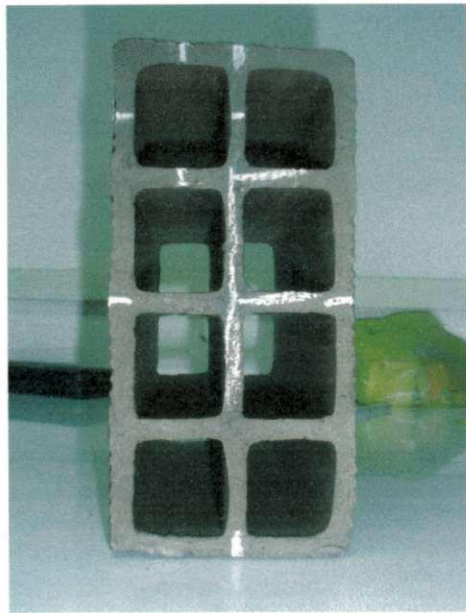


c)

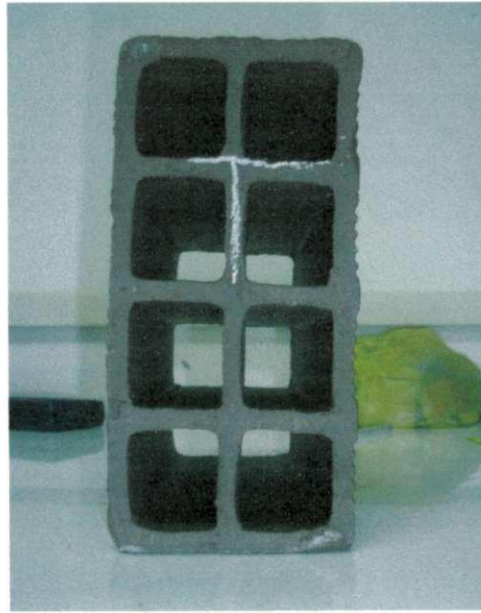


d)

Figura 4.36 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 60°C . a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



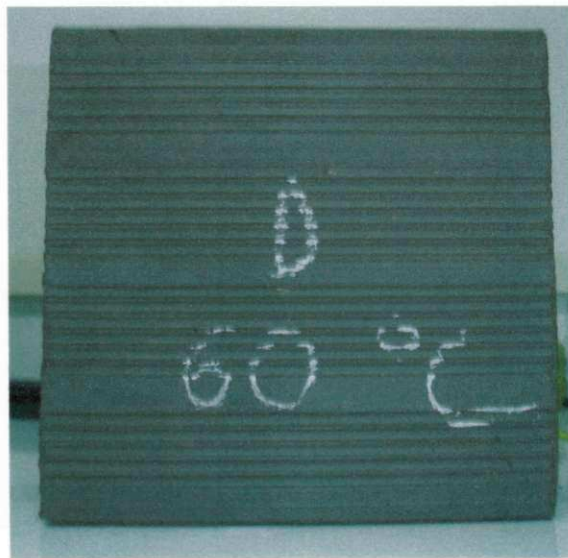
a)



b)

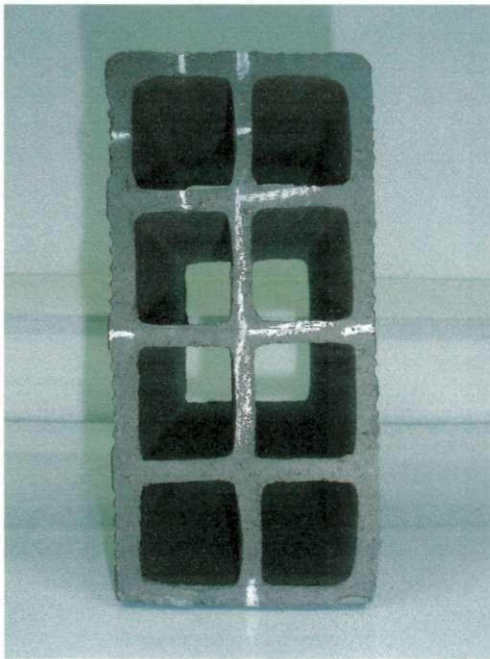


c)

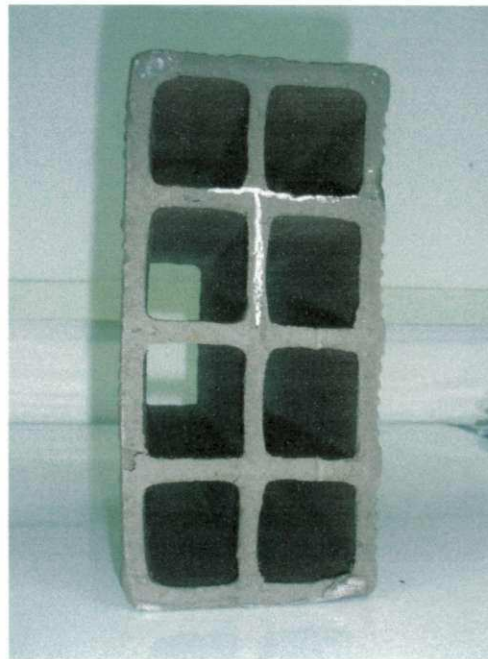


d)

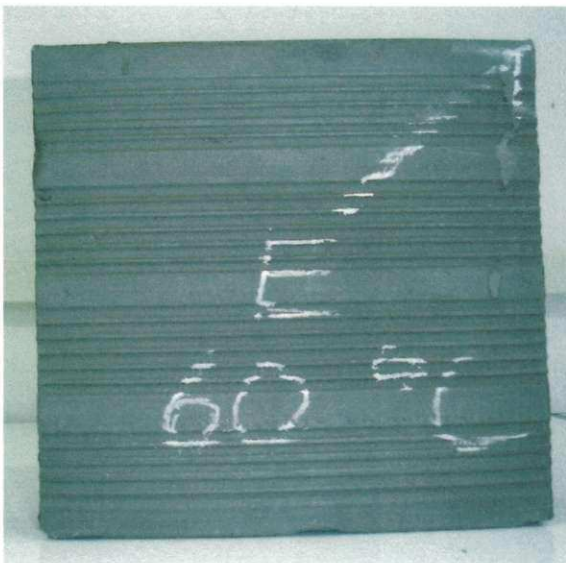
Figura 4.37 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 180$ minutos) na temperatura constante de 60°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 36,3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 79\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



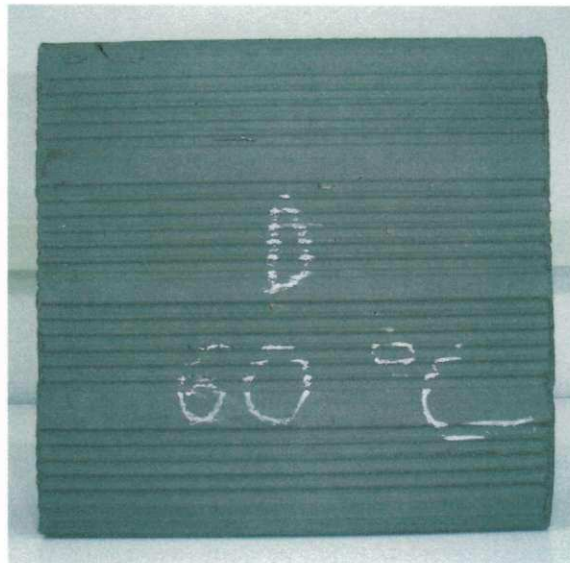
a)



b)



c)



d)

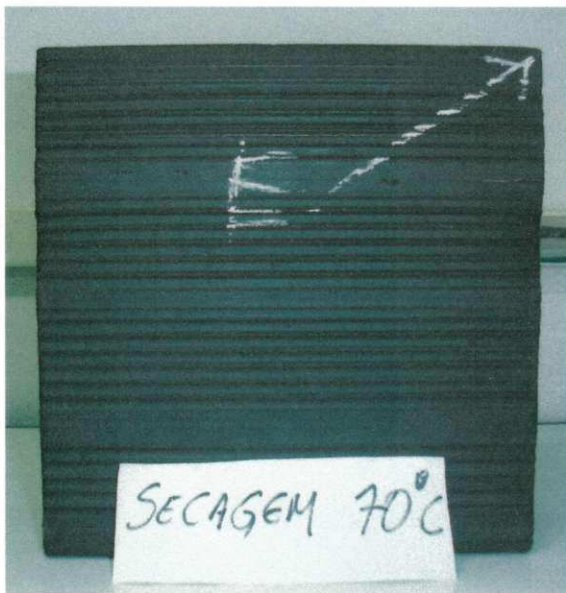
Figura 4.38 –Vista da amostra submetida à secagem ($t = 290$ minutos) na temperatura constante de 60°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 42,6,3^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,1^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 77\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

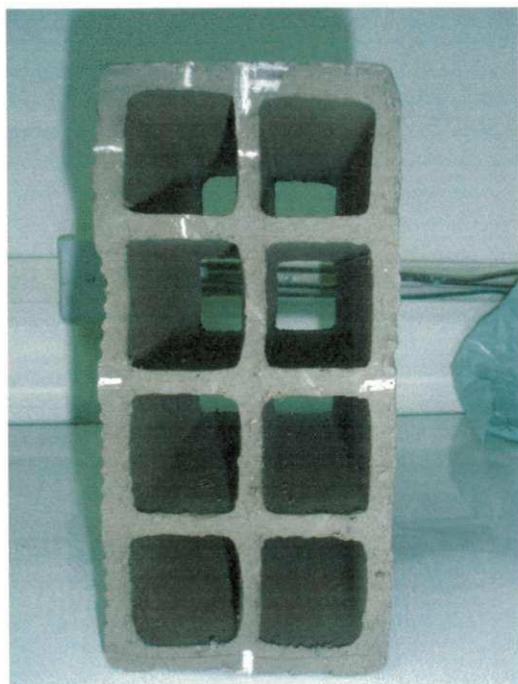


c)

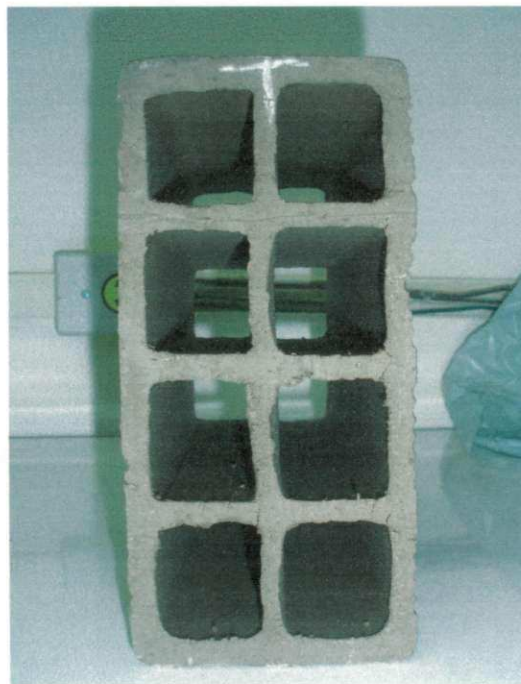


d)

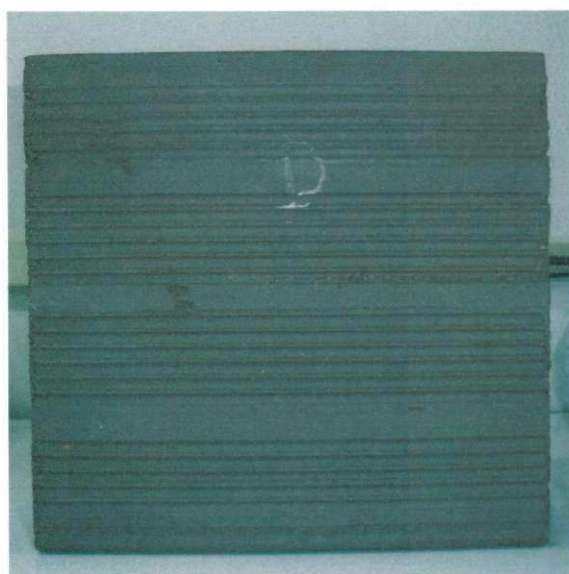
Figura 4.39 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 70°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



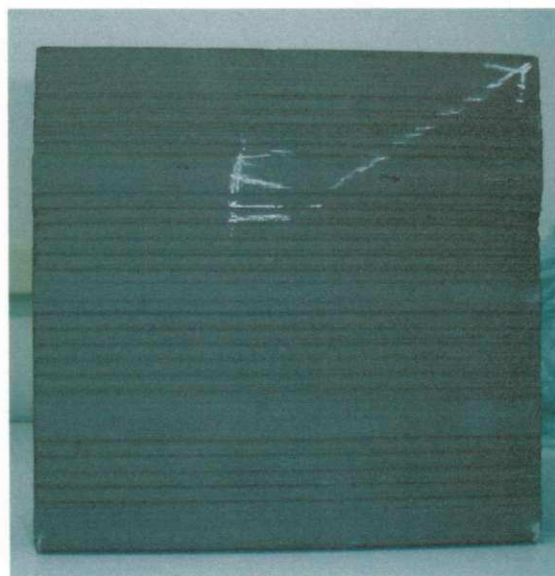
a)



b)

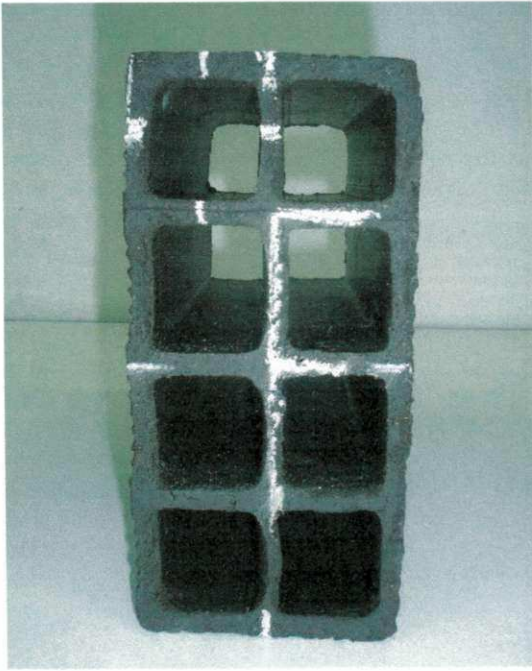


c)

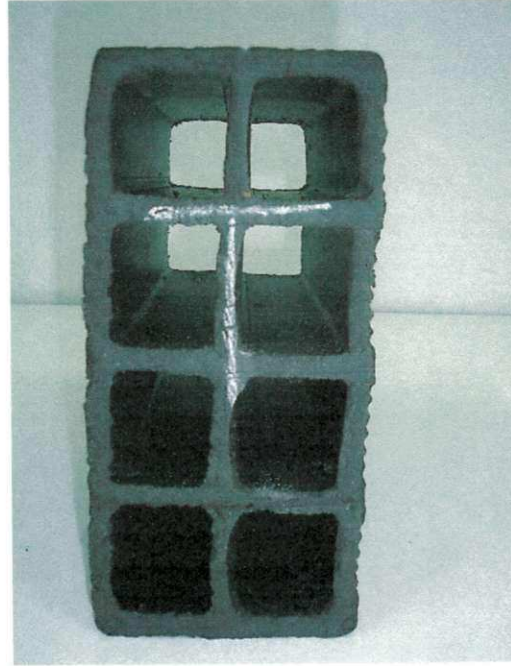


d)

Figura 4.40 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 1070$ minutos) na temperatura constante de 70°C na estufa ($\theta_{t_{ij}} = 64,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,9^{\circ}\text{C}$, $UR_{\text{amb.}} = 69\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

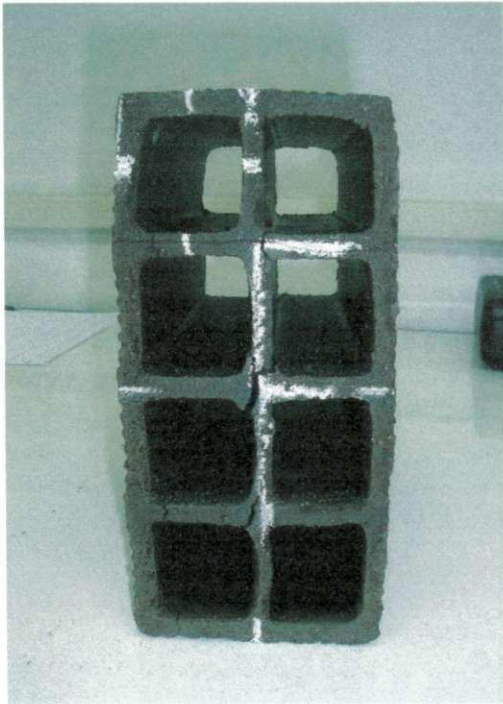


c)

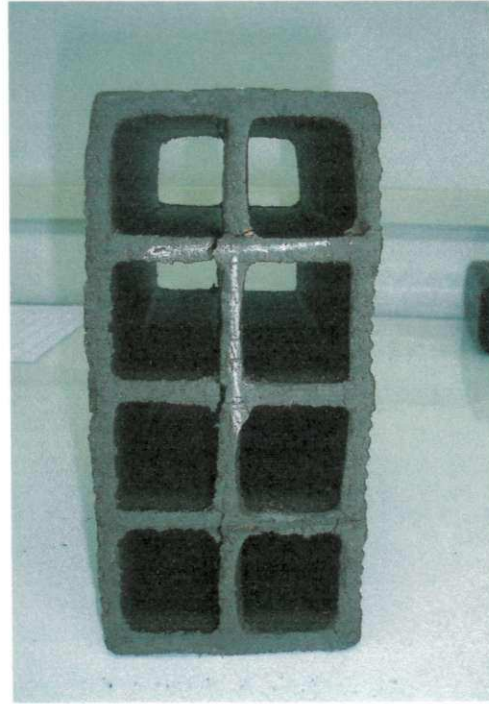


d)

Figura 4.41 - Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 80°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

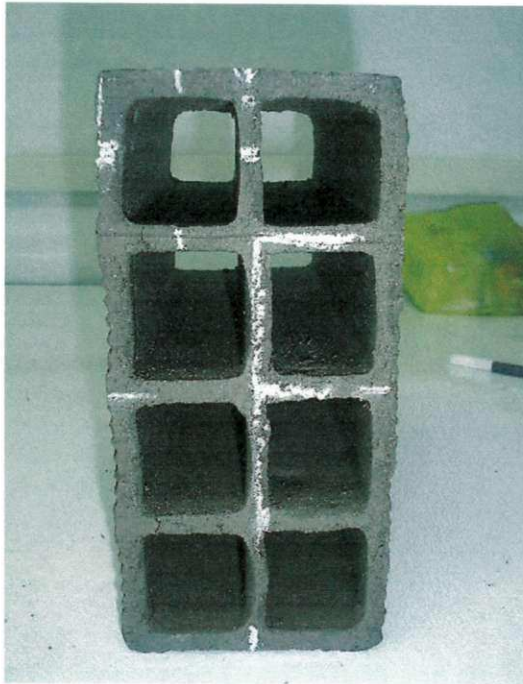


c)

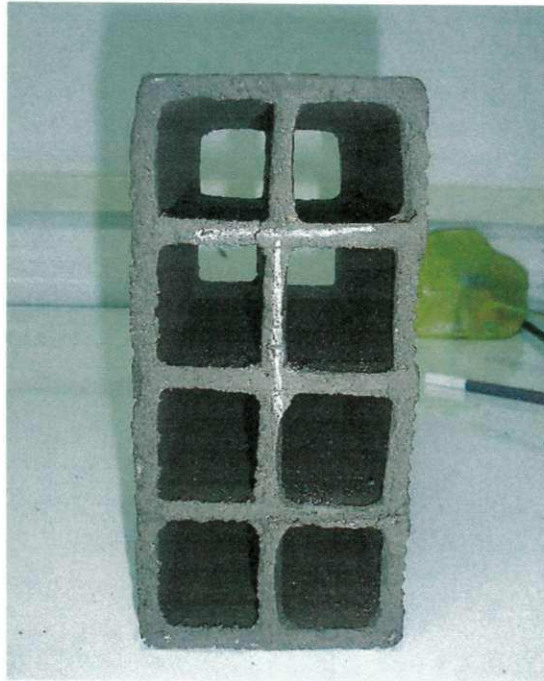


d)

Figura 4.42 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 40$ minutos) na temperatura constante de 80°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 37,1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 26,9^{\circ}\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 58\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



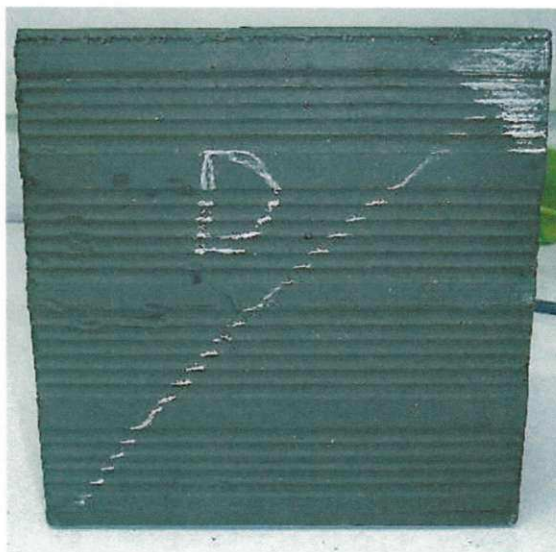
a)



b)

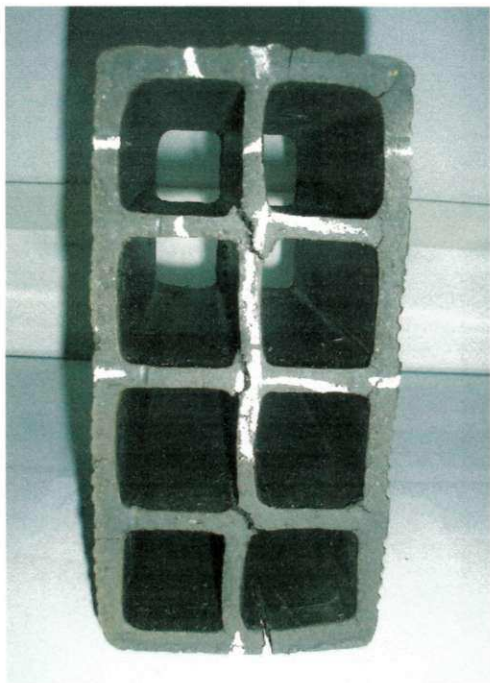


c)

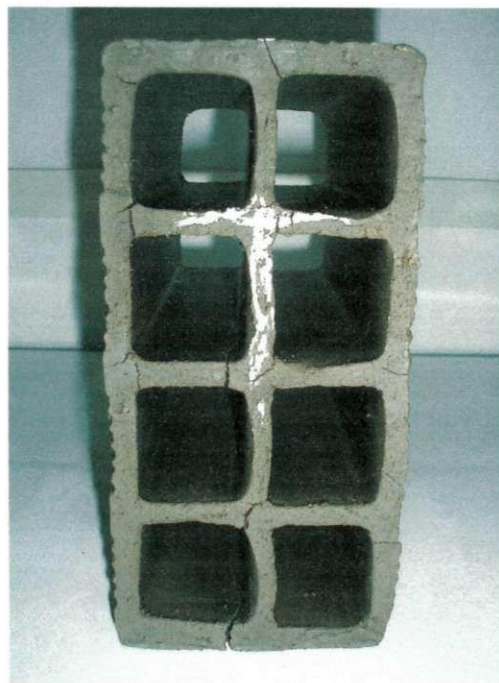


d)

Figura 4.43 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 900$ minutos) na temperatura constante de 80°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 69,2,1^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 24,6^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 75\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)

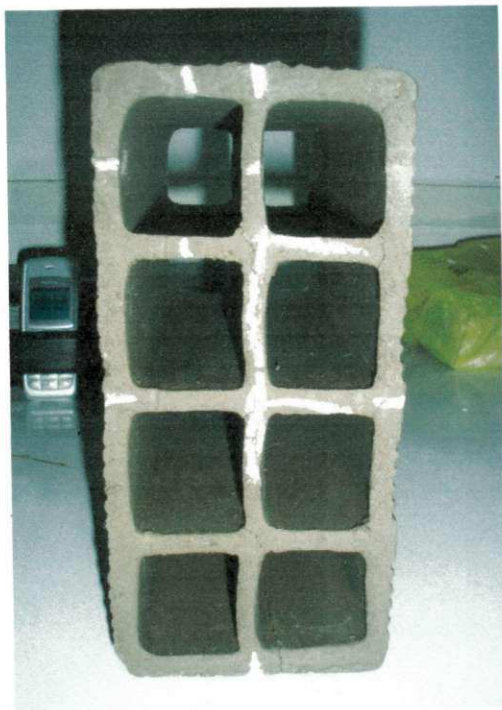


c)

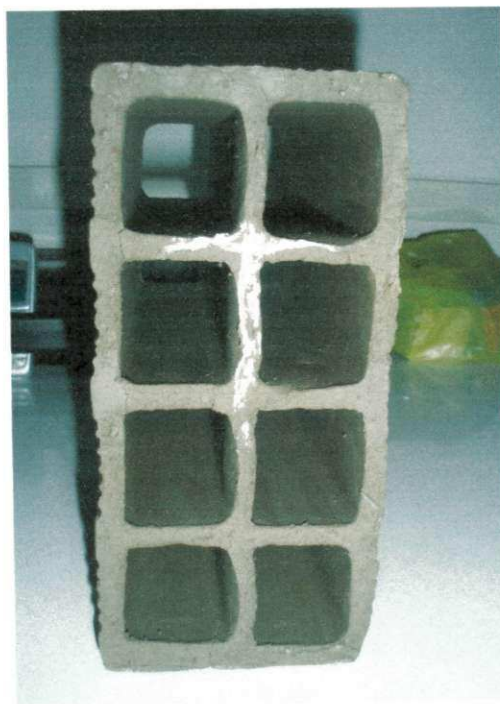


d)

Figura 4.44 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 20$ minutos) na temperatura constante de 90°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 36^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $UR_{\text{amb.}} = 78\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



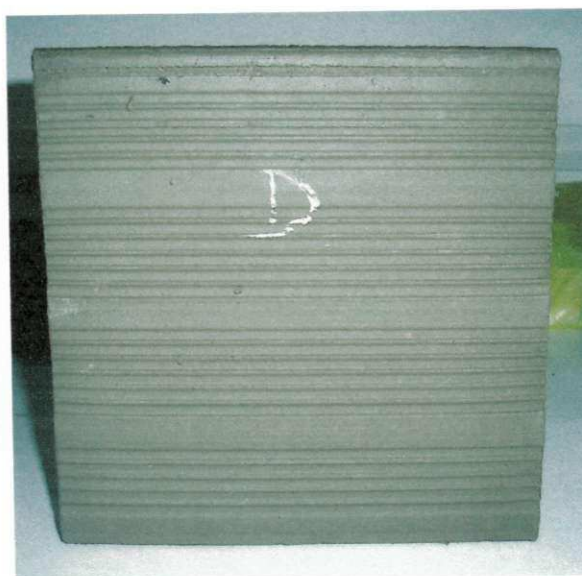
a)



b)

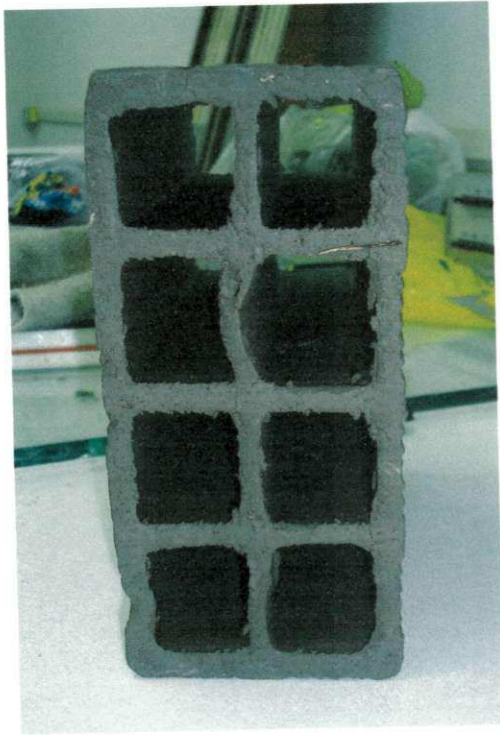


c)

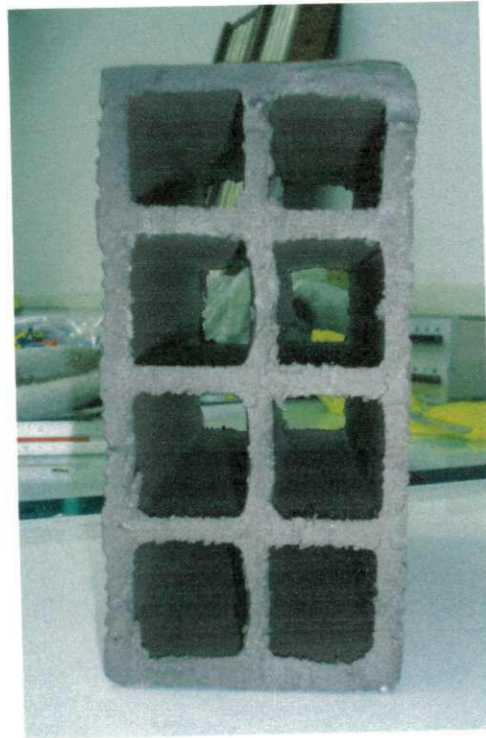


d)

Figura 4.45 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 690$ minutos) na temperatura constante de 90°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 77,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 25,5^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 76\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.46 – Vista da amostra antes de ser submetida a secagem ($t = 0$) à temperatura constante de 100°C na estufa. a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.



a)



b)



c)



d)

Figura 4.47 – Vista da amostra submetida à secagem ($t = 40$ minutos) na temperatura constante de 100°C na estufa ($\theta_{\text{tij}} = 49,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{amb.}} = 27,9^{\circ}\text{C}$, $\text{UR}_{\text{amb.}} = 41\%$). a) Frontal, b) Traseira, c) Esquerda e d) Direita.

As Figuras 4.48 à 4.50 ilustram fotos dos tijolos em dois tempos durante a secagem, com temperatura constante na estufa de 60°C, 80°C e 90°C, respectivamente. Estas fotos vem a concordar com o exposto anteriormente, que para a temperatura 60°C, a secagem é mais controlada garantindo um produto sem defeitos; para as temperaturas de secagem de 80°C e 90°C, logo no início do processo observa-se pequenas fissuras e trincas, principalmente nas regiões dos vértices do tijolo, obviamente devido ao fato que é nessas regiões onde ocorrem os maiores gradientes de umidade e de temperatura, uma vez que as mesmas estão em contato mais intenso com o ar de secagem, concordando com os resultados da literatura (Keey, 1992; Nascimento, 2002; Cadê et al., 2005; Lucena, 2005; Avelino, 2006).

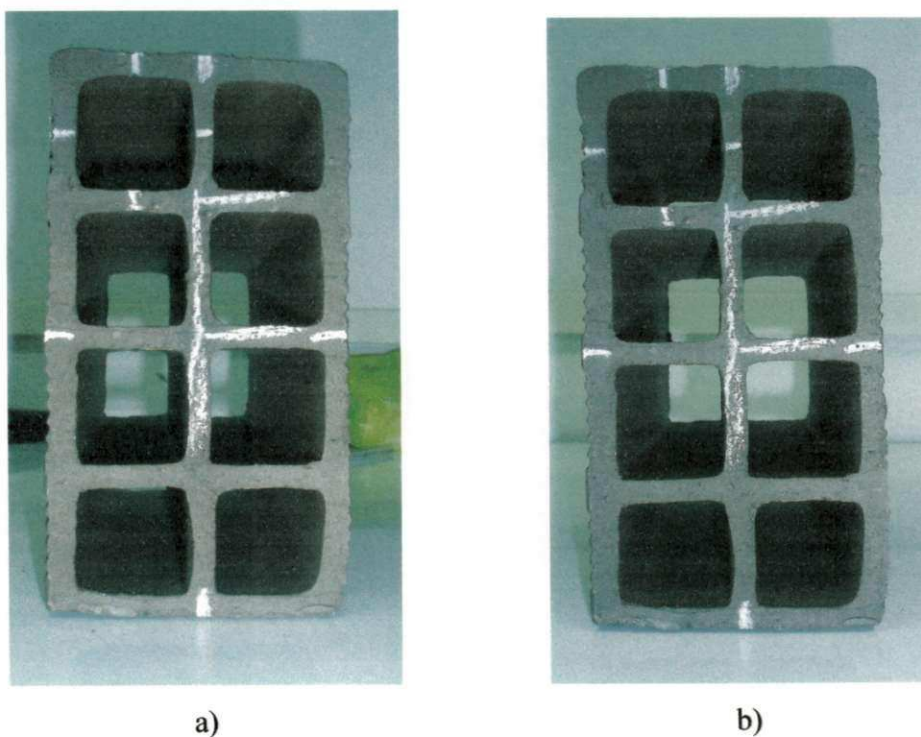
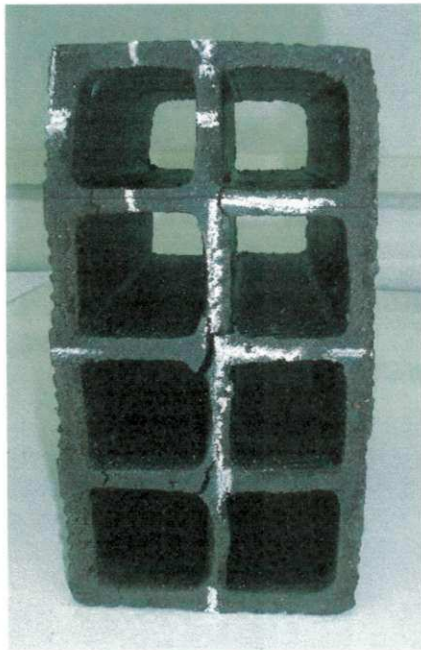
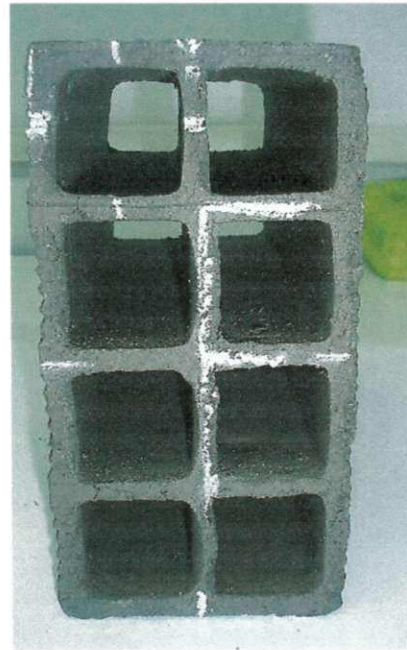


Figura 4.48 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 60°C na estufa em: a) $t = 180 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 36,3^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 26,1^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 79\%$) e b) $t = 290 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 42,6^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 26,1^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 77\%$).

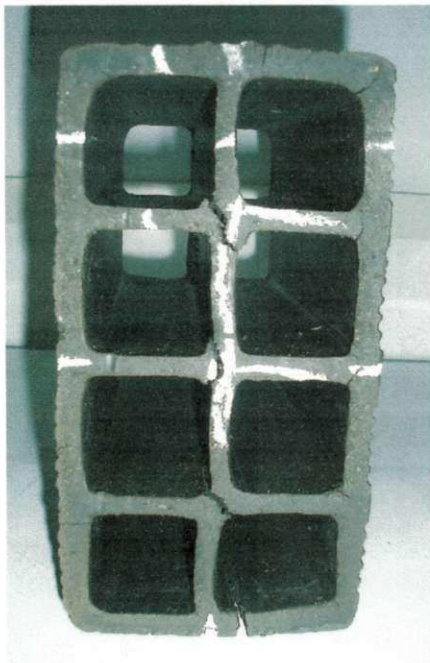


a)

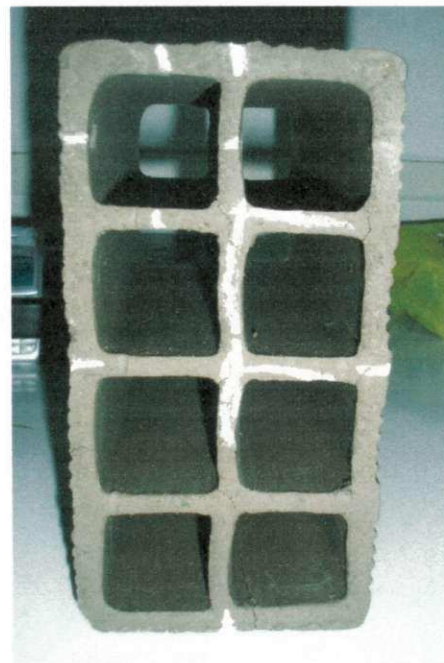


b)

Figura 4.49 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 80°C na estufa em: a) $t = 40 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 37,1^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 26,9^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 58\%$) e b) $t = 900 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 69,2^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 24,6^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 75\%$).



a)



b)

Figura 4.50 - Vista frontal da amostra submetida à secagem na temperatura constante de 90°C na estufa em: a) $t = 20 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 36^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 25,5^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 78\%$) e b) $t = 690 \text{ min}$ ($\theta_{\text{tij}} = 77,5^\circ\text{C}$, $T_{\text{amb}} = 25,5^\circ\text{C}$, $UR_{\text{amb}} = 76\%$).

Ao longo do tempo, percebe-se que as fissuras tendem a diminuir, mas isso é só na aparência. Na verdade as fissuras continuam, ocorrendo apenas a falsa impressão que elas desapareceram. Na prática, uma vez que as camadas exteriores e interiores 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, aumentando o volume do sólido. A diferença destas variações volumares de expansão e contração definem as dimensões do tijolo em qualquer instante da secagem.

4.2 Numérico

O trabalho de simulação foi desenvolvido no Laboratório Computacional de Térmica e Fluidos, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica / CCT / UFCG, em computadores de alta performance com a seguinte configuração: Intel® Xeon® CPU E5440 @ 2.83 GHz, 1.99 GB RAM, 4HD 500 GB, utilizando uma malha numérica de 20 x 36 x 22 pontos nodais. Considerou-se coeficiente de poisson $\nu = 0,35$, coeficiente de dilatação térmica linear $\alpha_{\theta} = 6.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, coeficiente de dilatação hídrica linear $\alpha_M = 0,033$ e módulo de elasticidade $E = 70.10^6 \text{ Pa}$ em todas as simulações (Itaya et al., 1997; Avelino e Lima, 2007).

4.2.1 Cinética de secagem e aquecimento do sólido

Neste tópico serão mostrados os resultados da cinética de secagem e aquecimento, e distribuição de umidade, temperatura e tensões térmicas no interior do tijolo, para a secagem à 80°C.

Posteriormente na Tabela 4.13 serão apresentados e discutidos os valores dos coeficientes de transporte difusivo e convectivo obtidos após ajuste aos dados experimentais, para cada experimento realizado.

A Figura 4.51 apresenta a comparação dos valores numéricos e experimentais do teor de umidade médio e da temperatura média adimensional do tijolo em função do tempo para uma temperatura de 80 °C. Verifica-se uma boa concordância entre os teores de umidades médios e temperaturas médias, numéricos e experimentais. Quanto a temperatura média é de se esperar a diferença com relação a temperatura na superfície do tijolo tendo em vista que o produto se aquece mais lentamente no seu interior.

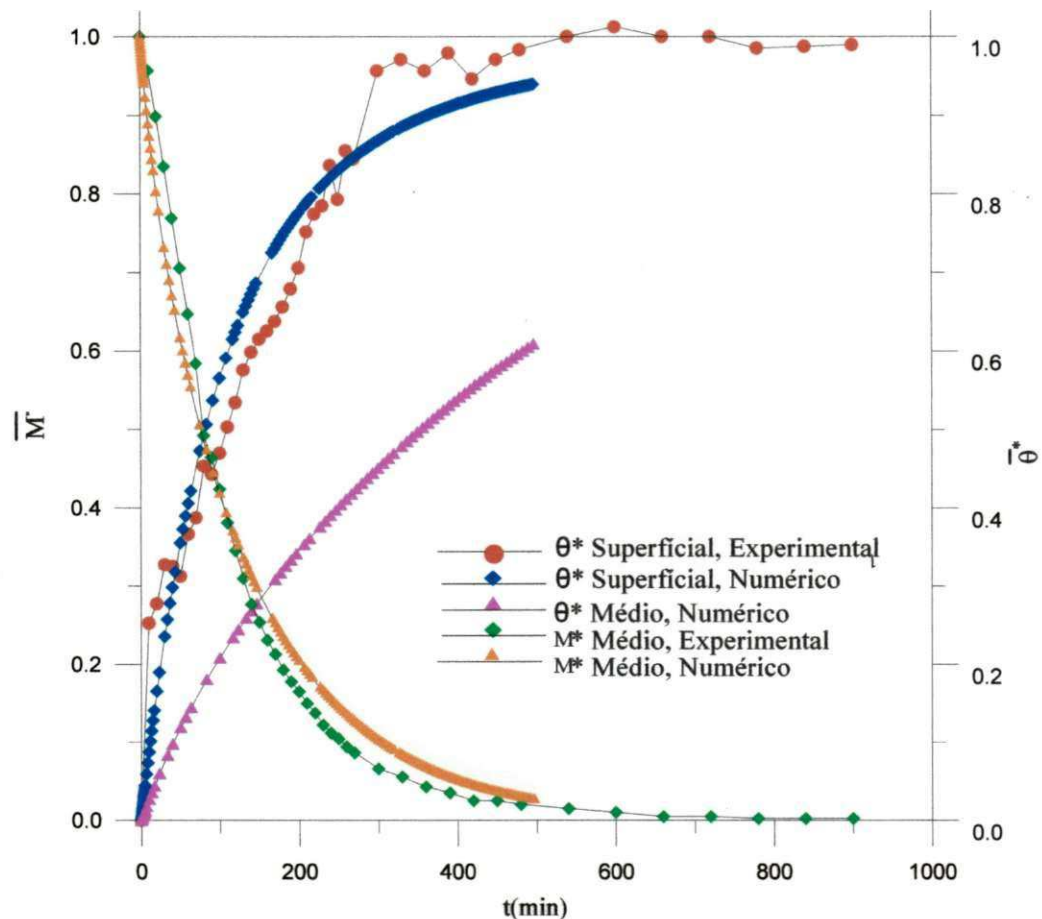


Figura 4.51 – Comparação entre o teor de umidade médio e a temperatura adimensional na superfície do tijolo em função do tempo para uma temperatura de 80 °C.

As Figuras 4.52 a 4.54 apresentam a distribuição do teor de umidade adimensional no interior do tijolo. Nas Figuras 4.55 à 4.57 estão apresentadas as distribuições da temperatura adimensional, analisadas nos planos $x = 0,02319\text{m}$ ($R_1/2$), $y = 0,04925\text{m}$ ($R_2/2$), $z = 0,05025\text{m}$ ($R_3/2$) para os tempos de 300 s, 2000 s e 8000 s, respectivamente. É importante, lembrar que, todos os resultados estão plotados para 1/8 do volume do tijolo, devido a simetria que existe no problema físico e na geometria do tijolo.

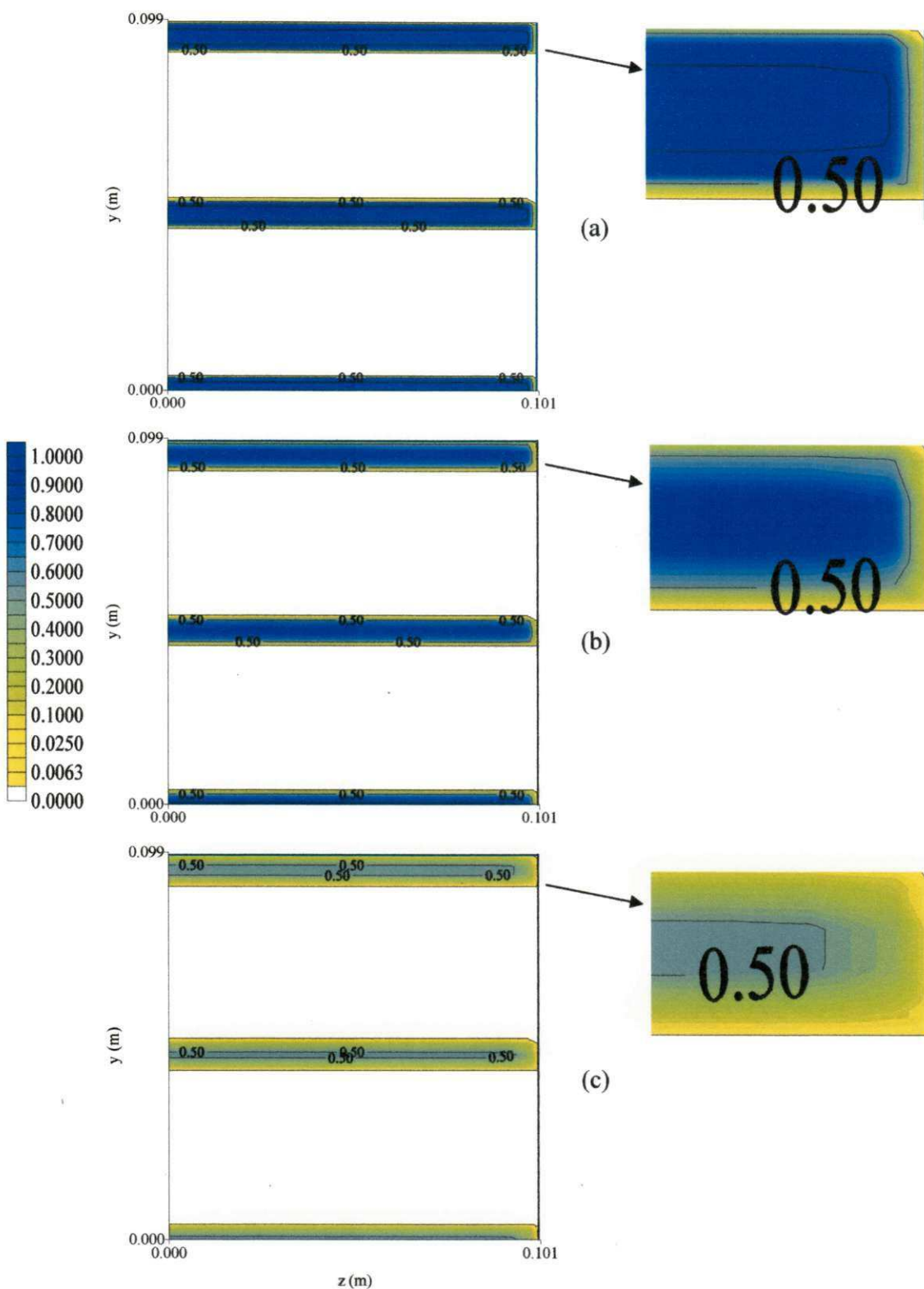


Figura 4.52 – Distribuição do teor de umidade adimensional no plano yz em $x = 0,02319$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

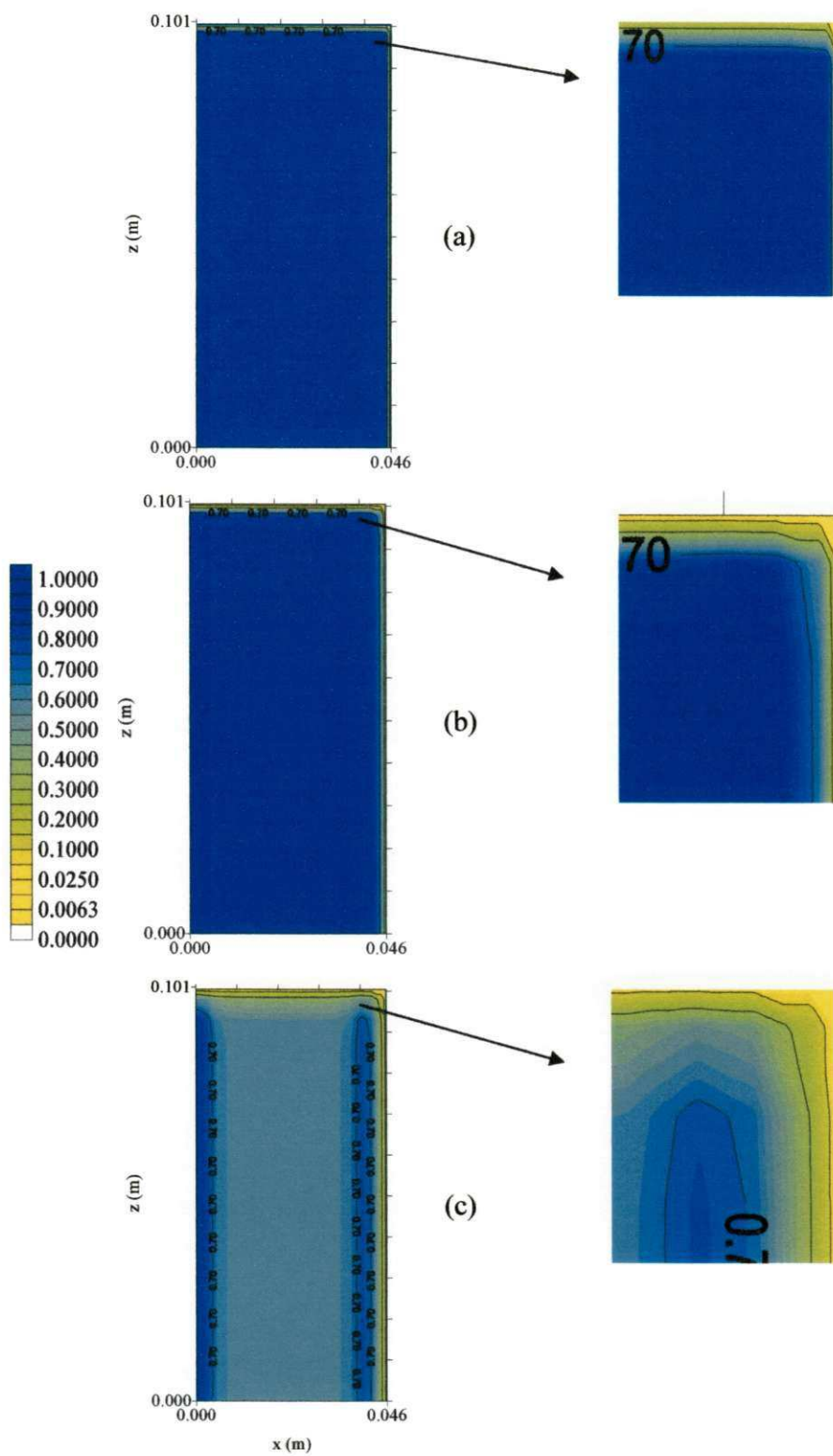


Figura 4.53 – Distribuição do teor de umidade adimensional no plano xz em $y = 0,04925$ m ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C.

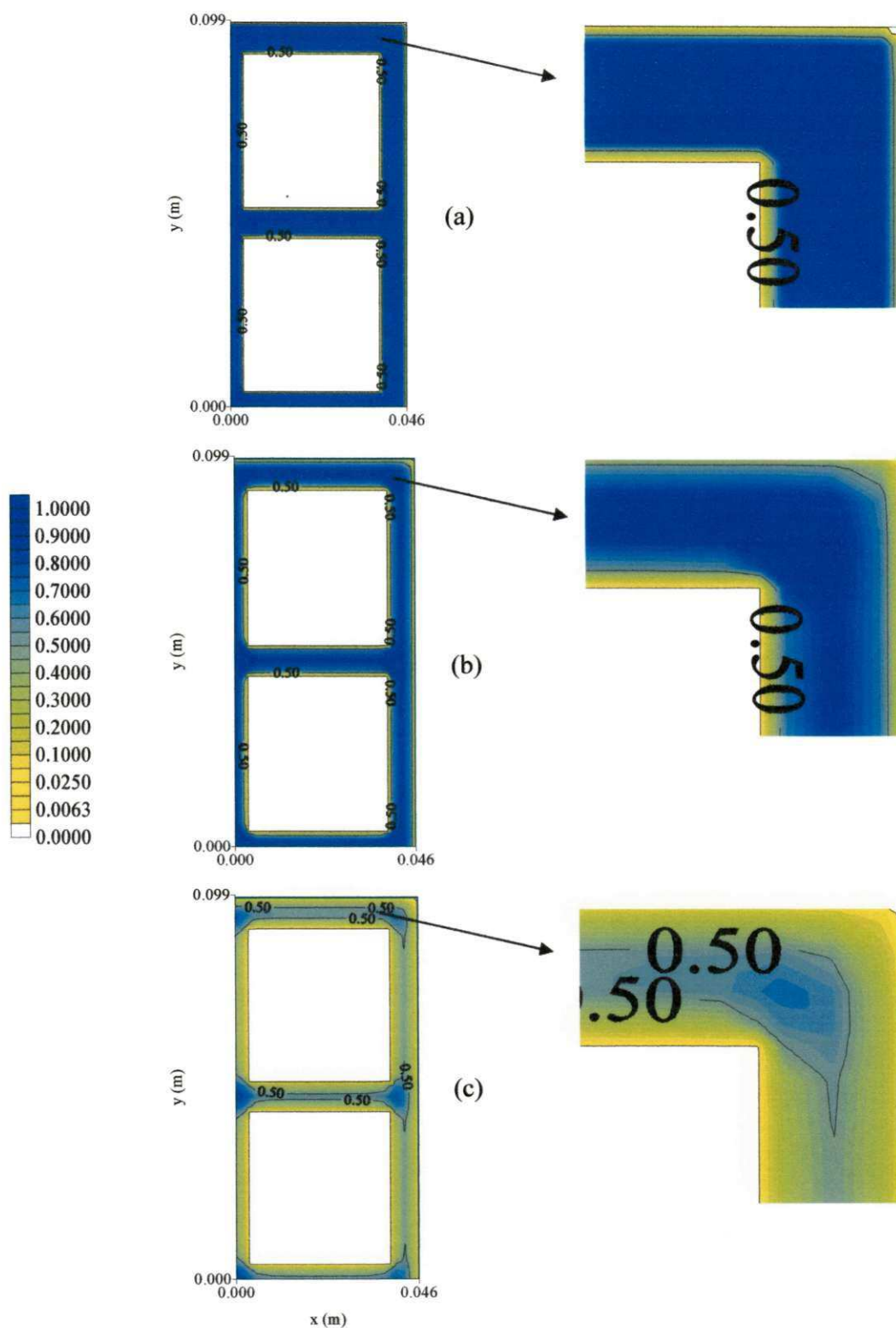


Figura 4.54 – Distribuição do teor de umidade adimensional no plano xy em $z = 0,05025$ m ($R_3/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C.

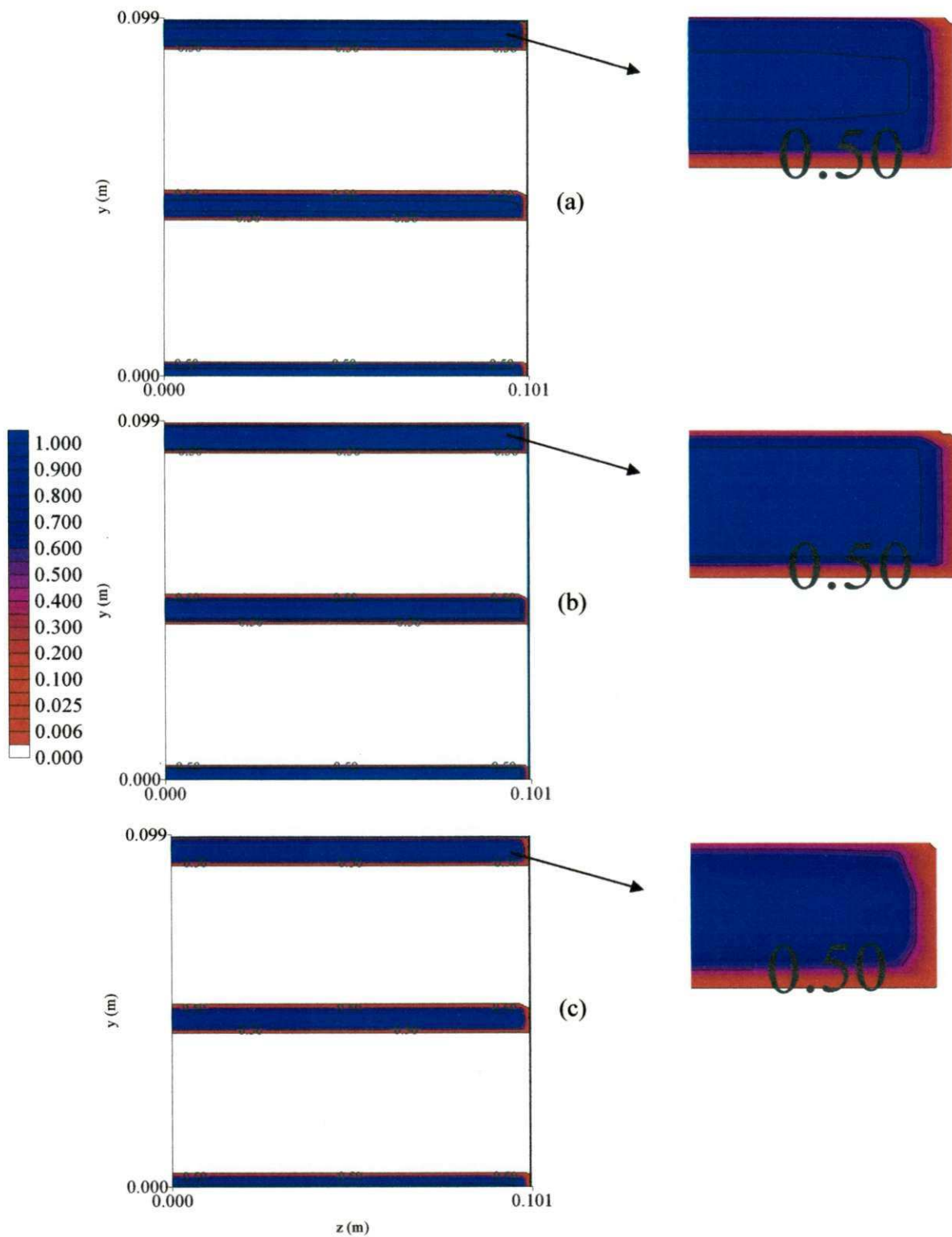


Figura 4.55 – Distribuição da temperatura $(1 - \theta^*)$ no plano yz em $x = 0,02319$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

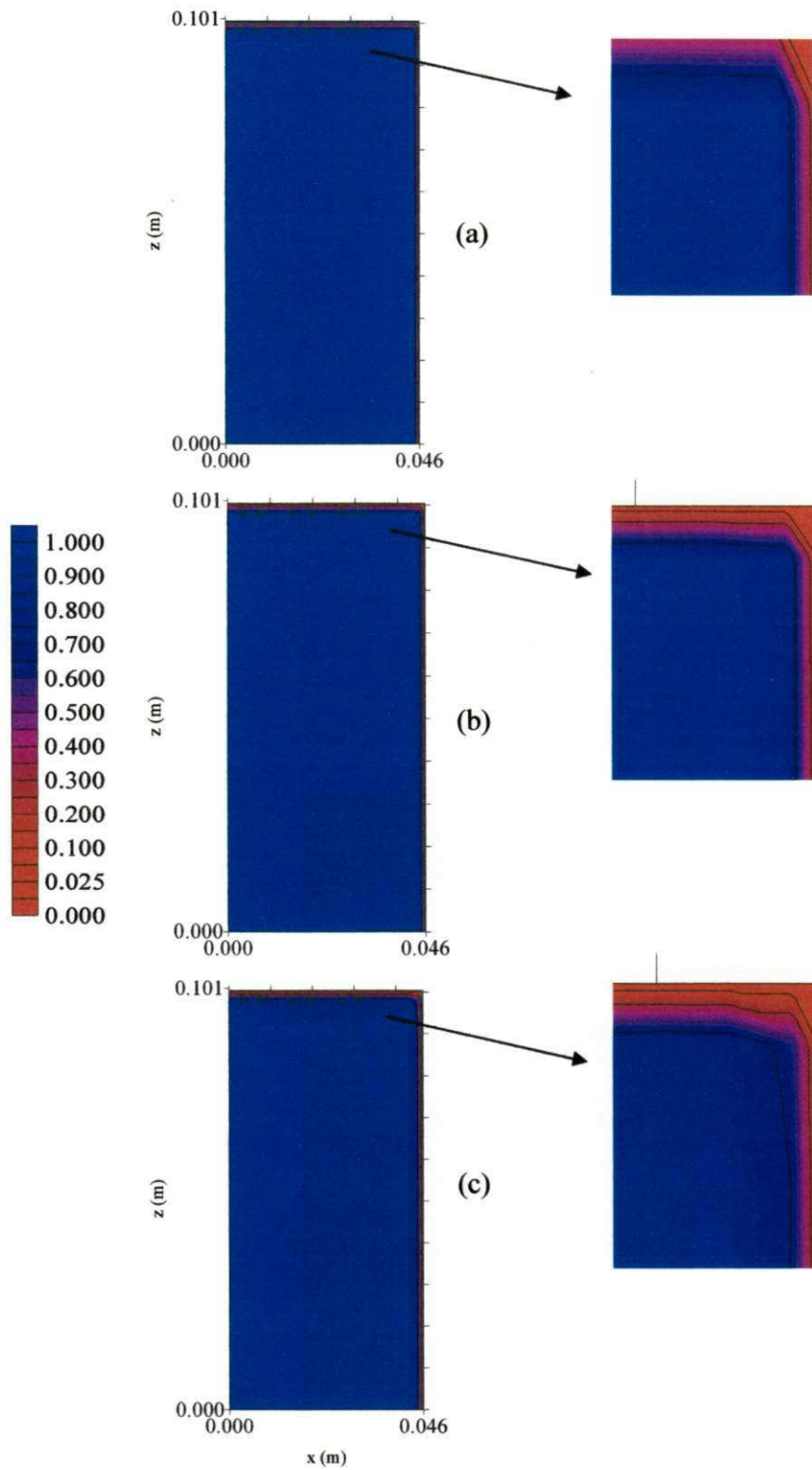


Figura 4.56 – Distribuição da temperatura ($1 - \theta^*$) no plano xz em $y = 0,04925$ m ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

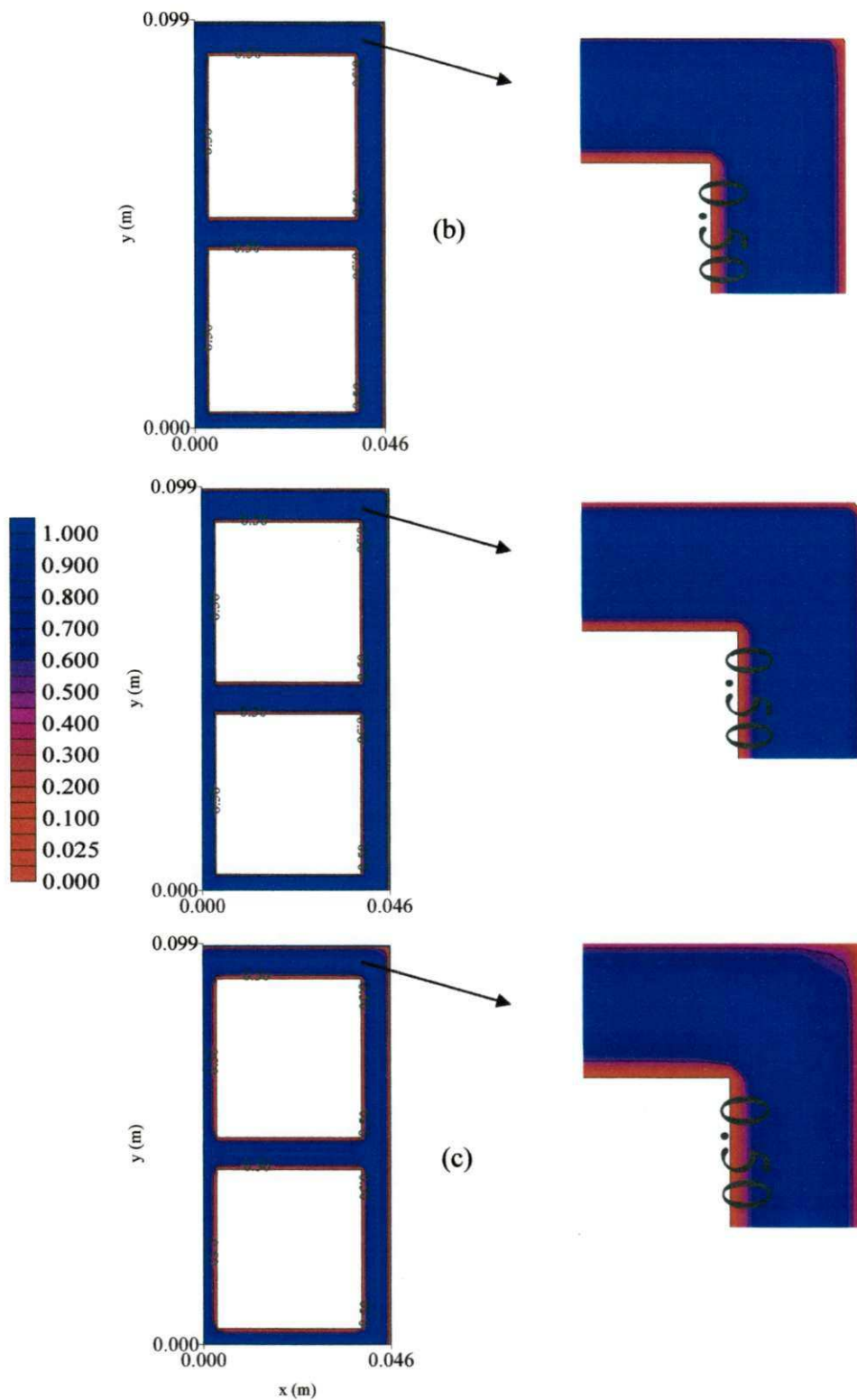


Figura 4.57 – Distribuição da temperatura $(1 - \theta^*)$ no plano xy em $z = 0,05025$ m ($R_3/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

Analisando as Figuras 4.52 à 4.57, verificou-se a existência de uma diferença do teor de umidade adimensional e da temperatura entre as regiões centrais e o vértice do tijolo. Observou-se ainda que os maiores gradientes de umidade e de temperatura estão localizados nas regiões próximas aos vértices do tijolo, uma vez que estas regiões estão em contato mais intenso com o ar de secagem, com isso as mesmas são mais susceptíveis ao aparecimento de trincas e deformações, que concordam com os resultados da literatura (Keey, 1992; Nascimento, 2002; Cadé et al., 2005; Lucena, 2005; Avelino e Lima, 2006). Fisicamente, isto é esperado, pois, estando o sólido mais exposto a uma atmosfera envolvente, tende a variar mais rapidamente o valor de M^* e θ^* nessas regiões em todos os planos e em qualquer tempo.

O teor de umidade adimensional e a temperatura adimensional apresentam os maiores resultados nas regiões centrais do material em qualquer tempo. Percebe-se também o decréscimo do teor de umidade e temperatura adimensionais ao longo do tempo, em qualquer posição, tendendo para o seu valor de equilíbrio, para tempos de secagem suficientemente longos.

A Figura 4.58 apresenta as tensões internas adimensionais σ_x^* , σ_y^* e σ_z^* no centro e na superfície externa em função do tempo para o experimento de 80°C. É possível verificar que no início do processo devido a grande variação de temperatura ocorrida no tijolo, as tensões no interior do mesmo, sofrem maior influência das tensões térmicas, sendo de compressão tanto no centro quanto na superfície externa. Com o passar do tempo, a temperatura do tijolo fica aproximadamente constante, porém a variação do teor de umidade no tijolo ainda é intensa, o que faz com que as tensões hídricas sejam mais influentes sobre σ_x , σ_y , σ_z , e estas agora passam a ser de tração nessas regiões analisadas. Os maiores valores das tensões são encontrados nas superfícies, mais exatamente nos vértices onde o material é mais frágil e quebradiço (Fricke, 1981). Por isso é importante que a secagem seja feita de maneira controlada, evitando altos gradientes de temperatura fazendo com que as tensões sejam as mínimas possíveis. Observa-se que por serem adimensionais as tensões σ_x^* , σ_y^* e σ_z^* são iguais.

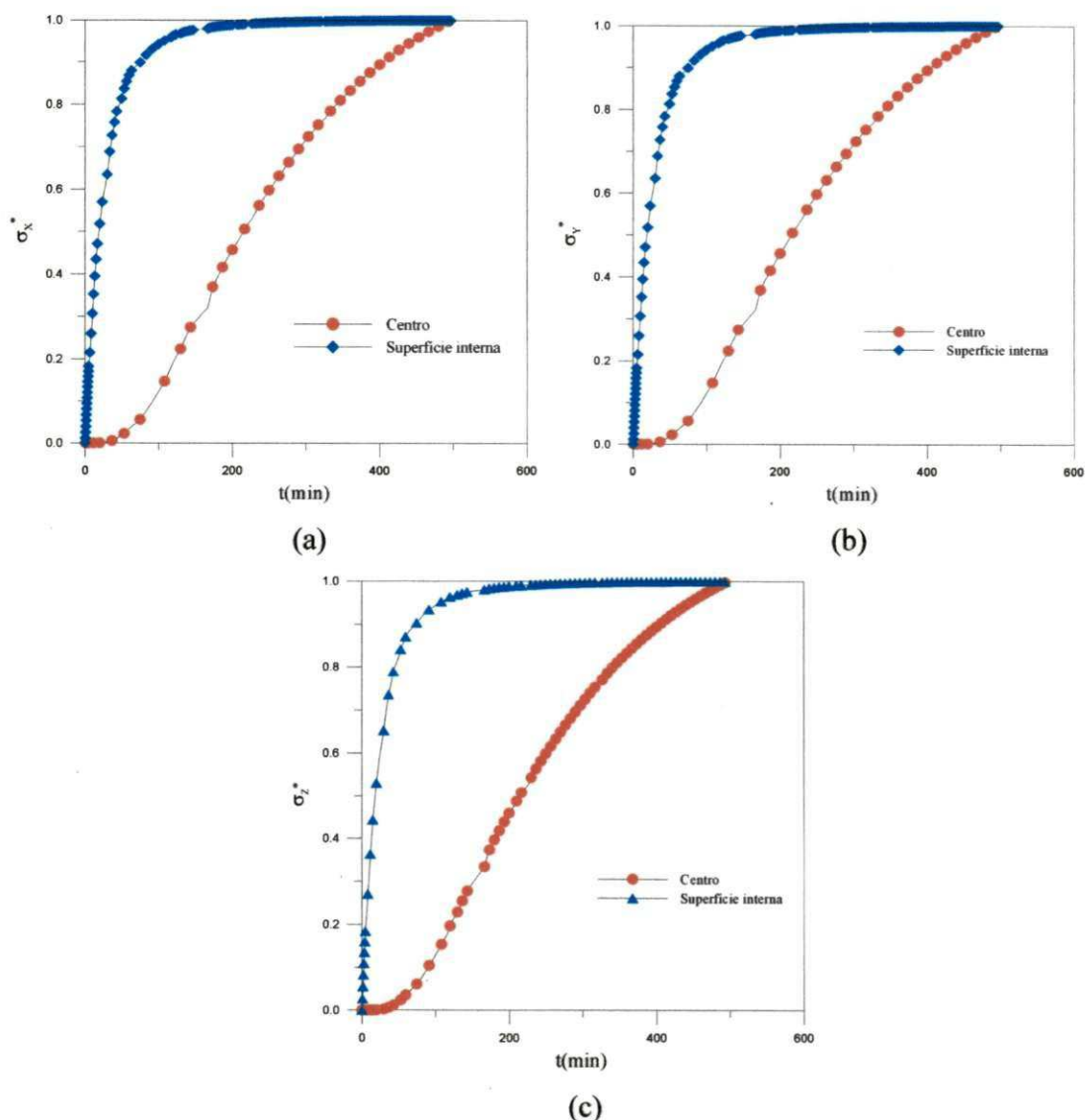


Figura 4.58 – Tensões internas adimensionais $\sigma_i^* = (\sigma_i - \sigma_{\min}) / (\sigma_{\max} - \sigma_{\min})$, $i = x, y, z$ no centro e na superfície interna em função do tempo: (a) σ_x^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 996846,71$ Pa), σ_x^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 7612,1116$ Pa, $\sigma_{\max} = 1105591,8$ Pa) (b) σ_y^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 996846,71$ Pa), σ_y^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 7612,1116$ Pa, $\sigma_{\max} = 1105591,8$ Pa) e (c) σ_z^* (centro) ($\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_{\max} = 997574,47$ Pa), σ_z^* (superfície) ($\sigma_{\min} = 10276,351$ Pa, $\sigma_{\max} = 1105594,4$ Pa).

As Figuras 4.59 à 4.61 apresentam a distribuição de tensões internas σ_x , σ_y e σ_z no tijolo, respectivamente, analisadas nos planos $x = 0,02319$ m ($R_1/2$), $y = 0,04925$ m ($R_2/2$), $z = 0,05025$ m ($R_3/2$) para os tempos de 300s, 2000s e 8000s. Verifica-se em todos os planos e tempos analisados que geram-se tensões nas superfícies e paredes internas dos furos, sendo as mesmas de tração.

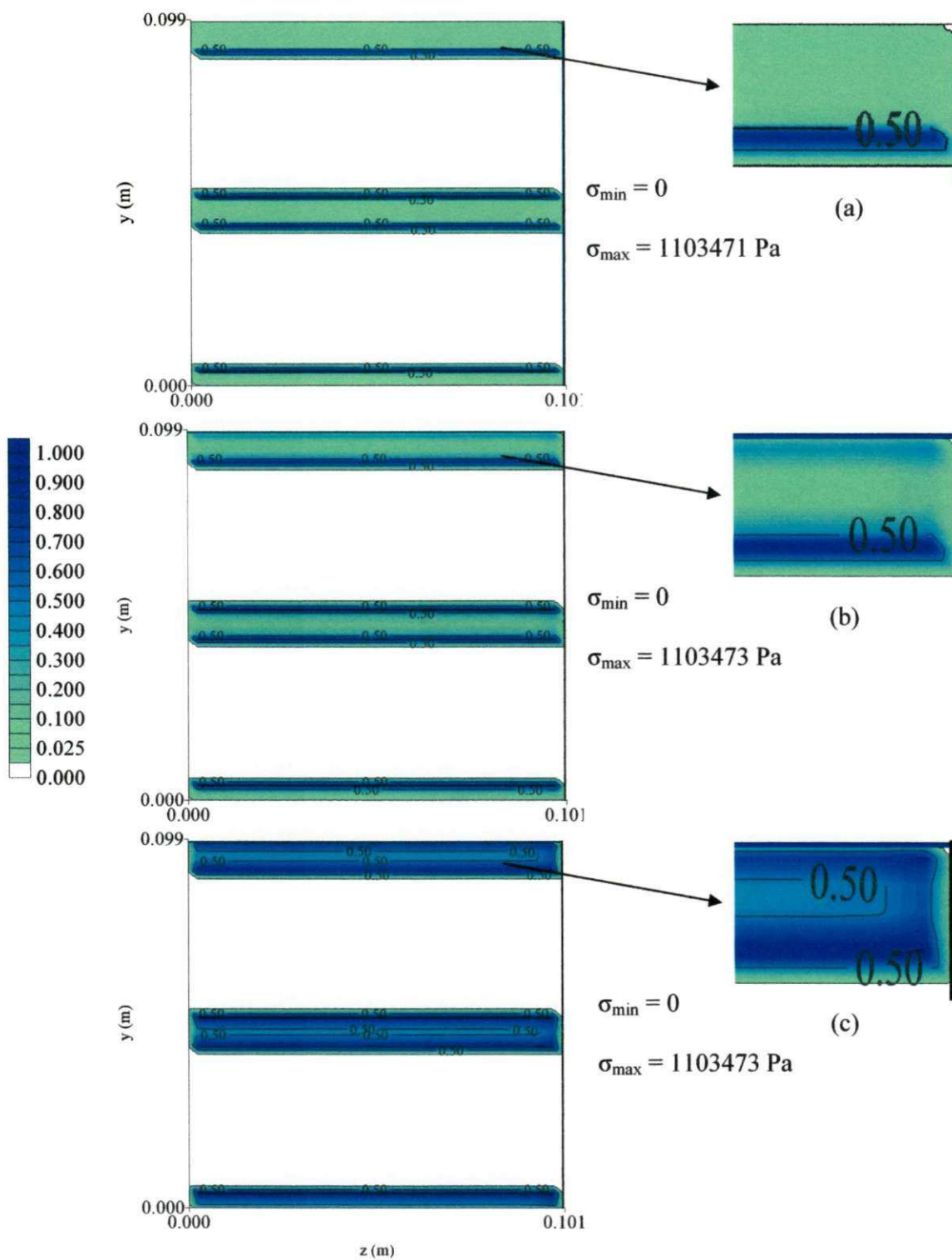


Figura 4.59 – Distribuição da tensão interna adimensional σ_x^* no plano yz em $x = 0,02319$ m ($R_1/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

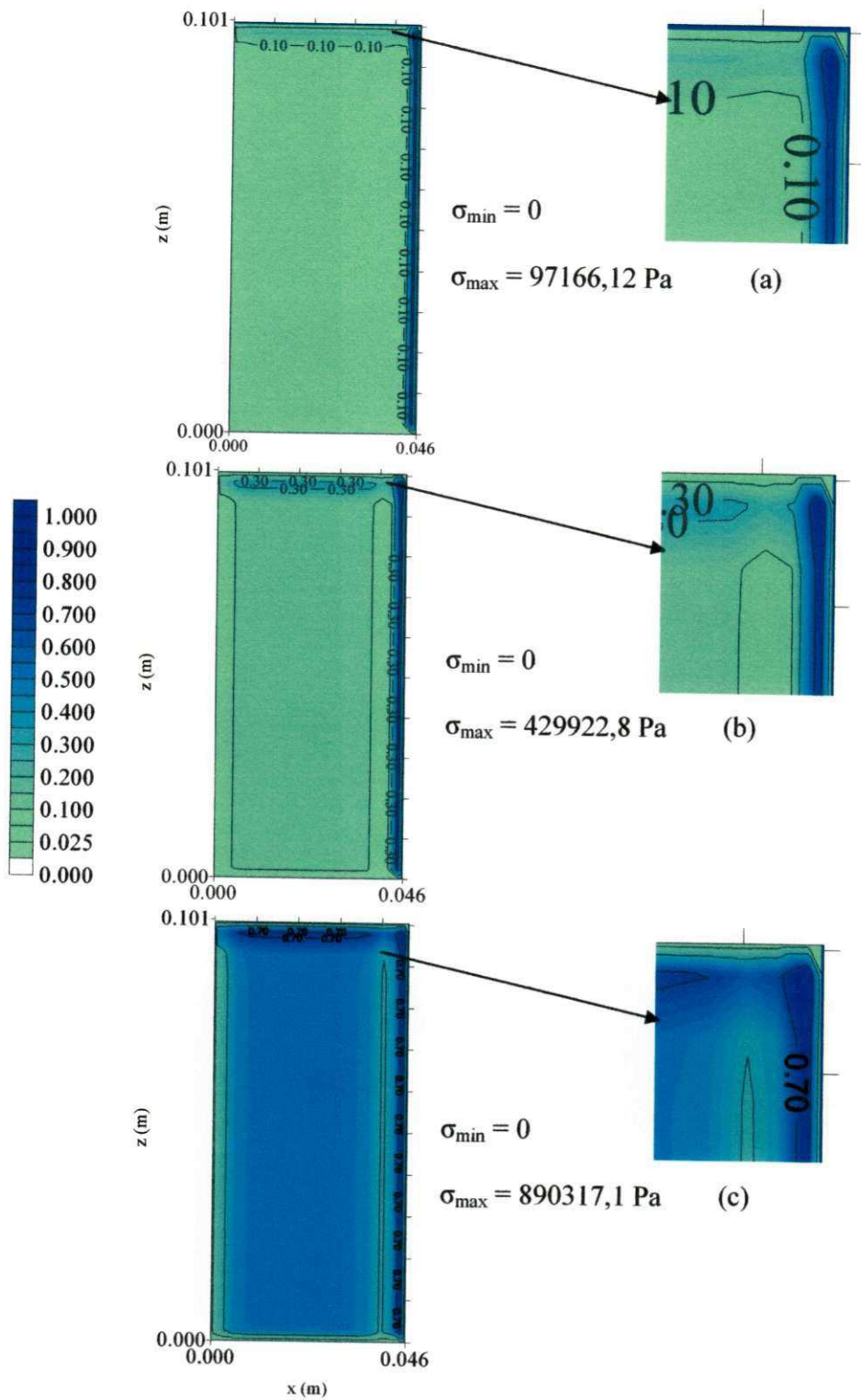


Figura 4.60 – Distribuição da tensão interna adimensional σ_y^* no plano xz em $y = 0,04925 \text{ m}$ ($R_2/2$) nos tempos: (a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

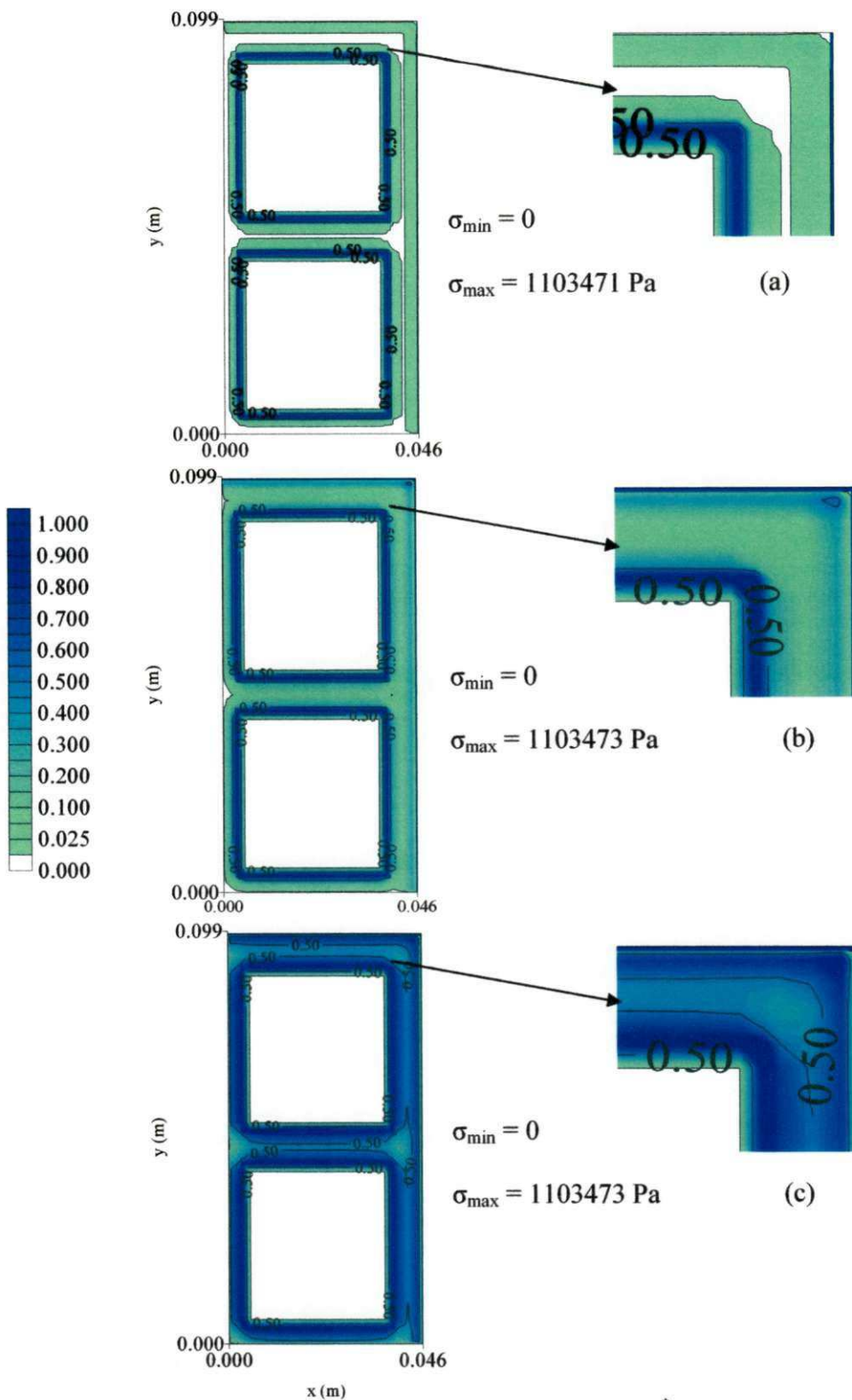


Figura 4.61 – Distribuição da tensão internas adimensional σ_z^* no plano xy em $z = 0,05025$ m ($R_3/2$) nos tempos:(a) 300 s, (b) 2000 s e (c) 8000 s para uma temperatura de secagem de 80°C .

Estes resultados obtidos para as tensões concordam com os da literatura (Hasatani e Itaya, 1992; Augier et al., 2002). Pode-se observar que no tijolo vazado os furos possuem quinas (cantos vivos), que funcionam como concentradores de tensões e sendo mais um fator que contribui para o aparecimento de trincas ou deformações indesejadas.

4.2.2 – Estimativa dos coeficientes de transporte (D , α e h_m)

As estimativas dos coeficientes de transporte foram feitas pela minimização da soma dos quadrados dos resíduos, como mencionado. A Tabela 4.13 sumariza os valores dos coeficientes de transporte, bem como do erro relativo e variância, para cada teste experimental.

Tabela 4.13 – Coeficientes de transporte estimados para cada teste experimental

Teste	$D \times 10^{-10}$ (m^2/s)	$h_m \times 10^{30}$ (m/s)	α (m^2/s)	h_c	ERMQ _M	\bar{S}_M^2	ERMQ _T	\bar{S}_T^2
50°C	4,0	2,0	ND	1,9100	0,33884	0,00237	ND	ND
60°C	0,3	1,0	ND	2,0959	0,46205	0,00323	ND	ND
70°C	0,9	1,0	ND	2,5948	0,216174	0,00151	ND	ND
80°C	8,0	1,0	$1,7 \times 10^{-10}$	2,41063	0,259069	0,00181	0,259069	0,00181
90°C	10	1,0	ND	2,55115	0,264884	0,00185	ND	ND
100°C	16	1,0	ND	2,68445	0,237956	0,00166	ND	ND

ND – Não determinado

Na Tabela 4.13, verifica-se que os coeficientes de transporte aumentam com a elevação da temperatura de secagem, exceto na temperatura de 50°C. Isso ocorre por se tratar de uma secagem bastante lenta, onde o modelo proposto não se ajustou bem a tais condições de secagem.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

De acordo com os resultados obtidos na secagem de tijolos cerâmicos vazados, pode-se concluir que:

a) Experimental

- 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_3) 24% e feldspato (Fe_2O_3) 9%.

- É importante controlar a velocidade de aquecimento e resfriamento para evitar deformações, fissuras ou quebra de peças, que comprometem a qualidade do produto;
- Temperaturas do ar de secagem elevadas e umidades relativas mais baixas implicam que o material seca mais rápido;
- O tijolo tem um processo de secagem mais prolongado à medida que o coeficiente de transferência de calor e/ou massa diminui. Portanto as condições do ar de secagem (velocidade, umidade, etc.) são características importantes de serem observadas e controladas;
- Para temperaturas de 50°C e 60°C e umidades relativas de 20,8% e 13,5% respectivamente a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de defeitos no produto;
- Para todas as temperaturas de secagem avaliadas (50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C), no início do processo há uma grande remoção de umidade, assim, as dimensões do sólido mudam com velocidade mais alta até a velocidade de encolhimento tender a zero, além disso, essa variação de volume é mais intensa em altas temperaturas de secagem (100°C);
- Devido a intensa retirada de água dos tijolos e ao considerável aquecimento dos mesmos nas temperaturas de secagem de 80°C, 90°C e 100°C, surgem altos gradientes de temperatura e umidade no interior do tijolo que geram tensões termo-hídricas, ocasionando grandes fissuras e trincas, principalmente nas regiões dos vértices e paredes internas dos furos principalmente no início do processo, diminuindo aparentemente com o tempo de processo devido as contrações da camada exterior e superior, e o aquecimento do tijolo.
- As equações propostas para a cinética de secagem, variação volumétrica e encolhimento mostraram um bom ajuste, onde são evidenciados uma boa

concordância entre os valores experimentais e preditos, caracterizados por coeficiente de correlação próximos de 1,0.

b) Numérico

- O método dos volumes finitos mostrou-se adequado durante a discretização da equação de difusão no sistema de coordenadas cartesianas. Sendo possível analisar fenômeno de transferência de calor e massa, retração volumétrica e tensões termo-hidro-mecânica no tijolo;
- Os resultados numéricos apresentaram uma boa concordância com os dados experimentais do teor de umidade dos tijolos submetidos à secagem, mostrando assim que a metodologia usada para estimar os coeficientes de transporte é satisfatória.
- O coeficiente de difusão de massa mostrou-se dependente da temperatura do ar de secagem, variando de $0,3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 60°C até $16 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ na temperatura de 100°C tendendo a aumentar com o acréscimo da mesma.
- As tensões principais internas no centro e na superfície do tijolo são de tração durante toda a secagem variando de $\sigma_{x(\min)} = \sigma_{y(\min)} = \sigma_{z(\min)} = 0$ no centro da peça até $1105594,4 \text{ Pa}$ na posição (np_x-1, np_y-1 e np_z-1);
- Os maiores valores das tensões principais são encontrado nas superfícies, principalmente nas arestas, onde os gradientes de umidade e temperatura são mais altos, podendo ocorrer trincas e deformações que interferem na qualidade do produto.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Aplicar os modelos apresentados à secagem de outros produtos como tijolos de 10 e 12 furos, usados em construção civil como peças estruturais (construção de colunas).
- Estudar as tensões em blocos cerâmicos com diversos tipos de geometria além dos efeitos causados por elas.
- Estudar a nível de micro-estrutura toda estrutura de um bloco cerâmico (maciço e/ou vazado), analisando seus componentes minerais afim de se obter informações que visem o preparo de uma massa cerâmica com uma melhor composição, aumentando a qualidade do produto.
- Realizar estudos sobre os rejeitos de uma indústria cerâmica afim de se obter um produto que ofereça uma boa resistência, capaz de ser usado na construção civil, evitando assim o desperdício do matéria que sofreu avaria e foi classificado como entulho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABC (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERAMICA). **Cerâmica no Brasil: introdução**. Disponível em:< http://www.abceram.org.br/asp/abc_21.asp >. Acesso: 10/12/2005.

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

ALBURQUERQUE, P. J. R. **Materiais cerâmicos**. Dissertação de mestrado – FACENS – 2000.

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

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.

ALVES, H. J.; MELCHIADES, F. G.; BOSCHI, A. O. **Consumo de gás natural na indústria de revestimentos cerâmicos brasileira**. Disponível em: < www.scielo.br/pdf/ce/v54n331/a0954331.pdf >. Acesso: 12/01/2010.

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

ARTE BRASIL MATERIAIS. **Secagem de peças cerâmicas**. Disponível em: <<http://www.artebrasilmateriais.com.br>>. Acesso em: 22/01/2006.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G B. de. **Simulação numérica do transporte de calor e massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados**. In: Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2, 2006, Campina Grande.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G B. de. **Estudo das tensões durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados: modelagem e simulação**. Revista Pesquisa, v.1, n.5, pp 635 – 652, 2007.

AUGIER, F.; COUMANS, W. J.; HUGGET, A.; KAASSCHIETER, E. F. On the risk of cracking in clay drying. **Chemical Engineering Journal**, v.86, p. 133-138, 2002.

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. 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.; 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.

BAUER, L. A.F. **Materiais de construção** 2 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1994.935p.

BELLINGIERI, J. C. **A indústria cerâmica em São Paulo e a “invenção do filtro de água: um estudo sobre cerâmica Lamparelli” Jabotical (1920-1947)**. UNESP, Araraquara/SP, 2003. Disponível em: www.abphe.org.br/congresso2003/doc/programa.doc.

BOUCKAERT, P. H. P. **Utilização de energia para secagem na indústria de cerâmica vermelha**. 1992. 136f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Nuclear), Universidade Federal de Pernambuco.

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

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

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

CAVALIERE, A. S.; RAAD, A.; OLIVEIRA, L. C. **Conservação de energia nas pequenas e médias indústrias no Estado do Rio de Janeiro: setor de cerâmica vermelha**. [Rio de Janeiro: SEBRAE/RJ], dez. 1997. Relatório Final do Projeto Conservação de Energia: Estudos Setoriais Aspectos Econômicos e Tecnológicos. Cerâmica, diversos anos.

CNI (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIAS)-SENAI. **Manual técnico para diagnóstico energético em indústrias de cerâmica vermelha**. Florianópolis, FIESC, 2008.

CAMPREGHER, N. 2005. **Estudo de Viabilidade da Incorporação do Lodo da Estação de Tratamento de Efluentes da Indústria de Papel, Celulose e Aparas em**

Material Cerâmico. Florianópolis, SC. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, 73 p.

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

FERNANDES, D. M. P. **Design e tecnologia aplicados a produtos domésticos em grês cerâmico.** Florianópolis, 1998. 212f. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina.

FIGLIOLA, R.; BEASLEY, D. **Theory and design for mechanical measurement.** ed. John Wiley and Son, 1995.

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

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

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

GONÇALVES, J. A. S. **Materiais de construção para seu projeto.** Coleção Aprendendo a Construir, 2003.

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.

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

HIBBELER R. C. **Resistência dos Materiais.** Pearson Education, 2004.

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

ITAYA, Y.; TANIGUCHI, S. and HASATANI, M., **A numerical study of transient deformation and stress behavior of a clay slab during drying**, Drying Technology, Vol. 15, No 1, pp 1-21, 1997.

KARATANOS, V. T.; VAGENAS, G. K.; SARAVACOS, G. D. **Water diffusivity in starches at high temperatures and pressures**. Biotechnol Progress, v.7, 1991, pp. 178-184.

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, 502 p.

KETELAARS, A. A. J.; JOMAA, W.; PURIGGALI, J. R.; COUMANS, W. J., **Drying shrinkage and stress**, International Drying Symposium, A, pp 293-303, 1992a.

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 1992b, Part A, pp. 345-352.

KEUM, Y. T.; JEONG, J. H.; AUN, K. H. **Finite element simulation of ceramic drying processes**. Modelling Simulation in Materials Science and Engineering. UK, v.8. p. 541-556, 2000a.

KEUM, Y. T.; J. H.; KIM, J. H.; GHOO, B. Y. **Computer aided design of electric insulator**. Journal of Ceramic Processing Research. UK, v.1, n.1, p. 74-79, 2000b.

KEUM, Y. T.; OH, W. J.. **Finite element simulation of ceramic drying process considering pore shape and porosity**. Modelling Simulation in Materials Science and Engineering, v.13, p. 225-237, 2005.

KRAUSE, E. **Manuels de technologie de ceramique industrielle lê sechage en ceramic priciples e techniques**. Paris: Septima, 1977. pp 11-147.

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.; MATA, S. F. **Secagem de casulos do bicho-da-seda: Modelagem e simulação**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola/ Congresso Latinoamericano de Engenharia Agrícola, 1996. Bauru.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolatos. Estudo de caso: secagem de bananas**. 1999. 256p. Tese (Doutorado), UNICAMP, S.P.,

LUCENA, C, G. **Transporte de massa durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados via volumes finitos**. Campina grande: Universidade Federal de Campina Grande, centro de ciências e tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, 2005. Trabalho de conclusão de curso.

LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary porous bodies**. New York: Pergamon Press, 1966, 523p.

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**.

MAFRA, A. T. **Proposta de Indicadores para a indústria de cerâmica vermelha.** 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis. Disponível em: <<http://www.eps.ufsc.br>>.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional.** Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos, Editora S.A, 2004.

MEDEIROS, B.L. **Secagem de argilas com ar quente produzido por radiação solar.** João Pessoa, 1977. 67f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal da Paraíba.

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos. Estudo de Caso: Secagem de materiais cerâmicos,** 2002. 207 p. Tese de doutorado em Engenharia Mecânica. DTM/CT/UFPB.

NASCIMENTO, J. J. S.; 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.

NEVES, G. A. **Processamento de materiais cerâmicos** – Curso de Treinamento em Grês Sanitário-Celite-Recife-PE, 1999.

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.

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

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, A. P. N.; MONTEDO, O. R. K.; PIZETE, J, CASAGRANDE, M. **Matérias-primas empregadas na fabricação de tijolos e blocos de construção: características e influências sobre as propriedades do produto final,** 2005. Universidade Federal de Santa Catarina UFSC, Departamento de Engenharia Mecânica.

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 11 de novembro 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.

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. 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.

PAULETTI, M. C. **Modelo para introdução de nova tecnologia em agupamentos de micro e pequenas empresas: estudo de caso da indústrias de cerâmica vermelha no**

Vale do Rio Tijucas. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de pós-graduação em engenharia de produção, Florianópolis, 2001.

PRECERÂMICA, P. Foto: **Extração da argila; Extrusão de tijolos; Estufa para secagem; Armazenamento.** Disponível em: < www.preceram.pt/ >. Acesso em: 15/01/2005.

REED J. S., **Drying**, ASM International Handbook Committee, 1991, p. 131-134.

ROSSI, M. A. P. **As argilas.** 2004. Disponível em <www.portorossi.art.br/> Acesso em 07/08/2009.

SANCHEZ, E.; BARBA, A. **Defeitos em revestimentos cerâmicos: suas causas e soluções.** Laboratório de Revestimentos Cerâmicos – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA) – Universidade Federal de São Carlos (UFCar), 1998.

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

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.

SARAVACOS, G. D.; KOSTAROPOULOS, A. E. **Transport properties in processing of fruits and vegetables**. Food Technology, p. 99- 105, September 1995.

SECTME. **Diagnóstico do setor de cerâmica vermelha em Santa Catarina**. Florianópolis, Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia das Minas e Energia de Santa Catarina, 1990.

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.

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.

STEIL, O. S. **Energia do gás natural em fornos de cerâmica estrutural**. Florianópolis: SCGÁS, jul. 2000. (Projeto).

STRUMILLO, C.; KUDRA, T., 1986. **Drying: principles, science and design**. Gordon and Breach Science Publishers, New York, USA, 448p.

SUDENE e ITEP. **Conservação de energia do setor industrial: cerâmica estrutural**. Recife, 1996.

SU, Shun-Lung. **Modeling of multi-phase moisture transfer and induced stress in drying clay bricks**, Applied Clay Science, v. 12, pp 189-207, 1997.

TAPIA, R. E. C.; VILAR, S.C. **Manual para a indústria de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro, 2000. (Série Uso Eficiente de Energia).

TELLJOHANN, U. Influence of dryer atmosphere on the danger of drying cracks and dryer scumming. **Ziegelindustrie International**. v. 56, n. 3, p. 12-18, 2003.

TIMOSHENKO, S. P., GOODIER, J. N., **Teoria da elasticidade**. 3ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1980.

TOMAZETTI, R. R. **Análise da produção de cerâmica vermelha da região central do estado do rio grande do sul**. UFSM, 2003.

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.

VAN DER ZANDEN, A.J.J. (1997), **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.

VESTEEG, H. K.; MALLASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The finite volume method**, Londres, Prentice Hall-Longman Group, 1995.

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

VILLAR, V. S. **Perfil e perspectivas da indústria de cerâmica vermelha do Sul de Santa Catarina**. 1988. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, Florianópolis.

WITTEWER, 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.

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.

APÊNDICE

Tabela A1- Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 50°C e umidade relativa média de 20,8%

T (min)	R (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	a ₃ (mm)	a ₄ (mm)	m (g)	T _{tij} (°C)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	93,36	197	200	9,04	7,10	7,88	6,30	2978	20,6	26,1	76
10	93,23	197	200	8,71	6,91	7,77	6,31	2967	25,2	26,1	74
20	93,18	196	199	8,90	7,01	7,66	6,18	2955	28,5	26,4	72
30	93,04	196	198	8,93	6,84	7,67	5,99	2944	28,5	26,4	69
40	92,90	196	198	8,81	6,93	7,44	5,97	2935	28,8	26,3	69
50	92,66	195	198	8,76	6,79	7,42	5,88	2922	29,1	26,6	68
60	92,47	195	197	8,77	6,65	7,46	5,85	2907	29,1	26,6	68
70	92,43	194	196	8,74	6,74	7,41	5,81	2898	29,6	26,8	67
80	92,31	194	196	8,62	6,74	7,31	5,78	2886	29,6	26,9	67
90	92,10	194	195	8,70	6,66	7,31	5,80	2874	29,2	26,6	67
100	91,91	194	195	8,65	6,73	7,30	5,84	2864	29,7	26,6	67
110	91,80	193	194	8,61	6,80	7,30	5,85	2852	30,7	26,5	68
120	91,66	193	194	8,53	6,61	7,26	5,83	2841	29,8	26,6	68
130	91,43	193	194	8,43	6,78	7,24	5,81	2830	29,7	26,8	68
140	91,23	192	193	8,32	6,65	7,26	5,77	2822	29,8	26,8	68
150	91,14	192	193	8,21	6,63	7,24	5,70	2811	30,9	26,8	69
160	90,90	192	193	8,17	6,58	7,24	5,72	2803	31,3	26,9	71
170	90,80	192	193	7,96	6,67	7,20	5,74	2794	31,5	26,9	72
180	90,66	191	192	8,09	6,75	7,45	5,80	2794	30,8	26,9	73
190	90,50	191	192	8,06	6,73	7,19	5,72	2774	30,9	26,9	74
200	90,53	190	192	8,10	6,64	7,20	5,74	2766	30,6	26,8	74
210	90,49	190	192	8,08	6,63	7,30	5,76	2759	31,7	26,8	74
220	90,18	190	192	8,05	6,73	7,22	5,72	2752	31,1	26,9	74
230	90,21	190	192	8,05	6,65	7,21	5,73	2743	32,6	26,6	74
240	89,98	189	192	8,05	6,62	7,26	5,72	2736	32,3	26,6	74
250	89,89	189	192	8,22	6,61	7,22	5,72	2731	32,8	26,6	74
260	89,84	189	192	8,16	6,65	7,29	5,69	2724	33,6	26,4	74
270	89,73	189	191	7,97	6,58	7,30	5,69	2718	33,8	26,3	74
280	89,72	189	191	7,92	6,68	7,44	5,68	2712	34,1	26,3	74
290	89,63	189	191	7,84	6,73	7,33	5,74	2708	34,4	26,1	75
300	89,53	189	191	7,82	6,58	7,40	5,64	2702	34,2	26,0	75
310	89,53	189	191	7,80	6,66	7,33	5,68	2699	34,4	26,0	76
320	89,47	189	191	7,82	6,58	7,35	5,66	2694	33,7	25,9	76
330	89,42	189	191	7,74	6,60	7,20	5,66	2681	36,5	25,9	77
360	89,40	188	191	7,77	6,68	7,18	5,66	2670	37,3	25,6	78
390	89,34	188	191	7,72	6,55	7,20	5,66	2661	38,4	25,6	80
420	89,38	188	191	7,71	6,59	7,20	5,66	2651	39,4	25,4	81
450	89,36	188	191	7,72	6,63	7,20	5,65	2649	39,0	25,4	81
480	89,34	188	191	7,73	6,56	7,17	5,66	2644	39,1	25,4	79
510	89,36	188	191	7,70	6,68	7,17	5,71	2640	40,3	25,4	80
540	89,32	188	191	7,73	6,63	7,20	5,76	2637	40,8	25,5	81
570	89,32	188	191	7,73	6,76	7,18	5,74	2633	40,3	25,4	81
630	89,36	188	191	7,66	6,58	7,25	5,71	2629	41,2	25,6	85
690	89,30	188	191	7,62	6,61	7,15	5,61	2626	40,4	25,6	87
750	89,32	188	191	7,62	6,57	7,24	5,61	2624	40,5	25,6	86
810	89,34	188	191	7,66	6,62	7,26	5,63	2620	40,9	25,4	84
870	89,32	188	191	7,71	6,65	7,23	5,65	2620	40,9	25,3	83
930	89,31	188	191	7,67	6,70	7,25	5,65	2619	41,8	25,1	84
990	89,31	188	191	7,62	6,64	7,15	5,70	2618	41,2	25,0	83
1110	89,28	188	191	7,58	6,82	7,12	5,64	2616	41,0	25,1	84
2550	89,25	188	190	7,51	6,96	7,31	5,77	2613	40,5	25,3	85
3990	89,26	188	190	7,60	6,58	7,15	5,65	2613	41,3	24,9	88

Tabela A2 - Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 60°C e umidade relativa média de 13,58%

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)	T _{tij} (c)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	92,75	195	200	8,34	7,32	7,11	6,45	2995	20,5	25,6	83
10	92,55	195	200	8,35	7,31	7,08	6,20	2982	25,7	25,8	82
20	92,38	194	199	8,25	7,25	7,02	6,09	2967	27,7	25,8	82
30	92,22	194	199	8,18	7,23	7,00	6,08	2951	28,6	25,8	81
40	92,09	193	198	8,16	7,17	6,96	6,02	2935	29,8	25,9	82
50	91,87	193	197	7,98	7,18	6,96	6,00	2921	30,9	25,9	81
60	91,75	192	196	7,95	7,15	6,94	5,96	2906	29,2	25,9	81
70	91,6	192	195	8,04	7,50	6,91	6,06	2891	31,7	25,9	81
80	91,53	191	194	7,92	7,42	6,90	5,87	2878	31,3	25,9	81
90	91,31	191	194	8,02	7,38	6,91	5,86	2863	32,0	25,9	81
100	91,12	191	194	7,90	7,39	6,89	5,92	2848	31,3	25,9	81
110	90,87	190	194	7,91	7,22	6,90	5,96	2832	32,5	25,9	79
120	90,7	190	193	7,87	7,10	6,89	5,92	2820	32,7	25,9	79
130	90,48	189	193	7,98	7,29	6,90	5,97	2806	33,2	25,9	78
140	90,45	189	193	7,99	6,90	7,12	6,02	2792	34,0	25,9	78
150	90,16	189	193	7,92	6,86	7,01	5,76	2777	35,3	25,9	79
160	90,03	189	193	8,03	6,81	6,90	5,68	2768	35,2	26,0	79
170	89,88	188	193	8,26	7,07	7,14	5,83	2758	35,2	26,1	78
180	89,82	188	192	7,87	6,77	6,93	5,70	2747	36,3	26,1	79
190	89,72	188	192	8,08	6,80	6,97	5,66	2738	36,5	26,1	79
200	89,66	188	192	7,85	6,81	6,91	5,74	2731	37,5	26,1	79
210	89,54	188	192	7,89	6,75	6,93	5,65	2723	37,3	26,4	76
220	89,45	188	192	7,89	6,77	6,91	5,69	2715	37,8	26,3	78
230	89,45	188	192	7,82	6,82	6,93	5,68	2708	38,7	26,1	76
240	89,45	188	192	7,83	6,85	6,85	5,70	2702	39,5	26,3	76
250	89,45	188	192	7,86	6,75	6,90	5,73	2696	40,5	26,3	77
260	89,34	188	192	7,84	6,78	6,90	5,76	2690	40,9	26,3	77
270	89,4	187	192	7,83	6,79	6,90	5,66	2686	41,7	26,1	77
280	89,39	187	192	7,81	6,78	6,82	5,75	2680	42,2	26,1	77
290	89,35	187	192	7,78	6,81	6,90	5,72	2676	42,6	26,1	77
300	89,32	187	192	7,77	6,86	6,82	5,67	2672	43,4	26,1	77
310	89,32	187	192	7,76	6,79	6,90	5,75	2669	43,6	26,1	77
340	89,31	187	192	7,75	6,78	6,89	5,69	2659	46,3	26,3	78
370	89,37	187	192	7,70	6,76	6,86	5,72	2651	46,3	26,1	78
400	89,33	187	192	7,66	6,73	6,84	5,71	2644	47,6	26,1	75
430	89,33	187	192	7,65	6,77	6,81	5,60	2640	48,2	26,0	75
460	89,33	187	192	7,65	6,77	6,84	5,65	2634	49,0	25,9	77
490	89,24	187	192	7,64	6,75	6,83	5,63	2631	49,0	25,9	76
520	89,28	187	192	7,61	6,74	6,82	5,61	2629	49,4	25,9	77
580	89,3	187	192	7,62	6,79	6,84	5,67	2624	49,8	25,9	79
640	89,31	187	192	7,66	6,97	6,81	5,84	2621	50,3	25,9	78
700	89,33	187	191	7,66	6,88	6,83	5,88	2618	50,1	25,9	79
760	89,31	187	191	7,64	6,92	6,80	5,85	2616	50,2	25,9	79
820	89,28	187	191	7,64	6,92	6,82	5,84	2616	50,2	25,9	78
2260	89,31	186	191	7,77	6,99	6,78	5,93	2610	49,3	25,8	78
3700	89,27	186	191	7,81	6,98	6,83	5,80	2609	49,1	25,6	80

Tabela A3 - Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 70°C e umidade relativa média de 7,68%

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)	T _{bi} (°C)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	93,16	197	203	8,54	9,87	7,99	6,96	3055	26,0	26,9	68
10	93,11	196	202	8,41	9,93	7,35	7,18	3038	36,5	26,9	68
20	93,27	195	202	8,16	9,64	7,46	6,83	3016	38,2	26,9	67
30	93,52	195	200	8,17	9,50	7,38	6,75	2995	36,5	26,9	66
40	93,7	194	199	8,13	9,48	7,30	6,69	2974	37,0	26,9	65
50	93,55	194	199	8,05	9,44	7,29	6,52	2954	38,6	26,9	65
60	93,22	193	198	8,08	9,39	7,30	6,61	2933	39,0	26,9	63
70	92,86	192	198	7,99	8,95	7,17	6,52	2910	41,0	26,9	63
80	92,51	192	197	8,08	9,46	7,18	6,57	2894	39,0	26,9	63
90	92,11	191	197	8,10	9,44	7,19	6,55	2880	40,3	26,9	62
100	91,52	191	197	8,03	9,28	7,19	6,61	2865	41,2	26,9	64
110	91,32	190	196	8,05	9,57	7,30	6,71	2847	41,7	26,9	66
120	90,95	189	196	8,06	9,46	7,28	6,56	2835	41,3	26,9	66
130	90,72	189	195	8,06	9,51	7,34	6,64	2820	43,0	26,9	67
140	90,42	189	194	8,05	9,47	7,32	6,72	2807	42,5	26,9	68
150	90,26	189	195	8,05	9,46	7,26	6,98	2795	42,5	26,9	68
160	90,01	188	194	8,05	9,24	7,26	6,74	2783	46,2	26,8	69
170	89,96	189	194	8,05	9,38	7,32	6,98	2770	46,9	26,6	69
180	89,75	189	194	8,06	9,58	7,22	7,19	2761	47,7	26,6	69
190	89,76	188	194	8,00	9,69	7,24	6,70	2753	48,2	26,5	68
200	89,63	189	195	8,04	9,45	7,26	6,76	2744	50,1	26,5	68
210	89,62	188	194	8,04	9,45	7,22	6,70	2737	52,1	26,5	69
220	89,73	188	194	8,04	9,32	7,24	6,92	2732	52,2	26,5	68
230	89,82	188	194	8,0	9,52	7,32	6,69	2725	53,2	26,4	68
240	89,59	188	194	8,02	9,48	7,25	6,65	2718	53,8	26,4	67
250	89,53	188	194	8,05	9,52	7,27	6,60	2714	54,8	26,4	67
260	89,65	188	194	8,02	9,48	7,30	6,57	2710	55,3	26,5	68
290	89,72	188	195	8,00	9,52	7,27	6,64	2697	59,7	26,5	67
320	89,75	188	194	8,00	9,46	7,25	6,62	2687	60,6	26,6	67
350	89,58	188	195	7,97	9,48	7,29	6,54	2679	61,5	26,6	67
380	89,85	188	194	7,99	9,47	7,22	6,50	2674	62,3	26,5	68
410	89,81	188	194	7,95	8,92	7,26	6,50	2670	63,0	26,4	70
440	89,73	188	195	8,08	8,51	7,14	6,63	2666	62,3	26,1	71
470	89,47	188	195	8,02	8,67	7,17	6,57	2665	62,5	26,1	71
530	89,55	188	194	7,98	8,41	7,14	6,59	2659	62,9	25,9	71
590	89,56	188	194	7,95	8,37	7,13	6,59	2656	64,1	26,3	70
650	89,65	188	194	7,98	8,60	7,24	6,64	2655	63,3	26,0	69
710	89,47	188	194	8,04	8,36	7,14	6,69	2653	64,1	26,0	69
770	89,68	188	194	8,01	8,36	7,19	6,94	2652	64,7	25,9	69
830	89,5	188	194	7,96	8,34	7,12	6,64	2651	64,7	25,9	70
890	89,46	188	194	8,01	8,34	7,16	6,65	2650	63,8	25,9	69
950	89,46	188	194	8,01	8,30	7,15	6,64	2650	63,6	26,0	69
1010	89,47	188	194	8,00	8,40	7,19	6,70	2650	62,3	26,0	70
1070	89,56	188	194	7,92	8,26	7,13	6,52	2649	64,5	25,9	69
2510	89,55	188	194	7,92	9,39	7,12	6,75	2647	64,8	26,0	69
3950	89,36	188	194	8,04	8,87	7,20	6,52	2647	63,7	25,1	89

Tabela A4 - Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 80°C e umidade relativa média de 4,68%

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)	T _{tij} (°C)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	92,76	197	201	8,16	7,20	7,84	6,66	2978	21,4	26,5	59
10	93,20	197	200	7,87	7,16	7,49	6,28	2961	33,6	26,8	57
20	93,84	196	200	8,11	7,07	7,57	6,63	2938	34,8	26,9	57
30	94,13	195	199	7,97	7,15	7,26	6,43	2913	37,2	26,9	57
40	93,87	194	197	8,09	7,06	7,49	6,54	2887	37,1	26,9	58
50	93,62	194	197	8,10	7,03	7,37	6,51	2862	36,5	26,9	57
60	93,24	193	196	7,97	7,02	7,54	6,51	2839	39,1	26,9	58
70	92,67	193	195	8,04	7,00	7,28	6,56	2814	40,1	26,9	57
80	91,41	192	194	8,05	7,01	7,38	6,33	2778	43,3	26,8	58
90	91,20	192	194	7,96	7,00	7,33	6,53	2767	42,8	26,8	58
100	90,90	191	194	8,06	6,98	7,28	6,39	2751	44,1	26,8	59
110	90,43	191	194	8,00	6,98	7,21	6,46	2734	45,7	26,6	60
120	90,27	191	194	7,94	6,97	7,22	6,57	2720	47,2	26,5	60
130	90,22	190	194	7,92	6,96	7,20	6,55	2706	49,2	26,4	60
140	90,25	190	194	7,95	6,96	7,18	6,51	2693	50,3	26,4	61
150	90,27	190	194	7,94	6,91	7,15	6,52	2684	51,1	26,1	61
160	90,18	190	194	7,91	6,94	7,15	6,53	2675	51,6	26,1	62
170	90,14	190	193	7,88	6,91	7,16	6,54	2668	52,2	26,0	62
180	90,12	190	193	7,89	7,00	7,12	6,53	2660	53,1	26,0	62
190	90,12	190	193	7,86	7,10	7,14	6,50	2654	54,2	25,9	62
200	90,13	190	193	7,90	6,98	7,11	6,49	2649	55,5	25,9	62
210	90,17	190	193	7,91	6,92	7,12	6,52	2643	57,7	25,9	63
220	90,18	190	193	7,83	6,93	7,12	6,50	2638	58,8	25,9	63
230	90,13	190	193	7,87	6,89	7,14	6,55	2632	59,3	25,9	63
240	90,10	190	193	7,81	6,94	7,10	6,53	2628	61,8	25,9	62
250	90,14	190	193	7,83	6,89	7,09	6,53	2625	59,7	25,8	63
260	90,13	190	193	7,87	6,92	7,07	6,57	2621	62,7	25,8	63
270	90,08	190	193	7,68	6,95	7,53	6,47	2618	62,2	25,6	64
300	90,16	190	193	7,76	7,07	7,17	6,58	2610	67,6	25,6	66
330	90,03	190	193	7,88	6,95	7,16	6,65	2606	68,3	25,4	69
360	90,04	190	193	7,87	6,98	6,08	6,55	2601	67,6	25,1	70
390	90,07	190	193	7,71	6,93	7,16	6,50	2598	68,7	25,1	71
420	90,01	190	193	7,44	6,95	7,00	6,58	2594	67,1	25,0	73
450	90,10	190	193	7,47	7,02	7,19	6,59	2594	68,3	25,0	73
480	90,08	189	193	7,45	6,98	7,05	6,62	2592	68,9	25,0	74
540	90,05	189	193	7,45	6,98	7,09	6,50	2590	69,7	24,6	75
600	90,03	189	193	7,44	6,88	7,07	6,52	2588	70,3	24,5	75
660	90,02	189	193	7,44	6,95	7,14	6,52	2586	69,7	24,4	75
720	90,00	189	193	7,43	6,96	7,08	6,49	2586	69,7	24,4	75
780	90,02	189	193	7,45	6,97	7,08	6,45	2585	69,0	24,1	75
840	89,99	189	193	7,44	7,09	6,98	6,44	2585	69,1	24,0	76
900	89,98	189	193	7,44	6,99	6,98	6,38	2585	69,2	24,6	75
2340	90,05	189	193	7,66	7,10	7,09	6,25	2584	69,7	25,4	78
3780	90,01	189	193	7,48	7,08	7,02	6,22	2584	69,7	25,4	84

Tabela A5 - Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 90°C e umidade relativa média de 3,3%

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)	T _{ij} (°C)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	93,1	197	201	8,88	7,95	6,57	6,78	3058	21	25,3	80
10	93,2	197	201	8,74	7,89	6,37	6,37	3034	34,8	25,5	77
20	94,2	197	198	8,75	7,58	6,32	6,45	3008	36,0	25,5	78
30	94,4	196	198	8,57	7,62	6,36	6,66	2981	38,5	25,5	75
40	94,0	196	197	8,57	7,60	6,31	6,15	2953	40,0	25,4	75
50	93,3	194	196	8,58	7,41	6,28	6,26	2926	41,1	25,5	74
60	92,3	194	195	8,53	7,30	6,27	6,33	2898	43,0	25,6	73
70	91,4	192	195	8,53	7,38	6,24	6,34	2870	440	25,6	73
80	91,0	191	194	8,55	7,26	6,27	6,22	2841	45,5	25,8	72
90	90,8	191	194	8,55	7,24	6,23	6,09	2819	47,2	25,8	70
100	90,3	191	194	8,68	7,22	6,28	6,04	2803	48,3	25,8	70
110	90,3	190	193	8,68	7,07	6,24	5,98	2784	52,8	25,9	70
120	90,1	190	193	8,60	7,46	6,30	6,04	2770	53,4	25,9	69
130	90,1	190	193	8,55	7,30	6,26	6,35	2754	57,04	25,9	68
140	90,1	190	193	8,62	7,37	6,23	6,14	2742	58,06	25,9	69
150	90,1	190	193	8,65	7,31	6,27	6,27	2733	59,05	25,9	67
160	90,1	190	193	8,60	7,30	6,24	6,22	2723	61,0	25,9	65
170	90,1	190	193	8,58	7,29	6,24	6,21	2714	62,2	25,9	63
180	90,0	189	193	8,52	7,29	6,25	6,22	2709	60,5	26,0	62
190	90,1	189	193	8,48	7,26	6,26	6,25	2703	61,8	26,0	62
200	90,0	189	193	8,53	7,22	6,19	6,06	2697	64,7	26,0	61
210	90,0	189	193	8,28	7,25	6,20	6,26	2692	66,2	26,1	63
220	90,0	189	193	8,21	7,20	6,21	6,25	2687	67,2	26,0	61
230	89,9	189	193	8,23	7,22	6,18	6,25	2684	66,1	26,1	60
240	89,9	189	193	8,23	7,21	6,17	6,20	2680	66,8	26,3	60
270	89,9	189	193	8,25	7,22	6,20	6,18	2670	73,3	26,4	61
300	90,1	189	193	8,26	7,20	6,19	6,15	2662	75,1	26,5	60
330	90,1	189	193	8,25	7,22	6,17	6,20	2658	77,0	26,5	59
360	90,1	189	193	8,24	7,25	6,23	6,19	2654	76,6	26,6	60
390	90,1	189	193	8,19	7,21	6,21	6,10	2653	76,9	26,5	62
450	89,8	189	193	8,30	7,20	6,19	6,08	2647	77,1	26,4	66
510	90,0	189	193	8,34	7,17	6,20	6,02	2645	78,9	26,1	69
570	89,9	189	193	8,31	7,04	6,22	6,05	2643	78,5	25,9	74
630	90,1	189	193	8,22	7,11	6,14	5,94	2642	78,5	25,8	75
690	90,0	189	192	8,18	7,05	6,19	5,90	2642	77,5	25,5	76
2130	89,8	189	192	8,10	7,14	6,13	5,97	2638	78,5	25,4	75
3570	89,9	189	192	8,90	7,15	6,13	5,84	2638	78,5	25,4	77

Tabela A6 - Dados experimentais relacionados ao ar de secagem e ao tijolo cerâmico para condição de temperatura constante de 100°C e umidade relativa média de 1,8%

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)	T _{tij} (°C)	T _{amb} (°C)	UR (%)
0	92,80	198	202	11,7	9,41	8,74	8,00	3043	26,1	27,4	44
10	94,00	192	198	12,49	8,44	7,99	7,93	3015	42,0	27,8	43
20	92,25	194	198	10,43	8,34	7,67	7,20	2984	44,3	27,8	43
30	93,23	194	197	9,25	8,32	7,38	6,76	2956	45,0	27,9	42
40	92,95	193	196	9,22	8,32	7,60	6,86	2925	49,2	27,9	41
50	89,38	192	195	7,51	8,25	7,46	6,82	2894	54,0	27,9	42
60	89,15	191	195	9,08	8,22	7,35	7,32	2865	57,2	27,9	42
70	87,75	190	194	10,14	8,24	7,34	6,87	2834	60,0	27,9	41
80	90,12	190	194	9,72	7,87	7,56	7,00	2808	63,8	27,9	42
90	88,23	190	194	9,21	8,15	7,30	6,55	2782	65,0	27,9	42
100	88,10	190	194	9,00	8,07	7,44	6,78	2763	67,0	27,9	43
110	89,08	190	194	8,86	7,42	7,27	6,98	2739	69,0	27,9	43
120	89,89	190	193	8,81	8,15	7,23	6,84	2727	69,0	27,9	43
130	89,74	190	194	8,85	8,33	7,22	6,64	2715	69,0	28,0	43
140	89,83	190	194	8,74	8,04	7,14	7,05	2702	69,9	28,0	43
150	89,76	190	194	8,65	8,19	7,08	6,93	2691	70,0	28,1	43
160	89,72	190	194	8,87	8,60	6,22	6,95	2681	70,1	28,1	43
170	89,76	190	194	8,58	8,21	7,09	6,95	2672	72,0	28,0	43
180	89,85	190	194	8,57	8,28	7,13	6,67	2665	73,0	28,0	43
190	89,75	190	194	8,59	8,14	7,72	6,74	2659	74,0	28,0	44
200	89,66	190	194	8,56	8,39	7,15	6,61	2656	75,0	27,9	44
230	89,25	190	194	10,45	8,88	7,70	8,07	2646	76,7	27,9	44
260	89,00	189	195	10,83	9,21	7,96	7,84	2635	84,3	27,9	47
290	89,37	190	194	8,72	8,28	7,07	7,04	2626	87,3	27,6	50
320	89,53	190	193	8,73	8,73	7,21	6,80	2621	89,0	27,4	52
350	89,03	190	193	8,68	8,17	7,14	6,76	2618	90,0	27,3	54
380	89,24	190	193	8,66	8,23	7,49	6,57	2614	91,3	27,1	55
440	89,76	190	193	8,62	7,32	7,58	7,03	2610	92,0	26,9	57
500	89,98	190	194	9,11	8,25	7,11	6,56	2608	92,1	26,8	60
560	89,90	189	194	10,72	8,78	7,53	7,68	2607	92,3	26,6	62
620	92,32	189	194	9,63	8,40	8,03	6,92	2607	92,8	26,4	63
680	90,33	189	194	11,16	8,20	8,04	7,03	2605	92,7	26,5	63
740	90,81	189	194	10,81	8,89	7,62	7,63	2604	93,0	27,0	61
800	90,54	189	194	10,51	8,83	8,43	6,8	2604	93,1	27,4	60
860	90,91	189	195	10,48	8,53	8,12	7,54	2604	93,2	27,4	60
2300	88,07	189	193	9,48	8,25	7,16	7,04	2604	93,4	27,6	63
3740	89,75	190	193	9,48	8,26	7,12	6,98	2603	93,4	27,4	68