

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

SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO

Autor: Anderson Melchiades Vasconcelos da Silva

Orientador: Antonio Gilson Barbosa de Lima

Campina Grande, fevereiro de 2018.

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

**SECAGEM DE BLOCOS CERÂMICOS INDUSTRIAIS:
MODELAGEM, SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAÇÃO**

Autor: Anderson Melchtiades Vasconcelos da Silva

Orientador: Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Curso: Engenharia de Processos

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos

Defesa apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos
do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

Campina Grande, fevereiro de 2018

PB - Brasil

S586s Silva, Anderson Melchiades Vasconcelos da.
Secagem de blocos cerâmicos industriais: modelagem,
simulação e experimentação / Anderson Melchiades Vasconcelos
da Silva. – Campina Grande, 2018.
187 f.: il. color.

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

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

1. Secagem. 2. Cerâmica. 3. Bloco cerâmico. I. Lima, Antonio
Gilson Barbosa de. II. Título.

CDU 66.047:666.71(043)


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

DEDICATÓRIA

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA TESE DE DOUTORADO DE ANDERSON MELCHIADES VASCONCELOS 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 28 de fevereiro de 2018.

BANCA EXAMINADORA



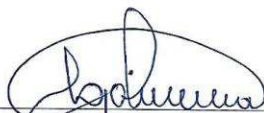
Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima (UFCG)
Orientador



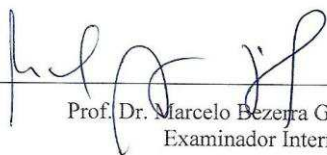
Prof. Dr. Genival da Silva Almeida (IFPB)
Examinador Externo



Prof. Dr. Vital Araújo Barbosa de Oliveira (UEPB)
Examinador Externo



Prof. Dr. Laércio Gomes de Oliveira (UFCG)
Examinador Externo



Prof. Dr. Marcelo Bezeira Grilo (UFCG)
Examinador Interno

Campina Grande, Fevereiro de 2018.

À minha família

Ao meu pai, José Adilson Vasconcelos da Silva, pela minha educação, incentivo, amor e carinho. Apoiando-me em todos os momentos e não me deixando desistir nunca.

À minha mãe, Gilvanda Bento Melchades da Silva, pelo amor, carinho, dedicação, paciência e apoio nessa caminhada.

Aos meus irmãos Agton Melchades Vasconcelos da Silva e Agson Melchades Vasconcelos da Silva, pela amizade, compreensão, carinho, conselhos. Sempre me apoiando e me ajudando.

A minha esposa Mayara de Brito Regis, pelo amor, confiança, incentivo, conselhos e compreensão. Por acreditar que esse doutorado seria concretizado, me apoiando sempre e não me deixando desistir nunca.

Ao meu bem mais precioso, minha filha, Helena Regis Vasconcelos, que pelo simples fato de existir, foi capaz de me ensinar o significado do verdadeiro AMOR. Se hoje estou aqui é graças a força que você me dá todos os dias, ao seu sorriso e alegria que me faz feliz a cada dia que passa.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, por tudo que Ele me oferece, em muitos momentos, me proporcionando paz, força e sabedoria para que eu possa superar todos os obstáculos e dificuldades ao longo do caminho e a Nossa Senhora da Conceição, por graças alcançadas durante minha vida.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para realização dessa pesquisa.

Ao programa de Pós – Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande pela oportunidade que me foi dada para realização de um trabalho dessa magnitude.

Em especial ao meu orientador Professor Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima, pelo privilégio da sua orientação, pela amizade, confiança, paciência, empenho e dedicação no desenvolvimento deste trabalho em equipe.

A indústria de Cerâmica Cincera, localizada em Santa Rita – PB, pela atenção, apoio e fornecimento da argila e compensadores para a pesquisa.

Aos professores do Curso de Pós-graduação em Engenharia de Processos, pela dedicação em transmitir seus conhecimentos dentro e fora da sala de aula.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
2 REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1 Cerâmica.....	29
2.1.1 Histórico	29
2.1.2 Conceito de cerâmica	30
2.1.3 Caracterização da indústria.....	31
2.1.4 Classificação dos produtos cerâmicos	34
2.2 Argila.....	37
2.2.1 Histórico	37
2.2.2 Conceito de argila.....	37
2.2.3 Classificação das argilas.....	38
2.2.4 Propriedades da argila	39
2.3 Tijolos.....	41
2.3.1 Etapas de fabricação	41
2.3.2 Alguns defeitos encontrados no produto final.....	42
2.4 Secagem.....	43
2.4.1 Fundamentos.....	43
2.4.2 Secagem de produtos cerâmicos.....	47
2.4.3 Modelos de secagem.....	48
3 METODOLOGIA.....	53
3.1 Metodologia experimental.....	53
3.1.1 Caracterização da argila.....	53
3.1.1.1 Preparação das amostras.....	53
3.1.1.2 Análises química, mineralógica, granulométrica e térmica/gravimétrica	56
3.1.2 Experimentos de secagem em estufa.....	59

3.1.2.1	Material e equipamentos utilizados	60
3.1.2.2	Procedimentos experimentais	64
3.1.2.3	Cálculos auxiliares.....	66
3.2	Metodologia matemática	69
3.2.1	Tratamento estatístico dos dados (Modelos ao nível de partícula).....	69
3.2.1.1	Modelo empírico de secagem	69
3.2.1.2	Modelo empírico de aquecimento	69
3.2.1.3	Modelo de retração volumétrica	70
3.2.2	Modelagem matemática para o secador.....	70
3.2.2.1	Balanço de energia para o ar.....	72
3.2.2.2	Balanço de energia para o produto	73
3.2.2.3	Balanço de massa para o ar.....	75
3.2.2.4	Balanço de massa para o produto	76
3.2.2.5	Equações auxiliares	76
3.2.2.6	Solução numérica	81
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.1	Resultados experimentais	87
4.1.1	Caracterização da matéria-prima	87
4.1.1.1	Análise química	87
4.1.1.2	Análise mineralógica	89
4.1.1.3	Análise granulométrica.....	90
4.1.1.4	Análise térmica e gravimétrica	91
4.1.2	Secagem das amostras em estufa.....	91
4.2	Resultados empíricos	108
4.3	Resultados obtidos com o simulador	119
5.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	131
5.1	Conclusões.....	131

5.2 Sugestões para trabalhos futuros	134
REFERÊNCIAS	135
APÊNDICES	142
APÊNDICE A	143
APÊNDICE B.....	151
APÊNDICE C	159
APÊNDICE D	167
APÊNDICE E.....	175
APÊNDICE F	183

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo estudar teórica e experimentalmente a secagem de material cerâmico em escala industrial, com particular referência ao compensador industrial. Foram realizados experimentos de caracterização química, mineralógica, granulométrica, térmica e gravimétrica da argila e secagem dos materiais cerâmicos em diferentes temperaturas (50, 60, 70, 80, 90 e 100°C). Foram propostos e ajustados aos dados experimentais modelos empíricos de secagem, aquecimento e variação volumétrica. Sendo feita uma análise estatística de regressão não-linear verificando a consistência dos modelos para representar os resultados experimentais. A solução numérica das equações governantes foi realizada usando o método dos volumes finitos. Foi desenvolvido um código computacional em linguagem do Mathematica®, para a obtenção dos dados numéricos. Resultados da composição química, granulometria, térmica e gravimétrica da argila, são apresentados e analisados, a cinética de perda de massa e aquecimento das peças cerâmicas são analisadas para as temperaturas pre estabelecidas. Todos os modelos propostos apresentam boa concordância com os dados experimentais. Verificou-se que o processo de perda de umidade ocorre a uma velocidade mais baixa do que o aquecimento do material cerâmico utilizado, que a secagem a baixa temperatura favorece a redução de problemas no material e melhoramento na qualidade final.

Palavras chaves: secagem, cerâmica, bloco cerâmico.

ABSTRACT

The objective of this work is to study, theoretically and experimentally, the drying of ceramic material on an industrial scale, with particular reference to the industrial compensator. Chemical, mineralogical, granulometric, thermal and gravimetric characterization of clay and drying of ceramic materials at different temperatures (50, 60, 70, 80, 90 and 100°C) were carried out. Empirical models of drying, heating and volumetric variation were proposed and adjusted to the experimental data. A statistical analysis of nonlinear regression was performed, verifying the consistency of the models to represent the experimental results. The numerical solution of the governing equations is performed using the finite volume method. A mathematical code was developed in Mathematica® language to obtain the numerical data. Results of the chemical composition, granulometry, thermal and gravimetric of clay are presented and analyzed, the kinetics of mass loss and heating of the ceramic pieces are analyzed at the pre-established temperatures. All proposed models have good agreement with the experimental data. It has been found that the moisture loss process occurs at a lower speed than the heating of the ceramic material, that drying at low temperature favors the reduction of problems in the material and improvement in the final quality.

Key words: drying, ceramics, ceramic block.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Venda de revestimento cerâmico no mercado interno	33
Figura 2.2	Produção brasileira de revestimento cerâmico	33
Figura 2.3	Classificação de argila para uso cerâmico com base na cor após queima a 950° C, 1250° C e 1450° C em atmosfera oxidante.....	39
Figura 2.4	Fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila dura	42
Figura 2.5	Fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila mole	42
Figura 2.6	Curva de retenção de umidade	45
Figura 2.7	Curva de secagem	50
Figura 3.1	Jazida da Indústria Cerâmica Cincera.....	53
Figura 3.2	Argila “ <i>in natura</i> ”	54
Figura 3.3	Moinho de martelo	55
Figura 3.4	Peneirador de malha nº 200	55
Figura 3.5	Espectrômetro de fluorescência de raios X.....	56
Figura 3.6	Difratômetro de raios x	57
Figura 3.7	Granolômetro a laser.....	58
Figura 3.8	Equipamento utilizado para as análises térmica e gravimétrica.	59
Figura 3.9	Vista superior do bloco de vedação utilizado no experimento	60
Figura 3.10	Vista lateral do bloco de vedação utilizado no experimento	61
Figura 3.11	Paquímetro digital	61
Figura 3.12	Balança digital	62
Figura 3.13	Termômetro digital, modelo TI-890	62
Figura 3.14	Termohigrômetro	63
Figura 3.15	Estufa com circulação de ar forçada	63
Figura 3.16	Imagem 3D do compensador 07.	65
Figura 3.17	Imagem 2D do compensador 07	65
Figura 3.18	Esquema ilustrativo do compensador 07	65
Figura 3.19	Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado.....	71
Figura 3.20	Volume infinitesimal de sólido na camada.....	71
Figura 3.21	Compensador 07	78

Figura 3.22	Esquema das condições iniciais e de contorno no secador	81
Figura 3.23	Esquema numérico e o volume de controle utilizado	82
Figura 4.1	Análise mineralógica da amostra utilizada no experimento via difratograma de Raios X	89
Figura 4.2	Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila	90
Figura 4.3	Curva termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ADT) da massa cerâmica	91
Figura 4.4	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 50°C em função do tempo de secagem.	92
Figura 4.5	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 60°C em função do tempo de secagem.	92
Figura 4.6	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 70°C em função do tempo de secagem	93
Figura 4.7	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 80°C, em função do tempo de secagem	93
Figura 4.8	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 90°C em função do tempo de secagem.	93
Figura 4.9	Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 100°C, em função do tempo de secagem	94
Figura 4.10	Comparação entre a variação do teor de umidade para várias temperaturas versus o tempo de secagem.	95
Figura 4.11	Comparação entre a variação de temperatura versus o tempo de secagem para temperaturas pré-estabelecidas	95
Figura 4.12	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 50°C, em função do tempo de secagem	96
Figura 4.13	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 60°C, em função do tempo de secagem	96
Figura 4.14	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 70°C, em função do tempo de secagem	96
Figura 4.15	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 80°C, em função do tempo de secagem	97
Figura 4.16	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 90°C, em função do tempo de secagem	97

Figura 4.17	Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 100°C, em função do tempo de secagem	97
Figura 4.18	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 50°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 1170 min	102
Figura 4.19	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 60°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 1050 min	103
Figura 4.20	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 70°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 990 min	104
Figura 4.21	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 80°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 930 min	105
Figura 4.22	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 90°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 930 min	106
Figura 4.23	Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 100°C. a) t = 0 min, b) t = 30 min e c) t = 750 min	107
Figura 4.24	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.....	109
Figura 4.25	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.....	110
Figura 4.26	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	110
Figura 4.27	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.....	111
Figura 4.28	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.....	111
Figura 4.29	Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (000) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.....	112

Figura 4.30	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.....	113
Figura 4.31	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.....	113
Figura 4.32	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	114
Figura 4.33	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.....	114
Figura 4.34	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.....	115
Figura 4.35	Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.....	115
Figura 4.36	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.....	116
Figura 4.37	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.....	117
Figura 4.38	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.....	117
Figura 4.39	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.....	118
Figura 4.40	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (---) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.....	118

Figura 4.41	Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.....	119
Figura 4.42	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 50°C	120
Figura 4.43	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 60°C	120
Figura 4.44	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 70°C	120
Figura 4.45	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 80°C	121
Figura 4.46	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 90°C	121
Figura 4.47	Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 100°C	121
Figura 4.48	Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 50°C.....	122
Figura 4.49	Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 60°C.....	122
Figura 4.50	Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 70°C.....	123
Figura 4.51	Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 80°C.....	123

- Figura 4.52** Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 90°C.....123
- Figura 4.53** Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 100°C.....124
- Figura 4.54** Variação do teor de umidade ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.....125
- Figura 4.55** Variação do teor de umidade ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.....125
- Figura 4.56** Variação da temperatura do produto ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C. ..126
- Figura 4.57** Variação da temperatura do produto ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C. 126
- Figura 4.58** Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C. ..127
- Figura 4.59** Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C. 127
- Figura 4.60** Variação da temperatura do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C. ..128
- Figura 4.61** Variação da temperatura do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C. 128
- Figura 4.62** Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C. ..129

- Figura 4.63** Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C. 129
- Figura 4.64** Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C. ..130
- Figura 4.65** Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C. 130

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Subsetores da indústria cerâmica.....	34
Tabela 3.1	Resumo dos parâmetros experimentais.....	68
Tabela 4.1	Composição química da matéria-prima utilizada nos experimentos	88
Tabela 4.2	Distribuição percentual de tamanho de partículas da matéria-prima estudada.....	90
Tabela 4.3	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 50°C.....	98
Tabela 4.4	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 60°C.....	98
Tabela 4.5	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 70°C.....	98
Tabela 4.6	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 80°C.....	98
Tabela 4.7	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 90°C.....	99
Tabela 4.8	Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 100°C.....	99
Tabela 4.9	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 50°C.....	99
Tabela 4.10	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 60°C.....	100
Tabela 4.11	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 70°C.....	100
Tabela 4.12	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 80°C.....	100
Tabela 4.13	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 90°C.....	100
Tabela 4.14	Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 100°C.....	101
Tabela 4.15	Parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.....	109

Tabela 4.16	Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura do compensador 07	112
Tabela 4.17	Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da retração volumétrica e da umidade em base seca.....	116
Tabela A.1	Dados da cinética de secagem para 50°C.....	143
Tabela A.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 50°C	145
Tabela A.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 50°C	147
Tabela A.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 50°C.....	149
Tabela B.1	Dados da cinética de secagem para 60°C.....	151
Tabela B.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 60°C	153
Tabela B.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 60°C	155
Tabela B.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 60°C.....	157
Tabela C.1	Dados da cinética de secagem para 70°C.....	159
Tabela C.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 70°C	161
Tabela C.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 70°C	163
Tabela C.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 70°C.....	165
Tabela D.1	Dados da cinética de secagem para 80°C.....	167
Tabela D.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 80°C	169
Tabela D.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 80°C	171
Tabela D.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 80°C.....	173
Tabela E.1	Dados da cinética de secagem para 90°C.....	175
Tabela E.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 90°C	177
Tabela E.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 90°C	179
Tabela E.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 90°C.....	181
Tabela F.1	Dados da cinética de secagem para 100°C.....	183
Tabela F.2	Dados da variação da temperatura para secagem a 100°C	185
Tabela F.3	Dados da variação volumétrica interna para secagem a 100°C	186
Tabela F.4	Dados da variação volumétrica externa para secagem a 100°C.....	187

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A_0^*	Área de superfície específica	[m ²]
a	Área Superficial	[m ²]
C	Dimensão do sólido em relação ao comprimento	[mm]
CF	Dimensão do comprimento do furo	[mm]
c_a	Calor específico do ar	[J/kgK]
c_p	Calor específico do produto	[J/kgK]
c_v	Calor específico do vapor	[J/kgK]
c_w	Calor específico para aquecer a água no ambiente	[J/kgK]
D	Diâmetro do furo	[mm]
D_h	Diâmetro hidráulico	[mm]
dM/dt	Taxa de variação de umidade	[kg/kg]
dT/dt	Taxa de variação de temperatura do produto	[°C/min]
dT/dx	Taxa de variação de temperatura ao longo do eixo x	[°C/m]
dX/dt	Taxa de secagem do produto	[kgw/kgms·s]
exp	Exponencial	[-]
H	Dimensão do sólido em relação à altura	[mm]
hc	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
h_{fg}	Calor latente de vaporização de água livre	[J/kg]
ka	Condutividade térmica do ar	[W/(mK)]
L	Dimensão do sólido em relação à largura	[mm]
LF	Dimensão da largura do furo	[mm]
m	Massa do produto	[kg]
m_a	Massa de água do tijolo	[kg]
m_s	Massa do tijolo seco	[kg]
M	Teor de umidade do produto	[kg/kg]
\underline{M}	Teor de umidade médio	[kg/kg]
M^*	Teor de umidade médio adimensional	[-]
N_{tj}	Número de tijolos	[-]
R_a	Constante universal dos gases	[J/kg°C]
Re	Número de Reynolds	[-]

T	Temperatura do ar de secagem	[°C]
t	Tempo de secagem	[min]
up	Velocidade da vagonete	[m/s]
UR	Umidade relativa	[%]
V	Volume	[mm ³]
p	Pressão parcial de vapor na superfície do produto	[atm]
Pr	Número de Prandtl	[-]
w	Velocidade do ar	[m/s]
x	Umidade absoluta	[kg/kg]
X	Teor de água do produto	[kgw/kgms]
y	Área superficial do sólido	[m ²]

Letras Gregas

ρ_a	Densidade do ar	[kg/m ³]
ε	Porosidade do produto	[-]
θ	Temperatura do produto	[°C]
∇	Divergente	[-]
μ	Viscosidade dinâmica	[Ns/m ²]

Sobrescritos

*	Adimensional
---	--------------

Subscrito

a	Ar
v	Vapor
0	Inicial
e	Equilíbrio
P	Produto
VS	Saturação de vapor
ATM	Atmosférica
T	Tijolo
VAG	Vagonete
ABS	Absoluta

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A construção civil tem papel fundamental para atingir os objetivos globais do desenvolvimento sustentável, uma vez que o setor consome grande quantidade de recursos naturais. Além disso, gera grande quantidade de resíduos sólidos e gases poluentes, tanto na fase de extração das matérias-primas, como na fabricação, no transporte, no uso, na manutenção e no descarte (CASTRO et al., 2017).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (2014), as regiões que mais se desenvolveram foram a SUDESTE e a SUL, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infra-estrutura, melhor distribuição de renda, associado ainda as facilidades de matérias-primas, fontes de energia, existência de centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. Convém salientar que as outras regiões do país têm apresentado certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados a construção civil, o que tem levado a implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região.

O Brasil conta com um parque industrial diversificado e moderno, apresenta um setor de agronegócios com grande produtividade e muito competitivo, possui um qualificado sistema de serviços e desenvolve negócios com praticamente todas as nações do mundo (ANFACER, 2011).

Nos últimos anos, a procura pelo produto brasileiro praticamente dobrou. Mesmo enfrentando momentos de turbulência econômica mundial, o setor ceramista brasileiro realizou excelentes negócios no mercado asiático. Nos últimos oito anos, o volume de exportações para países, como Coreia do Sul, Emirados Árabes Unidos e Arábia Saudita, aumentou em mais de 100% (ANFACER, 2014).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (2014), a abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial, com apreciável quantidade exportada.

O Brasil é um dos principais protagonistas no mercado mundial de revestimentos cerâmicos, ocupando a segunda posição em produção e consumo. Em 2016, foram produzidos 792 milhões de metros quadrados para uma capacidade instalada de 1.048 milhões de metros quadrados. As vendas totais atingiram 800,3 milhões de metros quadrados, dos quais 706 milhões de metros quadrados foram vendidos no mercado interno e 94,3 milhões de metros quadrados exportados (ANFACER, 2017).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), pequenas e médias empresas atuam, em geral, como extratores próprios de jazidas de cerâmica tradicionais e extratores terceirizados da cerâmica técnica e avançada. As grandes empresas são mineradoras e beneficiadoras ligadas aos fabricantes de produtos de cerâmica técnica e avançada.

No Brasil, tal setor apresenta uma grande dificuldade de obtenção de dados estatísticos e indicadores de desempenho, causando, assim, uma deficiência para acompanhar o seu crescimento e melhorar sua competitividade. Além da dificuldade de obtenção de dados, o segmento de cerâmica vermelha apresenta uma série de problemas, tanto ambientais como de qualidade dos produtos. É uma atividade de base da construção civil, desde a mais simples à mais sofisticada (SANTOS JR et al., 2017). Com o crescimento da exigência de implantação de políticas ambientais, as indústrias estão cada vez mais interessadas em maneiras de reduzir os resíduos gerados durante a fabricação de produtos cerâmicos (ROCHA et al., 2017).

Dentre os setores e segmentos que causam impacto no meio ambiente, destaca-se o segmento de cerâmica vermelha, por possuir estrutura e características particulares. Neste setor são produzidos telhas, tijolos e blocos cerâmicos, o que o torna um dos principais fornecedores do setor de construção civil. Os problemas ambientais gerados referem-se, especialmente, a extração e consumo de matérias primas: argila, água, lenha, etc.; rejeitos de produção, principalmente, produtos defeituosos e emissões gasosas (material particulado), oriundas da queima (LIMA, 2008).

Apesar de algumas empresas e estudiosos mostrarem-se empolgados com o avanço tecnológico no processo de fabricação de materiais cerâmicos, raramente são encontrados, no meio científico, trabalhos voltados para secagem de materiais cerâmicos em caráter industrial (ALMEIDA, 2009).

Resíduos cerâmicos são duros, resistentes e extremamente resistentes a degradações químicas, físicas, biológicas e termicamente. Estima-se que cerca de 30% da produção diária da indústria cerâmica vai para o lixo. Hoje em dia, a indústria cerâmica cria uma quantidade significativa de resíduos para eliminação. Esses resíduos sólidos levam a poluição ambiental severa e ocupação significativa da terra. Imensa quantidade de resíduos de cerâmica (sob a forma de pellets e pó) é produzidos em diferentes etapas, como moagem, corte, dressagem e polimento dentro da planta industrial (YESILAY et al., 2017).

Sendo assim, a motivação dessa pesquisa se dá em buscar meios para otimizar a secagem de materiais cerâmicos em escala industrial, visando um melhor aproveitamento da energia gasta nesse processo. A ideia é, através de testes experimentais, realizar a secagem em várias temperaturas, estudando o comportamento da cinética de secagem, visando reduzir os problemas referentes ao processo, dentre eles a perda de energia, má qualidade do produto e problemas ambientais. A intenção é se aproximar cada vez mais da realidade que ocorre durante o processo de secagem na indústria e que seja rápido no tempo de resposta.

Diante do exposto, esta pesquisa tem como objetivo geral estudar teórica e experimentalmente a secagem de material cerâmico úmido, com particular referência a compensadores industriais.

Como objetivos específicos pode-se citar:

- a) Realizar análises química, mineralógica, granulométrica, térmica e gravimétrica da argila para uso na indústria cerâmica;
- b) Realizar experimentos de secagem em compensadores industriais, em várias condições de processo;
- c) Analisar o efeito da secagem na qualidade do material;
- d) Propor modelos matemáticos empíricos para descrever a perda de água, aquecimento e variações dimensionais do compensador ao longo do tempo;
- e) Modelar matematicamente o processo de secagem de compensadores em um secador industrial tipo túnel, contínuo e de fluxos cruzados;
- f) Desenvolver um programa computacional para simular o processo de secagem de produtos cerâmicos em secador industrial;
- g) Simular a distribuição de temperatura e umidade do produto (compensador industrial) e temperaturas e umidade absoluta do ar no interior do secador;
- h) Comparar os resultados preditos e experimentais do teor de umidade e temperatura do compensador, visando a validação da modelagem matemática proposta.

A tese está escrita de acordo com os seguintes capítulos:

- a) O capítulo I apresenta o problema da pesquisa, seus objetivos, a motivação e a estrutura do trabalho e tem por objetivo esclarecer, em linhas gerais, as bases em que ele é desenvolvido.
- b) No capítulo II é apresentado um breve estudo sobre a revisão de literatura do tema proposto.

- c) No capítulo III comenta-se sobre a metodologia experimental e teórica aplicada na pesquisa.
- d) O capítulo IV apresenta os resultados obtidos e as discussões, baseando-se nos indicadores selecionados.
- e) No capítulo V, apresentam-se as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.
- f) Para encerrar, apresentam-se os elementos pós-textuais: referências e os apêndices.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Cerâmica

2.1.1 Histórico

Estudos arqueológicos indicam a ocorrência de utensílios cerâmicos a partir do período Pré-neolítico (25.000 a.C.) e de materiais de construção, como tijolos, telhas e blocos, por volta de 5.000 a 6.000 a.C. Segundo pesquisa da Faculdade de Tecnologia de Lisboa, peças cerâmicas produzidas com argila datam de 4.000 a.C., as quais foram feitas com formas bem definidas, mas utilizando processo que não contemplava o cozimento das mesmas. Datam também, dessa mesma época, os indícios da utilização de tijolos na construção, fabricados na Mesopotâmia. Os primeiros tijolos queimados datam de 3.000 a.C., cuja aplicação estava voltada aos revestimentos externos e muros de proteção, apesar da técnica ter se desenvolvido séculos antes, especialmente na queima de utensílios domésticos. E entre 1.600 e 1.100 a.C. foram encontrados, onde ficava localizada a Babilônia, alguns exemplares de tijolos queimados. Em 430 a.C. foram encontradas telhas na Grécia, além de indícios de sua utilização na China e Japão, por volta do mesmo período. Alguns anos depois, em torno de 280 a.C., identificam-se a utilização, por parte dos Romanos, de barro cozido para construção de telhados, assim como para fabricação de divindades, objetos ornamentais e artefatos utilitários. A atividade foi aprimorando-se e, por volta do século I a.C., começa a revelar evolução na qualidade proveniente da tecnologia produtiva empregada resultando em peças de maior valor estético e monetário (SEBRAE, 2008).

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 ovoide 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).

No Brasil, há cerca de 2.000 anos, já havia indícios, em diversas regiões, de populações que manipulavam convenientemente a 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).

A cerâmica mais elaborada foi detectada na Ilha de Marajó; do tipo marajoara, tendo sua origem na avançada cultura indígena da Ilha. Entretanto, estudos arqueológicos indicam que a presença de uma cerâmica mais simples ocorreu na região amazônica, há mais de 5.000 anos atrás (SEBRAE, 2008).

2.1.2 Conceito de cerâmica

A cerâmica vermelha engloba diversos materiais que são frequentemente utilizados na construção civil, como blocos, telhas, tijolos maciços, tubos para saneamento, elementos de enchimentos (laje), green wall, elementos vazados e também argila expandida. Além disso, está presente em itens de uso doméstico, como filtros e panelas de barro. Possui a nomenclatura “vermelha” devido à presença de compostos ferrosos que desenvolvem coloração avermelhada (SEBRAE, 2015).

As matérias-primas tradicionais usadas na indústria cerâmica são principalmente cristais inorgânicos, não-metálicos formados por processos geológicos complexos. Suas propriedades cerâmicas são frequentemente determinadas pela estrutura cristalina e composição química dos seus constituintes essenciais, pela natureza e quantidade de minerais secundários presentes (ALMEIDA, 2009).

Os materiais cerâmicos são compostos por materiais inorgânicos, elementos metálicos e não metálicos e são obtidos, geralmente, após tratamento térmico em

temperaturas elevadas. Tais materiais abrangem variedades como vidro, tijolo, pedras, concretos, abrasivos, vernizes e esmaltes para porcelana. Alguns exemplos que podem ser citados variam desde a alumina (Al_2O_3) até os vidros inorgânicos, incluindo produtos da argila até os materiais piezelétricos, sendo estes os mais sofisticados por gerarem tensão elétrica a uma resposta a pressão mecânica. As características dielétricas, semicondutoras e magnéticas de determinados materiais cerâmicos são de grande valia para dispositivos de circuitos eletrônicos (DIAS, 2013).

O setor cerâmico utiliza a argila como matéria-prima principal para a obtenção de seus produtos como blocos de vedação (tijolos comuns), tijolos aparentes, blocos estruturais, telhas, pisos rústicos e manilhas (VIEIRA et al., 2016).

2.1.3 Caracterização da indústria

Para classificar um produto cerâmico deve-se levar em consideração o emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características texturais (massa base), além de outras características cerâmicas, técnicas e econômicas (SEBRAE, 2008).

Alguns subsetores cerâmicos são mais concentrados, nomeadamente a cerâmica estrutural dominada por um grande número de multinacionais. Esta crescente concentração é consequência dos benefícios atingidos por via das economias de escala, controle de preços dos energéticos e acesso à matérias primas. É um setor altamente dependente de energia, quer para a produção, quer para o transporte dos produtos (APICER, 2012).

A indústria cerâmica é caracterizada por diferentes processos produtivos, divididos em subsetores e produto final pretendido. No entanto é possível distinguir os processos de atomização, secagem e cozedura como os mais representativos do setor (APICER, 2016).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), o segmento apresenta-se com uma estrutura empresarial bastante diversificada, prevalecendo pequenos empreendimentos familiares (olarias, em grande parte não incorporadas às estatísticas oficiais), cerâmicas de pequenos e médios portes, com deficiências de mecanização e

gestão, e empreendimentos de médio a grande porte (em escala de produção) de tecnologia moderna. Pequenas e médias empresas atuam, em geral, como extratores próprios de jazidas de cerâmica tradicionais e extratores terceirizados da cerâmica técnica e avançada. As grandes empresas são mineradoras e beneficiadoras ligadas aos fabricantes de produtos de cerâmica técnica e avançada. Predomina no setor a desqualificação e o baixo nível de instrução formal da mão de obra. A definição do local de instalação das fábricas é determinada principalmente por dois fatores: a localização da jazida (devido à grande quantidade de matéria-prima processada, e a proximidade dos centros consumidores (em função dos custos de transporte). A renda do segmento tende a permanecer nos locais de produção, com impacto econômico e social significativo. A mineração de argila tem a predominância de minas de pequeno porte, apresentando baixo valor unitário, o que faz com que opere de modo cativo para a sua própria cerâmica, ou abasteça mercados locais. O óleo diesel é o principal combustível utilizado nos equipamentos de extração de argila.

Segundo a APICER (2012), o futuro do setor encontra-se nas mais diversas aplicações inovadoras como medicina (dentária, oncológica), desporto (tênis, golfe, skate), exército (armaduras), construção (isolamento, painéis), eletrônica (ipods, GPS, tele móvel).

As Figuras 2.1 e 2.2 mostram o aumento nas vendas de revestimento cerâmicos no mercado interno e na produção brasileira dos últimos anos respectivamente.

Mesmo enfrentando uma crise mundial nos últimos anos, a procura por produtos cerâmicos da indústria brasileira aumentou, esse aumento vem até o ano de 2014 (Figura 2.1), ocorrendo uma diminuição nos anos seguintes, por causa do mercado a produção seguiu o mesmo ritmo como mostrado na Figura 2.2. Com relação ao mercado externo, ocorreu um aumento na procura pelos produtos brasileiros até o ano de 2016 como podemos observar na comparação entre as Figuras 2.1 e 2.2.

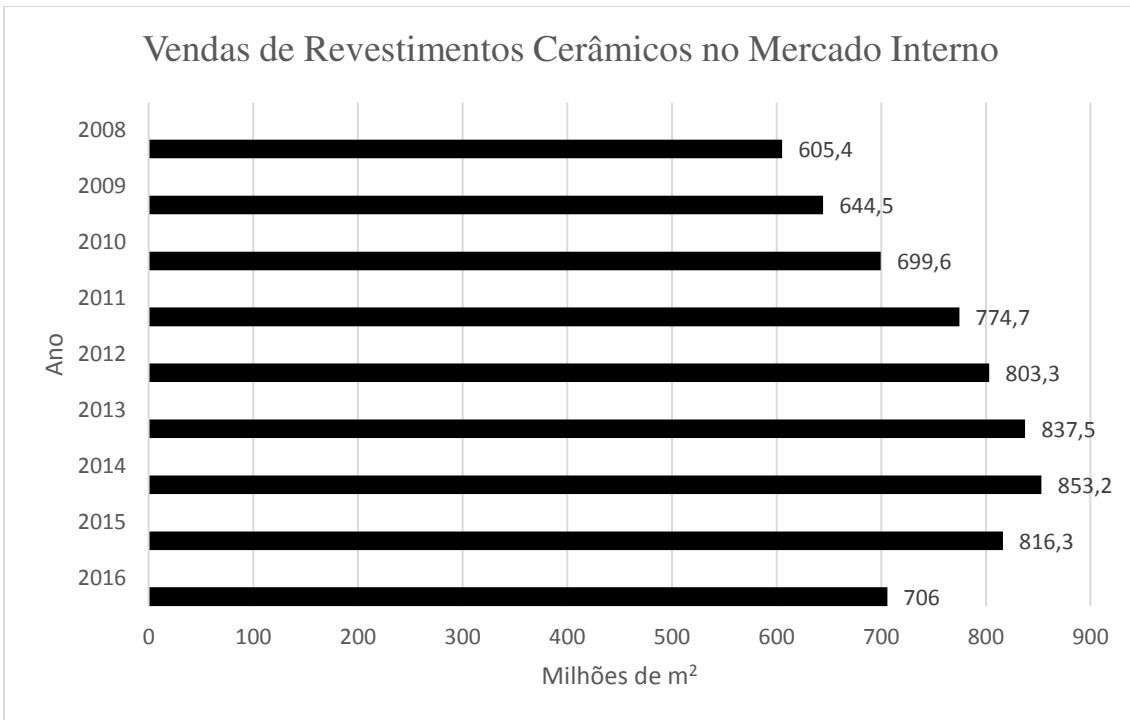


Figura 2.1 - Venda de revestimento cerâmico no mercado interno.

Fonte: ANFACER (2017).

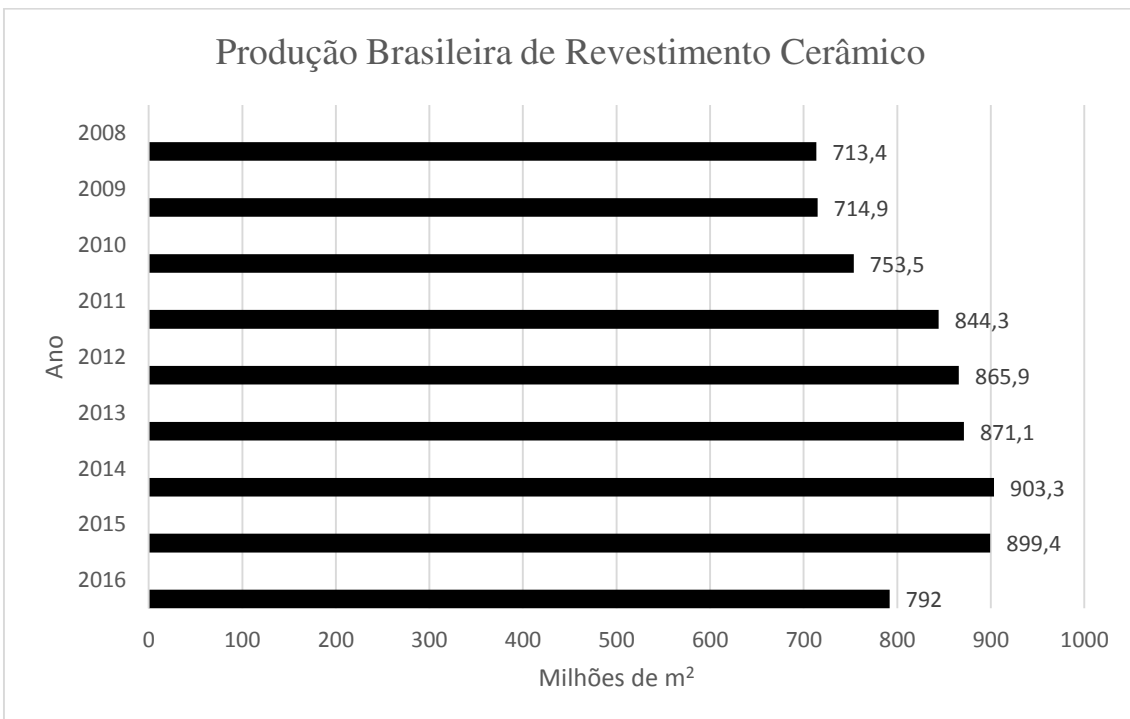


Figura 2.2 - Produção brasileira de revestimento cerâmico.






Fonte: ANFACER (2017).

2.1.4 Classificação dos produtos cerâmicos

Segundo Dias (2013), cerâmica é o nome genérico que se dá a materiais preparados, sob altas temperaturas, a partir de compostos inorgânicos como silicatos e óxidos metálicos. Materiais como vidro e cimento podem ser incluídos, mas às vezes são considerados grupos à parte pela sua importância prática.

O setor da cerâmica é diversificado em nível de produtos, encontrando-se estruturado em subsetores. Mundialmente, o setor da cerâmica divide-se em sete subsetores (APICER, 2012), conforme mostrado na Tabela 2.1. A nível nacional, o setor da cerâmica encontra-se estruturado em cinco subsetores de acordo com a produção (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Subsetores da indústria cerâmica.

Classificação Mundial	Classificação Nacional	Tipo de Produtos	Figura Ilustrativa
Tijolos e Telhas	Cerâmica Estrutural	Telha, tijolo, abobadilha	
Tubagem cerâmica			
Pavimentos e Revestimentos	Pavimentos e Revestimentos	Mosaicos, azulejos	
Louça Sanitária	Louça Sanitária	Banheiras, lavatórios	
Cerâmica Utilitária e Decorativa	Cerâmica Utilitária e Decorativa	Louça de cozinha, objetos decorativos	
Refratários	Cerâmica técnica, Refratários e Isoladores cerâmicos	Ferro, cimento, vidro, eletrônicos, inovações biomédicas	
Cerâmica Técnica			

a) Cerâmica estrutural: No Brasil os principais produtos do setor de cerâmica vermelha são: blocos, tijolos, telhas, elementos vazados, lajes, lajotas, ladrilhos vermelhos, tubos, agregados leves, além de produtos para outros fins como argilas piro expandidas, objetos ornamentais e utensílios domésticos. O setor brasileiro é o principal fornecedor de materiais para alvenarias e coberturas para uso residencial e comercial. Utiliza basicamente a argila comum como principal fonte de matéria-prima. O mercado

de tijolos, blocos e telhas é caracterizado por ser regional uma vez que o custo de transporte tanto das matérias-primas como do produto final é elevado, além de estar condicionado ao fato de depender do tipo da zona de construção e de condições climáticas. A produção deste tipo de materiais ocorre sempre em uma época do ano, podendo ocorrer mudanças devido a alguns fatores, como economia, demanda, alterações nas taxas de juros prevalentes, entre outros. A produção de tijolos é intensificada ao nível do uso de energia, sendo que os custos do uso da mesma representam 30% do custo final do produto.

b) Pavimentos e revestimentos: A cerâmica de revestimento, ou placa cerâmica, é um material de construção civil utilizado para cobrir e dar acabamento a superfícies lisas, em ambientes residenciais, comerciais e industriais e em locais públicos. Nessa categoria enquadram-se pisos, azulejos, ladrilhos e pastilhas. É produzida e comercializada no mercado nacional uma grande variedade de tipos de revestimentos, abrangendo desde peças populares, até placas sofisticadas, tecnicamente e em seu design, como os porcelanatos de grandes dimensões e texturas especiais. Os azulejos, mosaicos e ladrilhos são usados para cobertura de paredes e chão e são compostos na sua maioria por barro. Podem ser modelados de várias formas e são caracterizados pela sua longa duração e aspecto estético. A procura destes materiais é conduzida pela procura de construção nomeadamente novos edifícios, renovações e melhoramentos. É também altamente influenciada por gostos e modas, apresenta fortes economias de escala, mas elevados custos de instalação, tendo como seus maiores produtores a China.

c) Louça sanitária: O segmento de Louça Sanitária faz parte do grupo da Cerâmica Branca, compreendendo materiais constituídos por um corpo branco e em geral recobertos por uma camada vítrea transparente e incolor. As principais matérias-primas minerais utilizadas são argila, caulim e fundentes. Os fundentes, originalmente compostos por feldspato, vem sendo substituídos por outros de menor custo, tais como rochas feldspáticas (pegmatito, granito e leucófilito). A indústria de Sanitários tem como principal atividade a fabricação de bacias, caixas d'águas, bidês, lavatórios, colunas, mictórios, tanques de lavar roupas e acessórios. O mercado da louça sanitária está diretamente ligado à construção. São materiais que pelo seu peso e constituição não podem ser comercializados à longas distâncias. A estrutura de mercado é caracterizada por reduzido número de empresas produtoras maioritariamente multinacionais. Indústria

de louça sanitária é antiga, com preços de venda nivelados e com um ciclo de vida, apesar de bastante sujeito a moda e tendências, relativamente longo. Tem como seus maiores produtores a Alemanha e a Itália.

d) Cerâmica utilitária e decorativa: O mercado de cerâmica utilitária e decorativa (pratos, canecas, taças, bules e vasos) vem diminuindo, fruto da introdução, no mercado, de novos produtos de baixo custo, provenientes de países como a China. Em termos de qualidade, valor e design, o líder deste tipo de produtos continua a ser o mercado europeu. É um produto muito sujeito a moda e com ciclos de vida curtos. Tem como seus maiores produtores Portugal e Reino Unido.

e) Refratários, cerâmica técnica e isoladores cerâmicos: Materiais refratários têm por objetivo manter, armazenar e ceder calor, conter fluídos, resistir a solicitações mecânicas, resistir a solicitações térmicas, resistir a solicitações químicas, suportar cargas sólidas e/ou líquidas, estáticas ou dinâmicas. A magnésia sinterizada é a principal matéria-prima para produção de refratários básicos. A magnésia sinterizada resulta do processo de calcinação e sinterização da magnesita, sob condições de elevadas temperaturas, em geral da ordem de 1.800 a 2.000°C. Além da magnésia sinterizada, entre os refratários básicos é relevante o consumo de magnésia eletrofundida (magnésia fundida com vistas a aumentar o tamanho dos grãos de cristal e assim melhorar suas propriedades refratárias) e doloma (dolomita, carbonato de cálcio e magnésio, calcinada e sinterizada). Entre os refratários não-básicos, as principais matérias-primas são as diversas fontes de alumina (Al_2O_3) entre elas argilas (baixo teor de alumina), chamotes (teor intermediário de alumina) e bauxitas (alto teor de alumina). Os produtos refratários são usados em processos de fabricação à altas temperaturas. São caracterizados pela sua resistência ao stress mecânico, térmica e químico, sendo usado na produção de ferro, cimento, vidro, entre outras. Os principais clientes desta indústria são as outras indústrias (siderúrgica ou produtos elétricos), uma vez que esta produção é para consumo intermediário e não consumo final. Por sua vez, a cerâmica técnica é usada em produtos eletrônicos, inovações biomédicas e automóveis. É um mercado detido em 80% pelos Estados Unidos e Japão.

f) Blocos cerâmicos: Os blocos cerâmicos podem ser utilizados em alvenaria estrutural, em que as paredes também têm a função de sustentar a construção. Pode

dispensar estruturas de concreto armado, suportando vários pavimentos. Este tipo de bloco não pode ser cortado ou serrado e as paredes estruturais não podem ser removidas ou alteradas depois de prontas. O sistema também permite a execução de projetos racionalizados - com a redução de perdas de materiais, a diminuição de entulho e maior agilidade na obra.

2.2 Argila

2.2.1 Histórico

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 (SILVA, 2009).

No que se refere à matéria-prima, o setor de cerâmica vermelha utiliza basicamente argila comum, em que a massa é tipo monocomponente - só argila - e pode ser denominada de simples ou natural. A massa ideal é obtida, em geral, com base na experiência acumulada, visando uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, facilitando o manuseio e propiciando resistência mecânica durante a queima (SEBRAE, 2008).

A argila aparece em todos os tipos de formação rochosa, das mais velhas para as formações mais recentes, e ígneas e sedimentares de todos os tipos, conseqüentemente, as suas características químicas, mineralógicas e físicas variam muito, mesmo entre as camadas do mesmo depósito de argila (AMADO *et al.*, 2011).

2.2.2 Conceito de argila

O termo argila permite vários conceitos subjetivos e interpretativos, tornando-o, de certa forma, indefinível e com vários sentidos. Os vários conceitos de argila são função da formação profissional, técnica ou científica dos que por ela se interessam (geólogos, pedólogos, agrônomos, químicos, mineralógicos, petrólogos, ceramistas, engenheiros civis, sedimentólogos, etc.), quer seja pela sua gênese, quer seja pelas suas propriedades, quer ainda pelas suas aplicações. De fato, o termo argila representa para um ceramista um

material natural que, quando misturado com água, se converte num material plástico/pastoso. Todavia, o conceito de argila, que reúne aceitação mais geral, considera a argila como sendo um produto natural, terroso, constituído por componentes de grão muito fino, entre os quais se destacam, por serem fundamentais, os minerais argilosos. Este produto natural desenvolve, quase sempre, plasticidade em meio úmido e endurece depois de seco e, mais ainda, depois de cozido (MEIRA, 2001).

A argila é constituída pelos argilominerais, apresentando como impurezas mais comuns o quartzo e os hidróxidos de alumínio e ferro, além de mineral micáceo e matéria orgânica (VIEIRA et al., 2016).

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

2.2.3 Classificação das argilas

Segundo o SEBRAE (2008), o setor de cerâmica vermelha utiliza como matéria-prima basicamente a argila comum; a massa resultante pode ser denominada simples ou natural, sendo composta por matéria orgânica, impureza e minerais de ferro, que adquirem maior resistência mecânica a baixas temperaturas (entre 900 e 1.100°C).

As matérias-primas provêm de depósitos dos seguintes tipos:

- Argilas residuais: permanecem na zona de intemperismo (argila de inundação);
- Argilas sedimentares: que se deslocam da zona de intemperismo para de acúmulo;
- Argilas diagenéticas: alteradas química e mineralogicamente, após soterramento.

Seja qual for o tipo e a origem da matéria-prima, sua qualidade é fundamental para o sucesso do produto final. Nesse sentido, deve-se evitar uma argila “fraca” ou “magra”, que segundo Vieira e Pinheiro (2011), são argilas mais arenosas, com coloração amarela e ricas em compostos de ferro.

Os fornecedores de matéria-prima podem ser agrupados em duas categorias:

- Pequenas e médias empresas de capital nacional que ainda não aperfeiçoaram suas técnicas de exploração;
- Grandes mineradoras (em geral associadas a multinacionais ou ao setor de revestimento), mais organizadas e com oferta de produtos de melhor qualidade.

A Figura 2.3 mostra, em diagrama ternário, de forma sintética, uma classificação para a maior parte das argilas utilizadas em cerâmica, com base na cor após queima em atmosfera oxidante. São tidas em consideração diversas argilas com aplicações nas três indústrias seguintes: cerâmica branca, cerâmica vermelha ou estrutural e refratários.

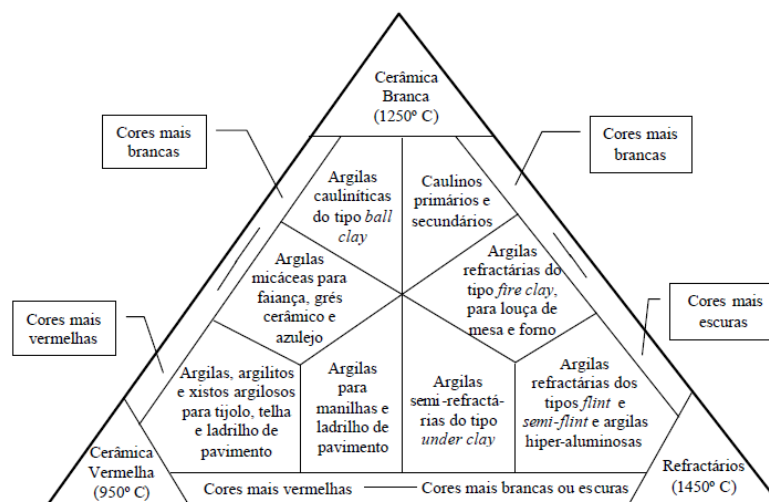


Figura 2.3 - Classificação de argila para uso cerâmico com base na cor após queima a 950°C, 1250°C e 1450°C em atmosfera oxidante. Fonte: MEIRA (2001).

2.2.4 Propriedades da argila

As propriedades da argila são decorrentes de suas características intrínsecas, que são (ANDRADE *et al.*, 2005):

- a) granulometria (elevado teor de partícula com granulometria inferior a 2 μm);
- b) composição química e mineralógica (argilominerais e impurezas presentes);

c) capacidade de troca de cátions, resultante de substituições isomórficas no retículo cristalino dos argilominerais.

Segundo MEIRA (2001), algumas propriedades importantes da argila são:

a) Granulometria: É uma das características mais importantes dos minerais argilosos e que domina muita das suas propriedades. Na cerâmica, estão dependentes da dimensão, da distribuição e da forma do grão, propriedades tais como a plasticidade das pastas, a permeabilidade e a resistência em verde e em seco dos corpos cerâmicos.

b) Superfície específica: Possuem elevada superfície específica, muito importante em certos usos industriais em que a interação sólido-líquido depende diretamente da superfície específica do sólido, tais como: cerâmica, catálise, branqueamento de óleos, etc. A superfície específica de uma argila é definida como (área da superfície externa) + (área da superfície interna das partículas constituintes), por unidade de massa, expressa em m^2/g .

c) Troca ou permuta de íons: Os minerais argilosos possuem a propriedade de trocar íons fixados na superfície exterior dos seus cristais, nos espaços inter-camadas estruturais ou localizados em outros espaços interiores mais acessíveis por outros íons existentes em soluções aquosas envolventes. A capacidade de troca iônica que um mineral argiloso ou argila pode adsorver e trocar é uma propriedade que resulta do desequilíbrio de suas cargas elétricas. Esse desequilíbrio deve-se a substituição isomórficas, as quais influenciam fortemente determinadas propriedades físico-químicas e tecnológicas. A troca de íons é um processo estequiométrico segundo o qual cada íon adsorvido pelo mineral argiloso, provoca a liberação do íon anterior fixado.

d) Viscosidade: O modo como o sistema argila e água flui sob ação de uma força, tem muita importância na indústria cerâmica. A moldagem ou formação dos corpos cerâmicos através de processos variados (extrusão, prensagem por via seca ou úmida, trabalho e alambugem) requer bons conhecimentos das propriedades reológicas da pasta ou barbotina. A viscosidade de um fluido traduz a resistência que ele oferece à fluência. No sistema composto de argila e água, o comportamento reológico assemelha-se ao de um fluido constituído por um número infinito de moléculas lamelares que, quando em

movimento, deslizam umas sobre as outras. A viscosidade não é mais do que a medida de fricção interna de suas moléculas e a fluidez é o inverso da viscosidade.

e) Endurecimento após secagem ou cozadura: Durante a secagem dos corpos cerâmicos (à temperatura de aproximadamente 110°C) ocorrem contrações de volume. Estas contrações podem ser boas, permitindo a separação do corpo cerâmico do molde de gesso, ou inconvenientes do ponto de vista tecnológico, provocando o aparecimento de fendas no corpo caso a contração seja muito rápida ou não uniforme. Os corpos cerâmicos secos adquirem certa resistência mecânica que permite a sua manipulação no decurso do processo de fabricação. A resistência mecânica é maior ou menor em função de parâmetros tais como: a forma e espessura do corpo cerâmico, tipo e teor de argila, bem como espessura e forma das partículas. Durante o cozimento, os componentes minerais que constituem o corpo cerâmico, em determinadas temperaturas, sofrem modificações estruturais ocasionando retrações ou expansões volumétricas do corpo. As estruturas muitas vezes colapsam e, para temperaturas relativamente elevadas, podem desenvolver-se as chamadas fases de alta temperatura e as fases vítreas. Por isso, o cozimento proporciona aumento notável da resistência mecânica dos corpos cerâmicos.

2.3 Tijolos

2.3.1 Etapas de fabricação

Durante a fabricação de um tijolo cerâmico argiloso, segue-se uma série de etapas. A Figura 2.4 mostra um fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila “dura”. A Figura 2.5 mostra um fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila “mole”.

A secagem é uma etapa delicada e complexa no processo de fabricação de materiais cerâmicos. É comum nesta etapa ocorrerem defeitos de secagem nas peças, através do aparecimento de fissuras, que aparentemente some, na verdade ela apenas diminui, sendo perceptível seu defeito somente após queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem permite, por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

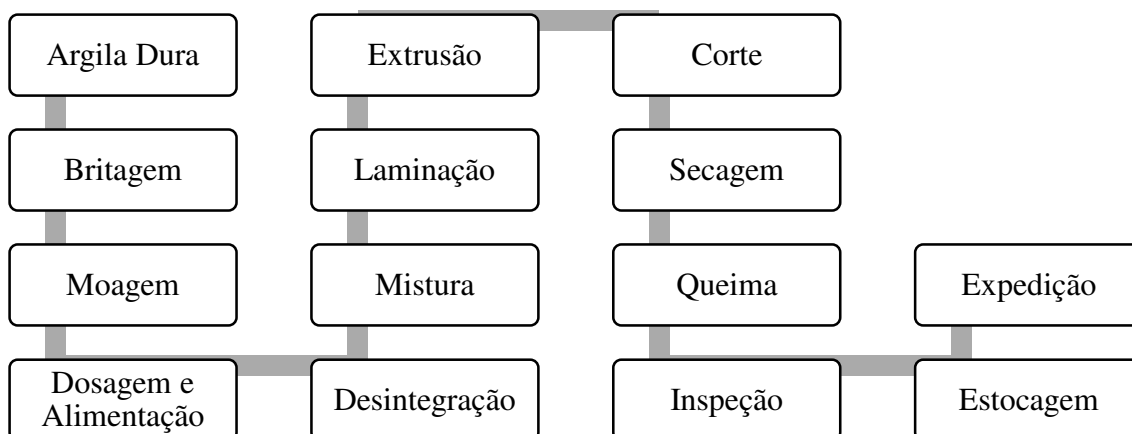


Figura 2.4 - Fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila dura.

Fonte: SEBRAE (2008).

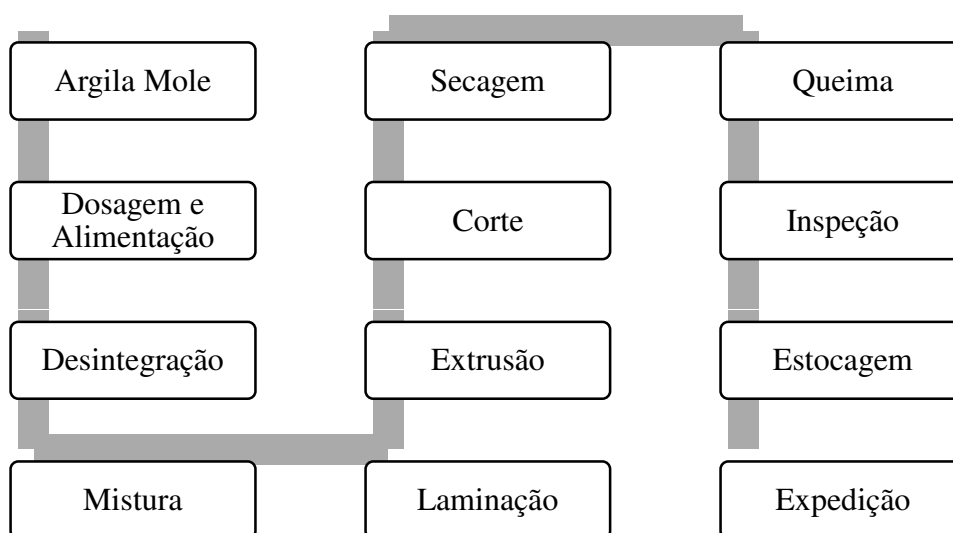


Figura 2.5 - Fluxograma das etapas de fabricação do tijolo cerâmico para argila mole.

Fonte: SEBRAE (2008).

2.3.2 Alguns defeitos encontrados no produto final

Do ponto de vista industrial, a operação de secagem é uma das etapas mais delicadas e importantes de toda a cadeia produtiva ceramista. A esta operação encontram-se associadas diversas perdas de massa e variações das dimensões do corpo cerâmico. A ocorrência de gradientes térmicos e de umidade durante o processo de eliminação de água, pode ocasionar tensões térmicas e hídricas geradoras de defeitos nos produtos, como deformações e fissuras, inutilizando ou reduzindo a qualidade do produto. A umidade é responsável pela plasticidade do material na sua etapa de conformação. Porém, para o restante do processo, a umidade é prejudicial, pois a peça após a conformação não pode

ser bruscamente aquecida até a temperatura de queima sem correr o risco de partir-se. Isso resulta da umidade contida na peça (MOTA NETO, 2008).

Além dos problemas gerais, foram identificados também problemas específicos no sistema produtivo dos revestimentos cerâmicos (GORINI e CORREIA, 1999):

- Controle de recebimento da matéria-prima deficiente;
- Variação de tonalidade das cores;
- Variação nas dimensões;
- Defeito superficial;
- Número elevado de produtos, dificultando o planejamento e o controle da produção;
- Controle de estoque inadequado;
- Logística interna e *layout* deficiente;
- Baixa escolaridade da mão-de-obra;
- Ausência de programas de treinamento;
- Dificuldade de negociação com varejistas.

2.4 Secagem

2.4.1 Fundamentos

A secagem consiste em uma importante operação na qual se submetem diversos produtos industrializados. Porém, este processo é concebido como uma operação unitária que demanda uma intensa quantidade de energia o que implica em um grande impacto comercial no custo do produto final (SILVÉRIO, 2010).

Devido a importância em diversas aplicações industriais, a secagem tem sido estudada exaustivamente ao longo dos anos e, por isso, diversos autores a definem muito bem.

Secagem é a remoção, voluntária ou não, total ou parcial, de uma fase líquida ou gasosa de qualquer material, que envolve exclusivamente a transferência de calor e massa. Trata-se da prática para a redução de seu nível de umidade até o nível mais adequado,

embora isso não signifique a remoção total de água do produto. A relação entre a temperatura do ar de secagem e a umidade do produto varia principalmente em função do destino do produto. As especificações dos sistemas de secagem podem mudar quanto a sua capacidade, processo de operação, combustível utilizado, versatilidade e limites de vazão do fluxo de ar e temperatura dentro do secador (SILVA, 2012).

A secagem é um processo de transferência de calor e massa, 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 da umidade presente. O controle do processo de desumidificação e o conhecimento dos mecanismos do movimento de umidade são fundamentais, uma vez que, com dados de simulação e/ou experimental, pode-se obter condições ótimas no processo, minimizando as perdas do produto e o consumo de energia (ALMEIDA, 2003).

O processo de secagem envolve, simultaneamente, a transferência de calor e de massa com o objetivo de remover grande parte da água presente no material poroso por meio de seu transporte no interior e evaporação na superfície em um meio gasoso insaturado que envolve o material. A análise dos mecanismos envolvidos na secagem permite, evitar defeitos a partir do controle da taxa de secagem (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

A secagem tem a finalidade de eliminar um líquido volátil contido num corpo não volátil, através de evaporação. Portanto, a secagem é caracterizada pela evaporação da água do material. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e em seguida a transferência de massa arrastará o vapor formado a partir da superfície do material a ser seco. Este processo, de fornecimento de calor da fonte quente para o material úmido que promoverá a evaporação da água do material e, em seguida, a transferência de massa arrastará o vapor formado (PARK *et al.*, 2007).

A secagem artificial é realizada em uma estufa com circulação de ar, submetendo-se o produto úmido à ação de uma corrente de ar, geralmente quente, obtida por uma fonte de energia calorífica, que pode ser realizada à baixas temperaturas, usando-se o ar natural levemente aquecido, e a altas temperaturas onde, usualmente, são empregados processos

de secagem em camada fixa, fluxo cruzado, fluxo concorrente e fluxo contracorrente (SOUSA, 2007).

Quando o ar quente entra em contato com a peça cede-lhe parte de sua energia, que é utilizada para elevar a temperatura da peça úmida e transformar o líquido em vapor. Incorporando ao ar, o vapor aumenta a sua umidade absoluta (massa de água por unidade de massa de ar seco). A parte restante da energia não utilizada pelo ar de secagem é dividida em duas frações: uma é transmitida para o equipamento de transporte dos produtos, que tem sua temperatura aumentada entre a entrada e a saída do secador; outra, ao exterior devido à insuficiência do isolamento e à falta de estanqueidade do secador (fugas de ar quente ou entrada de ar frio). Assim, a energia útil efetivamente usada para transformar o líquido em vapor representa apenas uma parcela do total da energia cedida pelo ar de secagem. O restante é considerado energia perdida. Isto geralmente resulta em um rendimento térmico total da operação de secagem por convecção inferior a 60 % (MOTA NETO, 2008).

Segundo Park *et al.*, (2007), a diferença do conteúdo de umidade inicial do material e do conteúdo de umidade de equilíbrio, representa a força motriz para a secagem. A Figura 2.6 mostra a atividade de água em função do conteúdo da umidade.

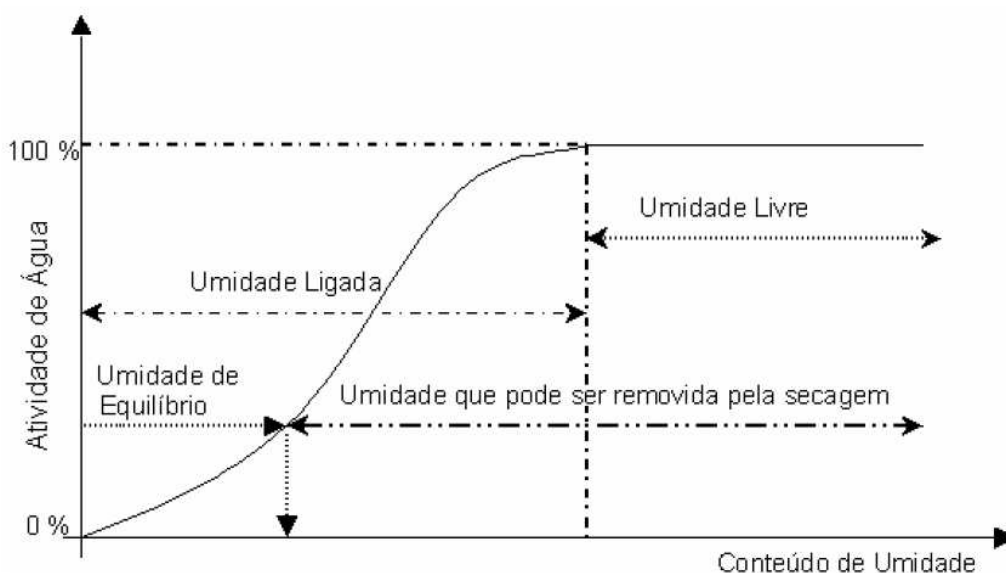


Figura 2.6 – Curva de retenção de umidade.

Fonte: PARK *et al.*, (2007).

A seguir são listadas várias teorias que tentam descrever o transporte de água e calor em meios porosos.

- 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;
- Teoria de Fortes e Okos

Discussão com riqueza de detalhes sobre as teorias de secagem podem ser encontradas em Lima (1995).

A seguir são citados alguns mecanismos de transporte de água, fornecidos pela literatura (LIMA, 1995).

- Transporte por difusão líquida: ocorre devido a gradientes de concentração de água na forma líquida;
- Transporte por difusão de vapor: ocorre devido a gradientes de concentração de água e pressão parcial do vapor (causado por gradientes de temperatura);
- Transporte por efusão (escoamento Knudsen): ocorre quando o diâmetro médio dos poros por onde o vapor migra tem tamanho equivalente ao das moléculas que compõem o vapor. É importante para condições de alto vácuo, como por exemplo, secagem do produto congelado, por sublimação, em “freeze-drying”;
- Transporte de vapor por termo fusão: ocorre devido a gradientes de temperatura;
- Transporte de líquido por forças capilares: ocorre devido a fenômenos de capilaridade;
- Transporte de líquido por pressão osmótica: ocorre devido a força osmótica;
- Transporte de líquido por gravidade: ocorre devido a ação de forças gravitacionais;
- Transporte de líquido e de vapor: ocorre devido à diferença de pressão total, causada pela pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade.

2.4.2 Secagem de produtos cerâmicos

A secagem é o processo responsável pela retirada de água durante a fabricação de produtos cerâmicos. Esta etapa é uma das mais essenciais do processo produtivo, tanto do ponto de vista econômico quanto da qualidade final da peça produzida (SILVA et al., 2013).

Essa etapa ocorre após a prensagem das peças, que inclui a retirada do excesso de umidade, de forma a uniformizá-las antes da entrada no forno. Esta secagem é realizada geralmente por secadores, cujo ar quente circula entre as peças a uma determinada temperatura e velocidade. Considera-se a secagem uma etapa fundamental dentro de uma linha de produção, sendo responsável pelas dimensões finais do produto e pela presença de defeitos estéticos (MOTA NETO, 2008).

Durante essa etapa, surgem elevados gradientes de umidade e temperatura no interior do sólido. Com isso, simultaneamente, são geradas tensões térmicas e hídricas, que podem causar defeitos irreversíveis na peça produzida, diminuindo a produtividade do processo e aumentando custos operacionais (SILVA et al., 2013).

A distribuição de temperatura e umidade no interior de um sólido submetido a um processo de secagem depende fortemente das propriedades físicas do material de que é feito o sólido e das condições de transferência de calor e/ou massa entre a superfície e o fluido ambiental, no qual o sólido é posto para secar. A distribuição de temperatura e/ou umidade num processo transiente, em sólido submetido à secagem, será uniforme em relação às coordenadas espaciais se a resistência interna a transferência de calor e/ou massa for pequena se comparada à resistência a convecção na superfície do sólido (ALMEIDA *et al.*, 2003).

Nessa etapa, a umidade média encontrada nos produtos cerâmicos é reduzida da faixa de 5,5 % a 6,5 % para valores inferiores a 1%. Os objetivos principais dessa operação consistem em aumentar a resistência mecânica do produto, garantir a uniformidade térmica superficial, distribuir de forma homogênea a umidade nas peças e assegurar que a temperatura de descarga mantenha-se constante ao longo do tempo (MOTA NETO, 2008).

Segundo a APICER (2016), existe um conjunto de medidas a serem consideradas com a finalidade de promover a eficiência energética do equipamento de secagem nessa fase do processo, entre eles:

- Controlar de forma automática as condições de operação, temperatura e humidade;
- Verificar e melhorar o isolamento térmico;
- Evitar o funcionamento quando não necessário;
- Reduzir as perdas térmicas na entrada e saída;
- Regular o excesso de ar à entrada da instalação de combustão;
- Otimizar a recirculação de ar nos secadores;
- Privilegiar secadores horizontais em vez de secadores verticais. Os primeiros apresentam, em geral, ciclos de secagem mais curtos;
- Otimizar a passagem entre o secador e o forno, utilizando por exemplo a zona de pré-aquecimento do forno para finalizar o processo de secagem;
- Aproveitar o calor dos gases de exaustão dos fornos e o calor residual do ar dos processos de secagem para outros fins;
- Garantir a manutenção e limpeza adequada de todos os componentes.

Quando a produção de peças cerâmicas acontece em escala industrial, uma variável que deve ser levada em consideração refere-se ao consumo da energia gasta ao longo do processo produtivo. O consumo de energia térmica e elétrica representa, atualmente, uma grande parcela do custo total de produção dessas indústrias, estando a secagem entre as etapas que mais consomem energia (SILVA et al., 2013).

2.4.3 Modelos de secagem

Segundo Dalpasquale (2010), a secagem é um processo que pode demorar desde algumas horas até vários dias, dependendo da técnica usada e dos seus parâmetros. Ao se investigar a melhoria de qualquer uma dessas técnicas, pode-se gastar tempo considerável, se elas forem repetidas fisicamente. Entretanto, a simulação matemática de secagem permite fazer a otimização desses processos em tempo significativamente menor e de maneira econômica. Essa maneira científica de descrever a secagem de produtos foi

amplamente investigada nas décadas de 1960 e 1970, quando foi também muito bem discutida.

No meio científico mundial, os diversos processos de secagem têm sido descritos e modelados matematicamente por muitos pesquisadores ao longo de muitas décadas. Recentemente diversos modelos de secagem vêm sendo apresentados, alguns simples e outros sofisticados, com vistas a correlacionar os dados experimentais da secagem de um produto a um modelo matemático. Dependendo da espessura da camada do material estudado, esses modelos podem ser classificados em modelos de secagem em camada fina (modelos ao nível de partícula) e em camada espessa (modelos ao nível de secador). A importância prática da secagem em camada fina é muito limitada, porque geralmente os materiais são secos em camadas espessas, estacionárias ou em movimento. Entretanto, os modelos mais usados pelos pesquisadores levam em consideração propriedades termo-físicas, cinéticas de secagem, 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 para determinadas condições operacionais pré-estabelecidas (HOLANDA, 2007).

O desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o processo de secagem tem sido objetivo de estudo de muitos pesquisadores por várias décadas. Na tentativa de correlacionar dados experimentais da secagem de cada material particular a um modelo matemática, tem sido apresentada uma gama de modelos que representam a cinética de secagem de cada material em particular (LIMA, 1999).

A simulação durante a redução do teor de água é importante no desenvolvimento e aprimoramento de equipamentos de secagem, e para tal utilizam-se modelos matemáticos que possam representar satisfatoriamente a perda de água durante o período de secagem em função da espessura de camadas do material. Além da simulação, o conhecimento das propriedades termodinâmicas nas etapas de secagem dos produtos também é importante fonte de informação para projetar secadores, calcular a energia requerida na etapa, estudar as propriedades da água adsorvida, avaliar a microestrutura dos alimentos e estudar os fenômenos físicos que ocorrem na superfície dos produtos (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Para isso, a compreensão desses fenômenos depende de investigações a partir de estudos específicos frente à cinética de secagem que permitam, através de dados da umidade do material em função do tempo, conhecer os mecanismos predominantes na transferência de massa do material para o fluido. Além disso, possibilita estabelecer as equações da umidade em função do tempo para diferentes períodos de taxa de secagem que deve ser relacionada a um determinado produto e uma determinada operação (VÉRAS, 2010).

Segundo Park *et al.* (2007), os produtos são muito diferentes entre si, devido a sua composição, estrutura, e suas dimensões. As condições de secagem são muito diversas, de acordo com as propriedades do ar de secagem e a forma como se faz o contato ar-produto: por exemplo, secagem com ar quente na superfície de um leito de partículas é um caso (a água estando situada dentro das partículas), ou outro caso é a suspensão de uma partícula em um fluxo de ar.

Na Figura 2.7 são mostradas as curvas de evolução do teor de água do produto, de sua temperatura e da velocidade de secagem, também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo, para um experimento utilizando o ar com propriedades constantes.

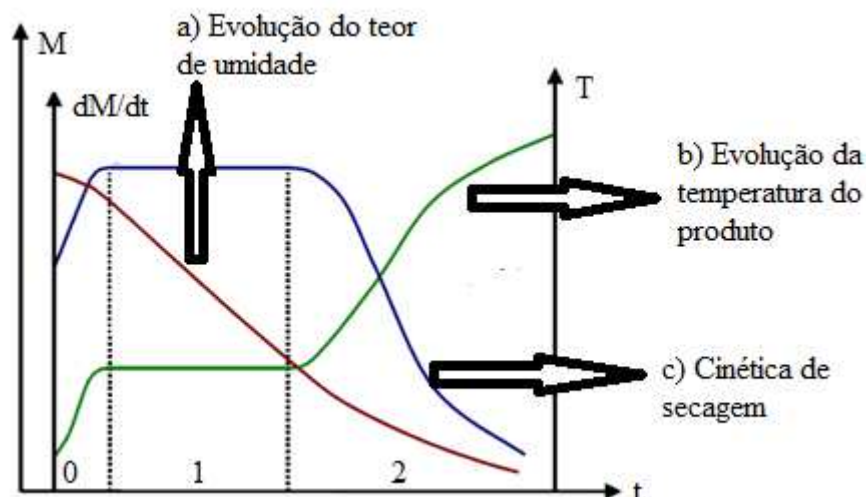


Figura 2.7 - Curva de secagem.

Fonte: PARK *et al.* (2007).

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem (teor de umidade do produto em relação à evolução do tempo de secagem), isto é, a curva

obtida através da variação da massa do produto durante a secagem numa determinada condição estabelecida.

A curva (b) representa a variação da temperatura do produto durante a secagem (variação da temperatura do produto, em relação à evolução do tempo), isto é, é a curva obtida medindo a temperatura do produto durante a secagem.

A curva (c) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto (variação do teor de umidade do produto por tempo, em relação à evolução do tempo), isto é, a curva obtida diferenciando-se a curva (a).

Analisando a Figura 2.7 verifica-se a existência de três períodos distintos nas curvas. A seguir detalha-se cada um deles.

Período 0: É o período de indução ou o período de se entrar em regime operacional. No começo, o produto está geralmente mais frio do que o ar, a pressão parcial de vapor da água na superfície do produto é baixa e, por consequência, a transferência de massa e a velocidade de secagem também são baixas. O calor chegando em excesso acarreta uma elevação da temperatura do produto ocorrendo um aumento de pressão e da velocidade de secagem. Este fenômeno continua até que a transferência de calor compense exatamente a transferência de massa. Se a temperatura do ar for inferior àquela do produto, esta última diminuirá até atingir o mesmo estado de equilíbrio. A duração deste período é insignificante em relação ao período total de secagem.

Período 1: Consiste no período de velocidade (taxa) constante de secagem. Durante este período, como no anterior, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem elevada. A água evapora-se como água livre. A pressão de vapor de água na superfície é constante e é igual à pressão de vapor de água pura (apenas H₂O) à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e é igual à temperatura de bulbo úmido, essa temperatura reflete as propriedades físicas do material, sendo característica do fato, de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante. Este período continua enquanto a migração de água do interior até a superfície do produto seja suficiente para acompanhar a perda por evaporação de água na superfície.

Período 2: Consiste no período de velocidade (taxa) decrescente de secagem. Desde o momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui. Apesar de alguns autores definirem o valor de teor de água do produto no ponto de transição entre os períodos 1 e 2 como sendo o teor de água crítico, seria conveniente denominar este ponto como o ponto de inflexão de taxa constante à taxa decrescente de secagem, pois este ponto, longe de ser uma propriedade física do material, é um ponto que depende, inclusive, das condições operacionais de secagem. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período o fator limitante é a migração interna de água. Esta redução da taxa (ou velocidade) de secagem é às vezes interpretada como uma diminuição da superfície molhada no período 2, mas a interpretação mais frequente é pela diminuição da pressão parcial de vapor de água na superfície. No final deste período, o produto estará em equilíbrio com o ar e a velocidade de secagem é nula.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

3.1 Metodologia experimental

3.1.1 Caracterização da argila

3.1.1.1 Preparação das amostras

A matéria prima investigada neste trabalho é uma argila utilizada na fabricação de tijolos cerâmicos da Industria Cerâmica Cincera (Figura 3.1), localizada na cidade de Santa Rita – PB, Brasil. Na Figura 3.2 é mostrado a matéria prima utilizada na caracterização.



Figura 3.1 – Jazida da Industria Cerâmica Cincera.



Figura 3.2 – Argila “in natura”.

Para obtenção das amostras utilizadas na caracterização foram adotados os seguintes procedimentos: secagem da argila em estufa a 100°C durante 24 horas, moagem em moinho de martelo (Figura 3.3) e peneiramento num peneirador de malha nº 200 (0,074 mm), mostrado na Figura 3.4.

As amostras de argilas foram acondicionadas em sacos plásticos e colocadas em recipientes plásticos fechados para evitar umidificação. Logo após essas etapas, a argila foi caracterizada, em termos de análise química, mineralógica, granulométrica e térmica/gravimétrica.

A análise química tem como objetivo apresentar a composição química e o percentual dos componentes presentes na argila em estudo. A análise mineralógica objetiva apresentar os constituintes mineralógicos da argila e suas funções. Já a análise granulométrica fornece informações da distribuição de tamanho das partículas, enquanto que as análises térmica e gravimétrica objetiva apresentar a distribuição de temperatura e a perda de umidade em função da temperatura, respectivamente.

Os ensaios/análises foram realizados no Laboratório de Tecnologias de Materiais e no Laboratório de Caracterização de Materiais da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. Após os procedimentos básicos adotados, a argila foi separada em pequenas quantidades e levadas as salas responsáveis por cada caracterização.



Figura 3.3 – Moinho de martelo



Figura 3.4 – Peneirador de malha nº 200

3.1.1.2 Análises química, mineralógica, granulométrica e térmica/gravimétrica

Para realização da caracterização da argila, os seguintes procedimentos específicos foram adotados:

Análise química – consiste em determinar a composição química de uma matéria-prima, fornecendo os percentuais de óxidos presentes e também os valores de perda ao fogo. Pode ser realizada através de métodos químicos ou físicos. Os métodos químicos geralmente são através de reações de precipitação seletiva e reações de formação de complexos corantes. Os métodos físicos podem ser através de espectrofotometria ou ainda por fluorescência de raios X. Atualmente a fluorescência de raios X é frequentemente utilizada para determinar a composição química em materiais cerâmicos por ser um método rápido, preciso e não destrutivo.

Nesta pesquisa, a amostra da argila foi passada em peneira ABNT n° 200 (0,074 mm) e submetida à análise química por fluorescência de raios X em equipamento EDX 720 da Shimadzu (Figura 3.5). O espectrômetro de fluorescência de raios X determina semi quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra, mediante a aplicação de raios X na superfície da amostra e a posterior análise dos raios X fluorescentes emitidos. A geração de raios X é feita por meio de um tubo com alvo de Rh.



Figura 3.5 – Espectrômetro de fluorescência de raios X.

Análise mineralógica (por difração de raio X) – Corresponde a uma das principais técnicas de caracterização, pois além de ser possível determinar os parâmetros da célula

unitária e pontos de simetria. Possibilita a identificação dos minerais presentes, e também permite estudar as características cristalográficas destes minerais.

O equipamento de difração de raios X (Figura 3.6) é basicamente um tubo emissor de raios X, com uma câmara circular, onde se situa a amostra (goniômetro) e um detector que recebe os raios difratados. O ensaio consiste em incidir um feixe de raios X (de comprimento de onda conhecido), sobre uma camada fina de pó, que gira no centro do goniômetro. Consequentemente, o feixe se difrata e reflete com ângulos que são característicos do retículo cristalino, obtendo-se o correspondente difratograma.

Ao se caracterizar argilominerais, a utilização da técnica de difração de raios X torna-se ainda mais indicada, pois uma análise química reportaria os elementos químicos presentes no material, mas não a forma como eles estão ligados. Uma vantagem é que o difratograma apresenta um número grande de picos, o que facilita a identificação, principalmente no caso de misturas, onde pode haver superposição de alguns picos.

Com a caracterização da argila e a determinação das suas propriedades, fica fácil estudar os beneficiamentos que devem ser feitos para alterar uma ou várias propriedades do corpo cerâmico, o que causa melhoramento nas propriedades do produto final. A análise por difração de raios X da amostra, na forma seca, foi realizada em equipamento XRD 6000 da Shimadzu. A radiação utilizada foi $K\alpha$ do Cu (cobre), tensão de 40 kV, corrente de 30 mA. A velocidade do goniômetro foi de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.



Figura 3.6 – Difratorômetro de raios X.

Análise granulométrica – técnica de caracterização muito utilizada em diversos ramos industriais devido a sua facilidade de operação, rapidez e amplitude de leitura. Para realização desta caracterização a argila foi submetida a um ensaio por difração à laser de acordo com as instruções operacionais do granulômetro CILAS 1064 LD (2007) (Figura 3.7). A amostra foi passada no peneirador de malha nº 200 e dispersa em 150 mL de água destilada com o desflocante hexametáfosfato de sódio na proporção indicada pela norma da ABNT.

A preparação da dispersão foi realizada em agitador Hamilton Beach N5000 com uma velocidade de 17.000 rpm durante 20 minutos, seguida por um repouso de 24 h. Após este período, a dispersão foi novamente agitada durante 5 minutos e colocada no equipamento CILAS modelo 1064, em modo úmido, até atingir a concentração ideal que é de 150 unidades de difração/área de incidência. A análise granulométrica por difração de laser utiliza o método de dispersão de partículas em fase líquida associado com um processo de medida óptica através de difração de laser. Neste método, é combinada a relação proporcional entre a difração do laser e a concentração e tamanho de partículas.



Figura 3.7– Granulômetro a laser.

Análises térmica diferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG) – Engloba uma série de técnicas nas quais as propriedades físicas de uma substância e/ou seus produtos de reação são medidas de forma contínua em função da temperatura em um ciclo térmico controlado. No Brasil, a análise térmica diferencial (ATD) é frequentemente utilizada no estudo de argilas, visando principalmente à identificação dos argilominerais presentes. Esta técnica permite observar as transformações que geram trocas energéticas, devido a fenômenos físicos ou químicos. Estas trocas energéticas podem ser endotérmicas (onde

ocorre absorção de calor) ou exotérmicas (onde ocorre liberação de calor). Para cada troca energética, aparece um pico no gráfico, e de acordo com a temperatura desses picos e sua direção, pode-se identificar o mineral, ou a transformação ocorrida com a amostra. Assim, identifica-se existência de minerais essenciais às argilas e que influenciam as propriedades finais da peça.

Técnica também utilizada é a análise termogravimétrica (ATG) que determina a perda ou ganho de massa que uma amostra sofre em função da temperatura e /ou tempo, onde a amostra é aquecida de maneira controlada, até uma temperatura pré determinada, com velocidade constante. Este método de análise complementa a análise térmica diferencial por fazer distinção entre as reações onde ocorre perda de massa e as reações onde não ocorre.

As análises térmica diferencial (ATD) e as termogravimétrica (ATG) das amostras foram realizadas em equipamento BP Engenharia Modelo RB 3000 (Figura 3.8), operando a 12,5°C/min. A temperatura foi de 1000°C e o padrão utilizado nos ensaios de ATD foi o óxido de alumínio (Al_2O_3) calcinado.



Figura 3.8 – Equipamento utilizado para as análises térmica e gravimétrica.

3.1.2 Experimentos de secagem em estufa

A fim de verificar a influência da temperatura e umidade relativa do ar, nas temperatura, umidade e dimensões do produto, foram realizados experimentos em estufa,

no Laboratório Experimental de Térmica e Fluido, da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Campina Grande-PB.

Inicialmente, foi realizado uma visita à Cerâmica Cincera, localizada na cidade de Santa Rita-PB para o acompanhamento de um período completo de secagem do compensador 07, no secador industrial tipo túnel contínuo. Ao mesmo tempo, foram coletadas amostras dos mesmos compensadores 07, para secagem em estufa no Laboratório Experimental de Térmica e Fluidos, na Universidade Federal de Campina Grande, com o intuito de obter dados para ajudar na simulação da secagem no secador industrial. A autorização para o acompanhamento da secagem, assim como a aquisição do material coletado (compensador 07) foi gentilmente cedida pela Diretora Comercial da empresa Cerâmica Cincera, a Sra. Ivana Maria de Assunção Santiago Mota, a Engenheira Izarelle da Silva Duarte fez o acompanhamento durante toda a visita.

3.1.2.1 Material e equipamentos utilizados

Os materiais verdes utilizados nos experimentos para secagem na estufa têm dimensões aproximadas de 142x301x200 mm (Figuras 3.9 e 3.10).

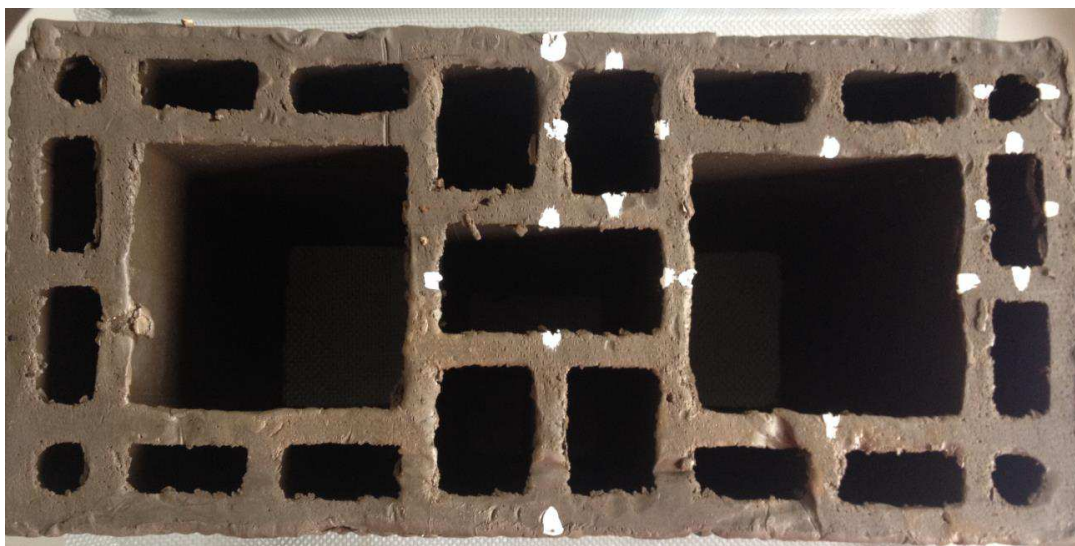


Figura 3.9 – Vista superior do bloco de vedação utilizado no experimento.



Figura 3.10 – Vista lateral do bloco de vedação utilizado no experimento.

Os seguintes equipamentos foram usados nos experimentos de secagem do compensador 07.

- a) Paquímetro digital da marca Messen com precisão de 0,01 mm: utilizado para medições das dimensões das amostras, antes, durante e após a secagem (Figura 3.11).



Figura 3.11 - Paquímetro digital.

b) Balança digital da marca KMACH com precisão de aproximadamente 1 grama: utilizada para medições das massas da amostra, antes, durante e após a secagem, (Figura 3.12).



Figura 3.12 - Balança digital.

c) Termômetro infravermelho modelo TI 890 com escala de -50 a 1000°C: utilizado para medir a temperatura da amostra, antes, durante e após a secagem (Figura 3.13)



Figura 3.13 - Termômetro digital, modelo TI-890.

d) Termohigrômetro digital da marca ICEL, modelo HT 208: utilizado para medir a temperatura e umidade relativa do ar ambiente fora da estufa, antes, durante e após a secagem (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Termohigrômetro.

e) Estufa com circulação mecânica de fabricação da FANEM modelo 320E com controlador digital de temperatura: utilizada para realização da secagem (Figura 3.15).



Figura 3.15 - Estufa com circulação de ar forçada.

3.1.2.2 Procedimentos experimentais.

Foram realizadas algumas operações e medições antes das amostras serem colocadas na estufa:

- a) dimensionamento do compensador (largura, comprimento e altura);
- b) dimensionamento do furo circular (diâmetro);
- c) dimensionamento dos furos paralelepípedicos (largura e altura);
- d) medição da massa;
- e) temperatura do tijolo;
- f) temperatura do ar ambiente;
- g) 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.

As medições foram realizadas com intervalos de 5, 10 e 30 minutos, com 6 repetições cada uma, para todas as temperaturas pré-definidas. Depois, com intervalo de 60 minutos até a massa ficar constante. Logo após, a amostra foi submetida a uma secagem por 24 horas, à temperatura constante para obtenção da massa de equilíbrio e em seguida, por mais 24 horas na temperatura de 100°C para obter a massa seca.

Nas Figuras 3.16 e 3.17 ilustra-se o modelo do corpo de prova utilizado nos experimentos, com imagem 3D e 2D.

Na Figura 3.18 ilustra um esquema do compensador, indicado o ponto onde a temperatura na superfície do compensador foi medida.

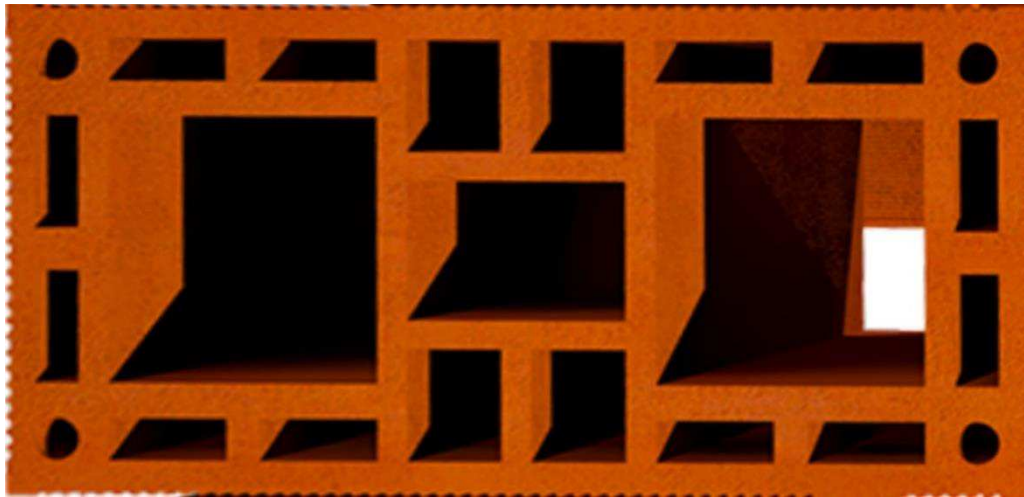


Figura 3.16 – Imagem 3D do compensador 07.

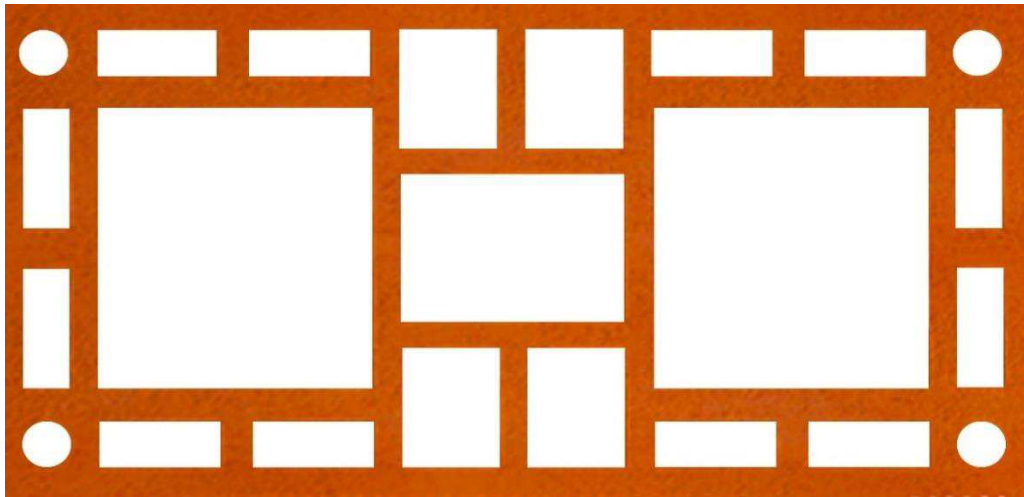


Figura 3.17 – Imagem 2D do compensador 07.

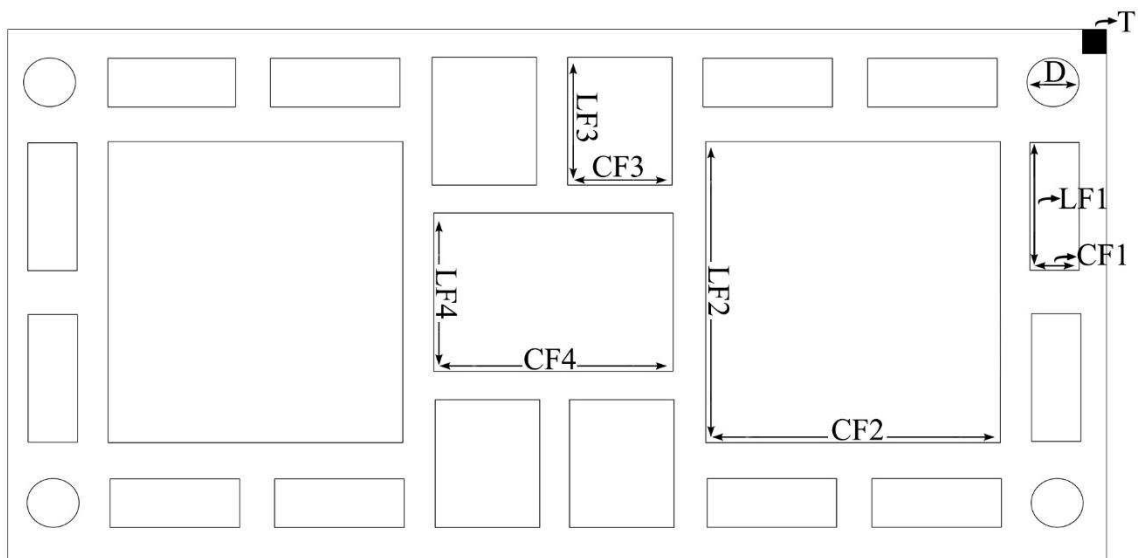


Figura 3.18 – Esquema ilustrativo do compensador 07.

3.1.2.3 Cálculos auxiliares

Cálculos auxiliares foram desenvolvidos após a secagem de todas as amostras, para determinação de novos parâmetros, a partir das dimensões, massa e temperatura do compensador.

- Massa da água

A obtenção da quantidade de água em cada compensador (m_a) em cada tempo de medição, foi feito com base no valor da massa do compensador inicial (m_o) e da massa do compensador seco (m_s), da seguinte forma:

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

- Teor de umidade inicial

O cálculo para obtenção do teor de umidade inicial em cada compensador (M_o) foi realizado com base no valor da massa da água de cada compensador (m_a) e da massa do compensador seco (m_s), da seguinte forma:

$$M_o = \frac{m_a}{m_s} = \frac{m_o - m_s}{m_s} \quad (3.2)$$

- Teor de umidade de equilíbrio

O cálculo para obtenção do teor de umidade de equilíbrio em cada compensador (M_e) foi realizado com base no valor da massa da água de cada compensador (m_a), da massa de equilíbrio (m_e) e do teor de umidade inicial (M_o), da seguinte forma:

$$M_e = - \left(\frac{m_o - m_s}{m_e} - M_o \right) = \frac{m_a}{m_e} - M_o \quad (3.3)$$

- Teor de umidade em base seca

O cálculo para obtenção do teor de umidade em base seca de cada compensador (M) foi realizado com base no valor da massa de cada compensador no tempo [$m(t)$], e da massa seca do compensador (m_s), da seguinte forma:

$$M = \frac{m(t) - m_s}{m_s} \quad (3.4)$$

- Teor de umidade adimensional

O cálculo para obtenção do teor de umidade adimensional em cada compensador (M^*) foi realizado com base no valor do teor de umidade em base seca (M), do teor de umidade de equilíbrio (M_e) e do teor de umidade inicial (M_o), da seguinte forma:

$$M^* = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} \quad (3.5)$$

- Temperatura adimensional

O cálculo para obtenção da temperatura adimensional do compensador (T^*) foi realizado com base no valor da temperatura em função do tempo [$T(t)$], da temperatura de equilíbrio (T_e) e da temperatura inicial (T_o), da seguinte forma:

$$T^* = \frac{T(t) - T_e}{T_o - T_e} \quad (3.6)$$

- Volume do compensador

O cálculo para obtenção do volume do compensador 07, foi obtido através da Equação 3.7, onde foi encontrado o volume total (VT) e dele subtraído o volume dos furos (VF).

$$V_P = VT - VF \quad (3.7)$$

onde:

$$VT = H \cdot L \cdot C \quad (3.7a)$$

$$VF = 4 \cdot VFC + 12 \cdot VF1 + 2 \cdot VF2 + 4 \cdot VF3 + VF4 \quad (3.7b)$$

$$VFC = C \cdot \pi \cdot D^2 \cdot \frac{1}{4} \quad (3.7c)$$

$$VF1 = C \cdot CF1 \cdot LF1 \quad (3.7d)$$

$$VF2 = C \cdot CF2 \cdot LF2 \quad (3.7e)$$

$$VF3 = C \cdot CF3 \cdot LF3 \quad (3.7f)$$

$$VF4 = C \cdot CF4 \cdot LF4 \quad (3.7g)$$

- Área superficial

O cálculo para obtenção da área superficial do tijolo, foi obtido através da Equação 3.8, onde foi utilizado a porosidade (ϵ), área do tijolo (a_p) e volume do tijolo (v_p).

$$A_0^* = (1 - \epsilon) * a_p / v_p \quad (3.8)$$

- Umidade relativa

O cálculo da umidade relativa (UR) de cada amostra nas diferentes temperaturas foi feito com base na média da temperatura e da umidade do ar ambiente externo a estufa utilizando o programa computacional CATT®.

Na Tabela 3.1 é apresentado um resumo dos parâmetros experimentais para o ar e para o compensador 07. Para o ar de secagem da estufa, é apresentado sua temperatura, umidade relativa e velocidade. Para o compensador utilizado, é apresentado o volume inicial e final, teor de umidade inicial e final, temperatura inicial e final, e o tempo de secagem.

Tabela 3.1 - Resumo dos parâmetros experimentais.

Teste	Ar			Compensador 07						
	T (°C)	UR (%)	v (m/s)	V ₀ (mm ³)	V _F (mm ³)	M ₀ (kg/kg,b.s.)	M _e (kg/kg,b.s.)	T ₀ (°C)	T _e (°C)	t (min)
1	50	18,39	1,0	3956538	3224142	0,1723191	0,002685	31,5	50,5	1170
2	60	12,27	1,0	3538313	3099442	0,173163	0,001834	32,0	58,0	1050
3	70	7,72	1,0	3682082	3109589	0,170186	0,001189	29,8	64,7	990
4	80	4,99	1,0	3842866	3049143	0,172723	0,000826	30,5	68,6	930
5	90	3,56	1,0	3732089	3264174	0,167900	0,000511	27,6	76,2	930
6	100	2,34	1,0	3869290	3385790	0,169366	0,000054	27,5	95,1	750

3.2 Metodologia matemática

3.2.1 Tratamento estatístico dos dados (Modelos ao nível de partícula)

3.2.1.1 Modelo empírico de secagem

A partir dos dados experimentais do teor de umidade obtidos 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 a medida que o processo vai se desenvolvendo. Sob o aspecto físico, esta metodologia é extremamente satisfatória, em virtude de possibilitar a descrição do fenômeno com grande precisão. Contudo, sob o aspecto de tratamento estatístico dos dados não é satisfatório, tendo em vista que uma grande densidade de pontos ocorre nos tempos iniciais em comparação à que existe para tempos maiores. 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 com 3 termos e 6 parâmetros, como segue:

$$\frac{\bar{M}-M_e}{M_0-M_e} = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t) + A_3 \exp(-k_3 t) \quad (3.9)$$

A estimativa dos parâmetros A_1 , A_2 , A_3 , k_1 , k_2 e k_3 da Equação (3.9), foi realizada utilizando dois métodos numéricos distintos. O método numérico utilizado foi o de Hooke-Jeeves e quasi-Newton, empregando o Software Statística[®], com critério de convergência de 0,000099.

3.2.1.2 Modelo empírico de aquecimento

A escolha desta equação foi baseada nos trabalhos de Azzouz *et al.* (1996), Pérez (1998) e Farias (2011), que propõem uma equação parabólica a quatro parâmetros, para a temperatura na superfície de compensadores em função do tempo de secagem. A equação é a seguinte:

$$\theta^* = A_1 + A_2 \log_2(t^{K_1} + A_3) \quad (3.10)$$

A estimativa dos parâmetros A_1 , A_2 , A_3 e K_1 da Equação (3.10) foi realizada utilizando o método numérico de Hooke-Jeeves e quasi-Newton empregando o Software Statística[®], com critério de convergência de 0,000099.

3.2.1.3 Modelo de retração volumétrica

Quando ocorre a retração volumétrica, o volume do corpo muda a cada intervalo de tempo durante todo o processo de secagem. 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:

$$V_t = V_o(b_1 \bar{M}^3 + b_2 \bar{M}^2 + b_3 \bar{M} + b_4) \quad (3.11)$$

ou

$$\frac{V_t}{V_o} = b_1 \bar{M}^3 + b_2 \bar{M}^2 + b_3 \bar{M} + b_4 \quad (3.12)$$

A escolha desta equação foi baseada no trabalho de Silva (2009), onde foi mostrado que uma equação com um número maior de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais. A estimativa dos parâmetros b_1 , b_2 , b_3 e b_4 da Equação (3.11) foi realizada utilizando o método numérico Hooke-Jeeves e quasi-Newton empregando o Software Statística[®], com critério de convergência de 0,000099.

3.2.2 Modelagem matemática para o secador

Esse item tem como objetivo mostrar a modelagem matemática para prever a secagem de materiais cerâmicos, em especial tijolo com furos em forma de paralelepípedo, conhecido como compensador 07, em um secador de fluxo cruzado.

Para isto foram realizados os balanços de energia para o ar e o produto, bem como os balanços de massa para o ar e o produto.

Para a modelagem matemática, uma série de hipóteses são levadas em consideração, para garantir a “computacionabilidade” do problema e a qualidade da solução.

Para a modelagem matemática que define a transferência de energia e massa entre o produto e o ar no processo, são consideradas as Figuras 3.19 e 3.20. Na Figura 3.19, tem-se um esquema de um secador túnel tipo contínuo de fluxos cruzados e na Figura 3.20, tem-se uma fração volumétrica desse secador.

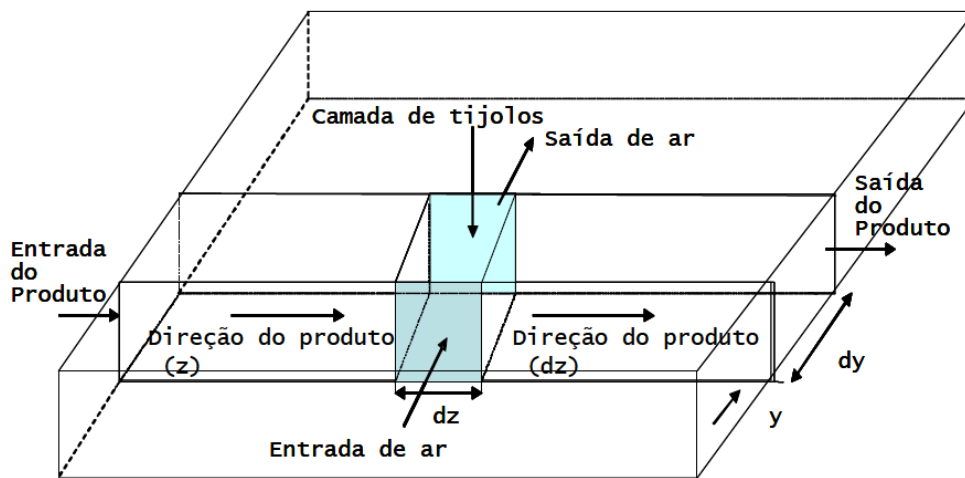


Figura 3.19 - Esquema da camada de sólido num secador tipo túnel com fluxo cruzado.

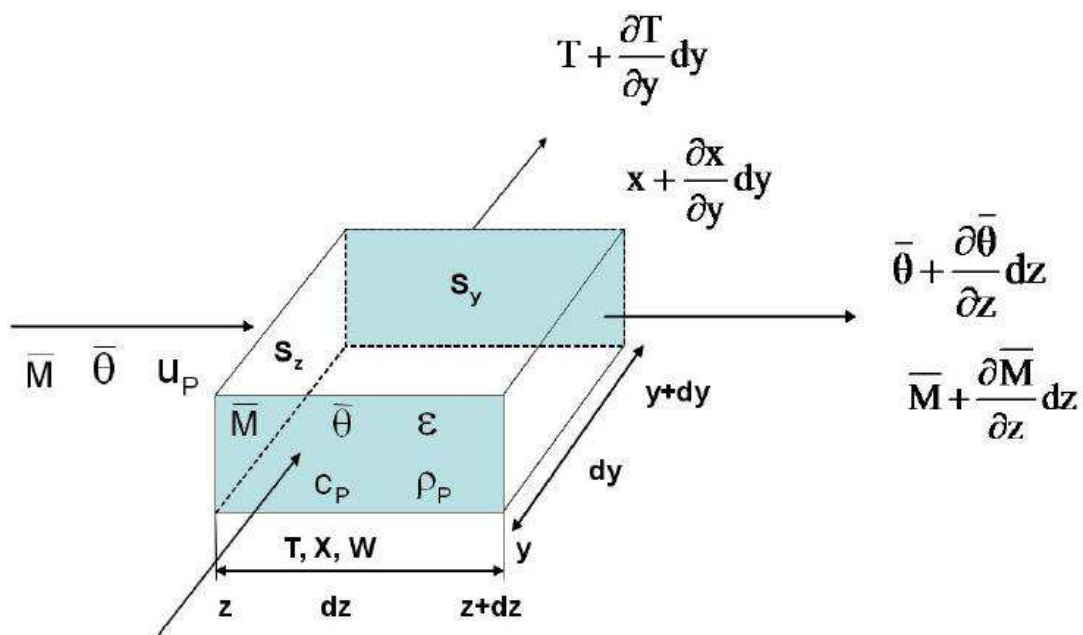
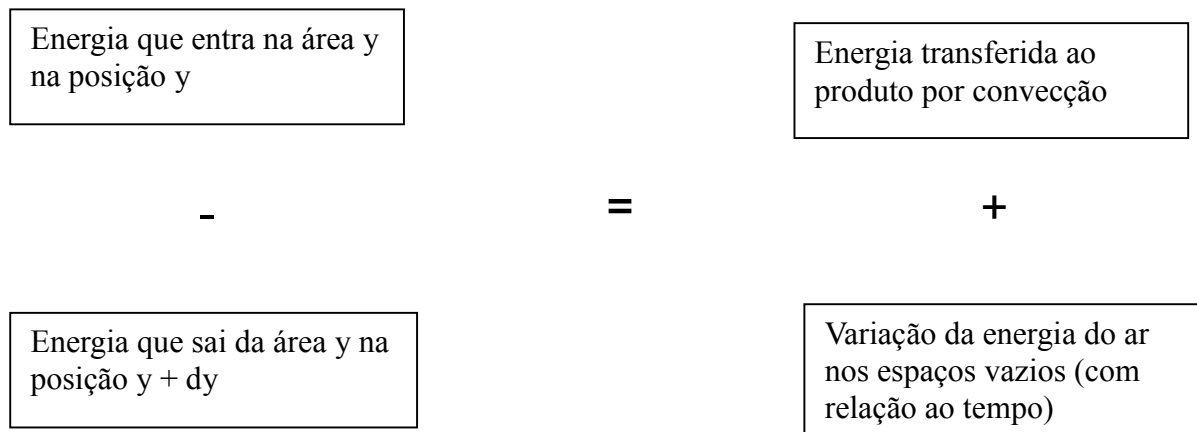


Figura 3.20 - Volume infinitesimal de sólido na camada.

Utilizando a Figura 3.19 pode-se chegar as equações de balanço de energia para o ar, balanço de energia para o produto, balanço de massa para o ar e balanço de massa para o produto as quais serão detalhados a seguir.

3.2.2.1 Balanço de energia para o ar

Baseando-se na Figura 3.19, o balanço de energia para o ar é calculado da seguinte maneira:



Onde:

- Energia que entra na área y na posição y :

$$(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) T y dt \quad (3.13)$$

- Energia que sai da área S na posição $y + dy$:

$$(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} \right) y dt \quad (3.14)$$

- Energia transferida ao produto por convecção:

$$A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) y dy dt \quad (3.15)$$

- Variação da energia do ar nos espaços vazios (com relação ao tempo):

$$(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon y dy \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad (3.16)$$

Utilizando as equações (3.13), (3.14), (3.15) e (3.16), pode-se escrever:

$$(\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) T y dt - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) \left(T + \frac{\partial T}{\partial y} \right) y dt = A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) y dy dt + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon y dy \frac{\partial T}{\partial t} dt \quad (3.17)$$

Simplificando a equação (3.17), tem-se:

$$A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) + (\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon \frac{\partial T}{\partial t} = - (\rho_a w_a c_a + \rho_a w_a x c_v) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.18)$$

Pode-se escrever a equação (3.18) da seguinte maneira:

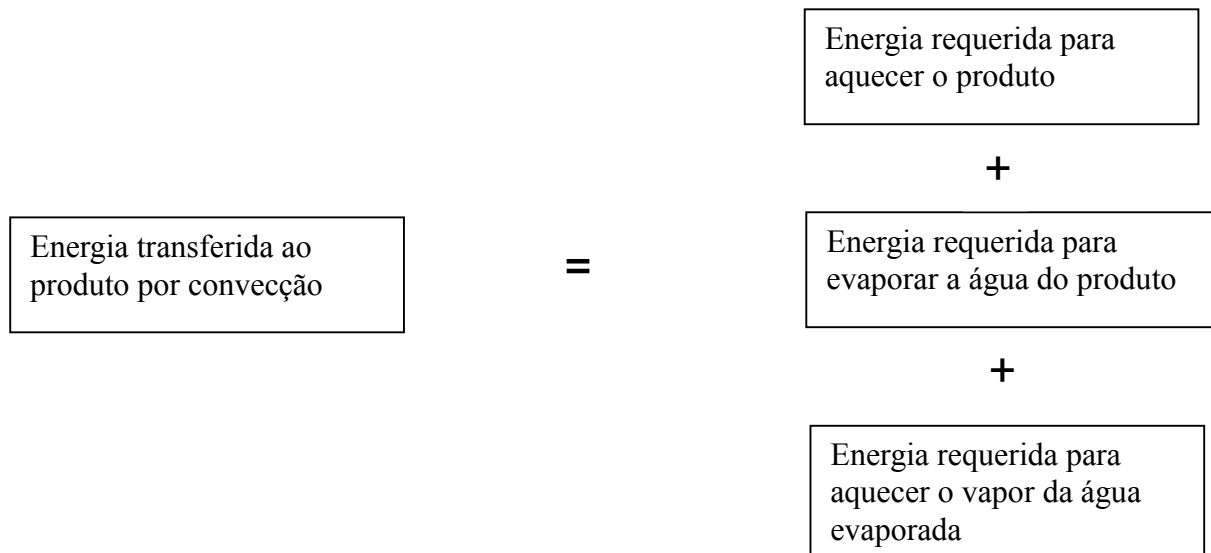
$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{A_0^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} - \frac{w_a}{\varepsilon} \frac{\partial T}{\partial y} \quad (3.19)$$

Ou ainda, na forma mais genérica:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\bar{V}}{\varepsilon} T \right) = - \frac{A_0^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} \quad (3.20)$$

3.2.2.2 Balanço de energia para o produto

O balanço de energia para o produto é calculado da seguinte maneira:



Assim, pode-se escrever:

- Energia transferida ao produto por convecção:

$$A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) y dy dt \quad (3.21)$$

- Energia requerida para aquecer o produto:

$$(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}) y dy \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) dt \quad (3.22)$$

- Energia requerida para evaporar a água do produto:

$$(-h_{fg}^* \rho_P) y dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt \quad (3.23)$$

- Energia requerida para aquecer o vapor da água evaporada:

$$(-\rho_P c_v) (T - \bar{\theta}) y dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt \quad (3.24)$$

Utilizando as equações (3.21), (3.22), (3.23) e (3.24), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) y dy dt &= (\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}) y dy \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) dt + \\ &(-h_{fg}^* \rho_P) y dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt + (-\rho_P c_v) (T - \bar{\theta}) y dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt \end{aligned} \quad (3.25)$$

Simplificando a equação (3.25), tem-se:

$$A_0^* h_c (T - \bar{\theta}) = (\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) + (-h_{fg}^* \rho_P) \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} + (-\rho_P c_v) (T - \bar{\theta}) \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.26)$$

Reagrupando os termos da equação (3.26), tem-se:

$$A^* h_c (T - \bar{\theta}) = (\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}) \left(\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} \right) - [h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})] \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.27)$$

Pode-se escrever a equação (3.27) da seguinte maneira:

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} = \frac{A^* h_c (T - \bar{\theta})}{(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M})} + \frac{[h_{fg}^* + c_v (T - \bar{\theta})]}{(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M})} \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.28)$$

3.2.2.3 Balanço de massa para o ar

O balanço de massa para o ar é calculado da seguinte maneira:

Quantidade de vapor de água que entra na área y na posição y					
-					
Quantidade de vapor de água que sai da área y na posição $y + dy$	=	Umidade cedida pelo produto			
+					
Variação da umidade do ar nos espaços vazios					

Assim pode-se escrever:

- Quantidade de vapor de água que entra na área S na posição y :

$$(\rho_a w_a x)(y) dt \quad (3.29)$$

- Quantidade de vapor de água que sai da área S na posição $y + dy$:

$$(\rho_a w_a) y \left(x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt \quad (3.30)$$

- Variação da umidade do ar nos espaços vazios:

$$(\rho_a \epsilon) y \left(dy \frac{\partial x}{\partial t} dt \right) \quad (3.31)$$

- Umidade cedida pelo produto:

$$\rho_P y \left(dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt \right) \quad (3.32)$$

Juntando as equações 3.29, 3.30, 3.31 e 3.32 chega-se à equação:

$$\rho_a w_a x(y) dt - \rho_a w_a y \left(x + \frac{\partial x}{\partial y} dy \right) dt - \rho_a \varepsilon y \left(dy \frac{\partial x}{\partial t} dt \right) = \rho_p y \left(dy \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dt \right) \quad (3.33)$$

Simplificando a equação (3.33), tem-se:

$$-\rho_a w_a \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right) - \rho_a \varepsilon \left(\frac{\partial x}{\partial t} \right) = \rho_p \left(\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \right) \quad (3.34)$$

Pode-se escrever a equação (3.34) da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_a x) + \nabla \cdot \left(\rho_a \vec{V} x \right) = - \frac{\rho_p}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \quad (3.35)$$

3.2.2.4 Balanço de massa para o produto

O balanço de massa do produto pode ser obtido através da Equação 3.36 baseado nos trabalhos de Lima (1995), Lima e Mata (1996), Nascimento (2002), Silva (2009) onde verificaram que equações exponenciais com maior número de termos se ajustam muito bem aos dados experimentais.

$$\frac{\bar{M} - M_e}{M_0 - M_e} = A_1 \exp(-k_1 t) + A_2 \exp(-k_2 t) + A_3 \exp(-k_3 t) \quad (3.36)$$

Derivando a Equação 3.36 com relação ao tempo, obtém-se:

$$\frac{\partial \bar{M}}{\partial t} = [-A_1 k_1 \exp(-k_1 t) - A_2 k_2 \exp(-k_2 t) - A_3 k_3 \exp(-k_3 t)] (M_0 - M_e) \quad (3.37)$$

3.2.2.5 Equações auxiliares

Para utilização das equações citadas, alguns parâmetros devem ser obtidos através da literatura, ou determinadas usando outras equações. Esse item tem o objetivo de mostrar esses valores e supostamente algumas equações.

- Calor latente de vaporização (PAKOWSKI et al., 1991):

$$h_{fg}^* = 352,8(374,14 - T)^{0,33052} \text{ (kJ/kg)} \quad (3.38)$$

- Calor específico do compensador (NASCIMENTO, 2002):

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

- Densidade do sólido seco (NASCIMENTO, 2002):

$$\rho_p = 1985,8 \text{ kg/m}^3$$

- Volume do produto:

$$V_p = V_0$$

- Área de superfície de contato:

$$A_p = A_0$$

- Área de superfície específica:

$$A_0^* = \frac{A_0(1-\epsilon)}{V_p} = 40,34 \text{ m}^2/\text{m}^3 \quad (3.39)$$

- Fração volumétrica do leito (porosidade):

$$\epsilon = 1 - \frac{N_t V_t}{V_{vag}} = 0,864401 \quad (3.40)$$

- Calor específico do ar (JUMAH et al., 1996):

$$c_a = 1,00926 - 4,04033 \times 10^{-5} T_a + 6,17596 \times 10^{-7} T_a^2 - 4,0972 \times 10^{-10} T_a^3 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kgK}} \right) \quad (3.41)$$

A Figura 3.21 apresenta uma imagem do compensador, que foi o material analisado nesse trabalho.

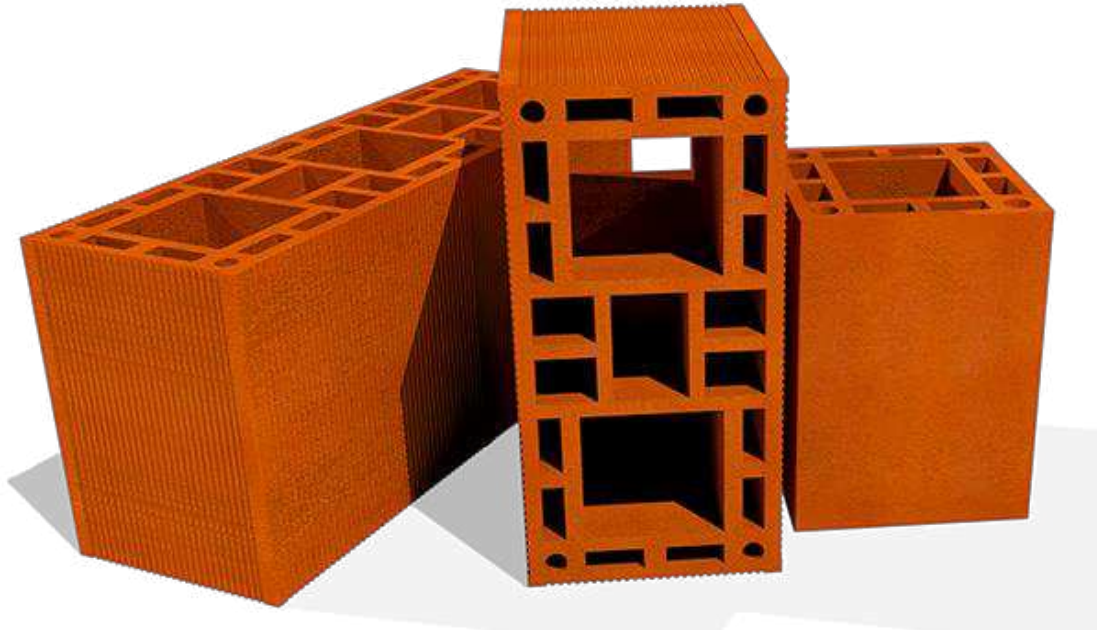


Figura 3.21 – Compensador 07.

- Pressão atmosférica local (ROSSI, 1987):

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

- Constante universal dos gases (ROSSI, 1987):

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

- Temperatura absoluta (ROSSI, 1987):

$$T_{\text{abs}} = T_a + 273,15 \text{ (K)} \quad (3.42)$$

- Densidade do ar (ROSSI, 1987):

$$\rho_a = \frac{P_{\text{atm}} M_a}{R T_{\text{abs}}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (3.43)$$

- Pressão de saturação de vapor (ROSSI, 1987):

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

(Pa) (3.44)

- Umidade relativa (ROSSI, 1987):

$$UR = \frac{P_{atm}x_a}{(x_a + 0,622)P_{vs}}$$
(3.45)

- Calor específico da água na fase líquida (JUMAH et al., 1996):

$$c_w = 2,82232 + 1,18277 \times 10^{-2}T_{abs} - 3,5047 \times 10^{-5}T_{abs}^2 + 3,6010 \times 10^{-8}T_{abs}^3$$

(kJ/kgK) (3.46)

- Calor específico da água na fase de vapor (JUMAH et al., 1996):

$$c_v = 1,8830 - 0,16737 \times 10^{-3}T_{abs} + 0,84386 \times 10^{-6}T_{abs}^2 - 0,26966 \times 10^{-9}T_{abs}^3$$

(kJ/kgK) (3.47)

- Coeficiente de transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2008):

O coeficiente de transferência de calor, h , não é uma propriedade do material sólido. Este coeficiente, entretanto, depende do valor das propriedades do fluido (densidade, calor específico, viscosidade, condutividade térmica), a velocidade do fluido, geometria e rugosidade da superfície do objeto sólido que está em contato com o fluido. Um alto valor de h reflete numa alta taxa de transferência de calor (SINGH *et al.*, 2009; ANTONIETTI *et al.*, 2010).

$$h_c = \left(\frac{k_a}{D_h}\right) \left(0,023 \text{Re}^{\frac{4}{5}} \text{Pr}^{\frac{1}{3}}\right) \text{(W/m}^2\text{°C)}$$
(3.48)

- Diâmetro hidráulico (para dutos de seção circular)

$$D_{hc} = D$$
(3.49)

- Diâmetro hidráulico (para dutos em forma retangular)

$$D_h = \frac{2ab}{a+b} \quad (3.50)$$

- Número de Reynolds (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$Re = \frac{\rho_a w_a D_h}{\mu_a} \quad (3.51)$$

- Número de Prandtl (INCROPERA *et al.*, 2008):

$$Pr = \frac{c_a \mu_a}{k_a} \quad (3.52)$$

- Velocidade da vagonete:

$$u_p = 0,00088 \text{ m/s}$$

A Figura 3.22 ilustra esquematicamente as condições iniciais e de contorno utilizadas para simular a secagem do material em um secador tipo industrial. Elas são dadas como segue:

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

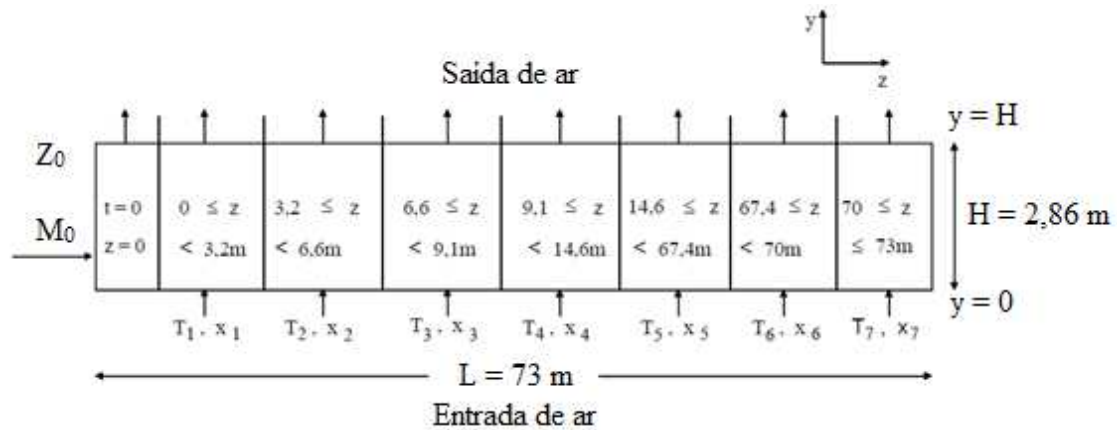


Figura 3.22 – Esquema das condições iniciais e de contorno no secador.

3.2.2.6 Solução numérica

Existem duas dificuldades básicas para se obter resultados confiáveis a partir de simulações utilizando-se um determinado modelo matemático. A primeira é relacionar todas as grandezas físicas relevantes inerentes ao processo e a segunda refere-se a solução da equação representativa do fenômeno (CARMO, 2004).

Os modelos matemáticos de secagem podem ser usados para prever o comportamento de secagem para um determinado tipo de produto em particular. Tais modelos podem ser usados para determinar o efeito da mudança de certos parâmetros na eficiência da secagem ou para minimizar os custos de operação do sistema (ALMEIDA et al., 2003).

Dentro dos métodos numéricos, os mais comuns utilizados para resolver as equações diferenciais são: Método dos Volumes Finitos (MVF), Método das Diferenças Finitas (MDF), Método dos Elementos Finitos (MEF) e o Método dos Elementos de Contorno (MEC). No desenvolvimento deste trabalho o método utilizado foi o de Volumes Finitos (MVF). O MVF consiste em aproximar a equação que representa o fenômeno através da conservação da propriedade de interesse em um volume elementar. Isto pode ser feito fazendo um balanço da propriedade em questão no volume elementar ou volume de controle e também através da integração sobre o volume de controle, no tempo e no espaço, da equação na forma conservativa (MALISKA, 2004).

Na Figura 3.23, pode-se ver o esquema numérico e o volume de controle que está sendo analisado neste trabalho. Na sequência apresente-se a solução numérica das equações governantes.

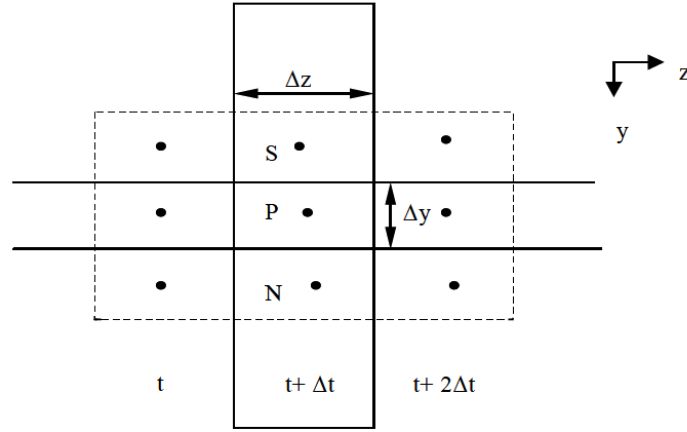


Figura 3.23 – Esquema numérico e o volume de controle utilizado.

a) Balanço de energia para o ar

A integração as equações diferenciais parciais (Equações de 3.13 – 3.16), no volume e no tempo, dá como resultado um sistema de equações lineares, na sua forma discretizada como segue:

$$(T_P - T_P^0)\Delta x\Delta y\Delta z + \left(\frac{w_a}{\varepsilon}\right)(T_P - T_S)\Delta t\Delta x\Delta z = -\frac{A^*h_c(T_P - \bar{\theta}_P)\Delta t\Delta y\Delta z}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)\varepsilon} \quad (3.53)$$

Usando o esquema *upwind* para os termos convectivos, pode-se escrever a Equação (3.53) da seguinte maneira:

$$\left(\frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{w_a}{\varepsilon} + \frac{A^*h_c\Delta y}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)\varepsilon}\right) T_P = \left(\frac{w_a}{\varepsilon}\right) T_S + \left(\frac{\Delta y}{\Delta t}\right) T_P^0 + \left(\frac{A^*h_c\Delta y}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v)\varepsilon}\right) \bar{\theta}_P \quad (3.54)$$

Numa forma geral, tem-se:

$$A_P T_P = A_S T_S + A_P^0 T_P^0 + S_C^T \quad (3.55)$$

onde:

$$A_P = \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{W_a}{\varepsilon} + \frac{A^* h_c \Delta y}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} \quad (3.55a)$$

$$A_S = \frac{w_a}{\varepsilon} \quad (3.55b)$$

$$A_P^0 = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad (3.55c)$$

$$S_C^T = \frac{A^* h_c \Delta y \bar{\theta}_P}{(\rho_a c_a + \rho_a x c_v) \varepsilon} \quad (3.55d)$$

b) Balanço de energia para o produto

Novamente, integrando a Equação 3.28 no volume e no tempo, tem-se:

$$\begin{aligned} (\bar{\theta}_P - \bar{\theta}_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z &= \frac{A^* h_c (T_P - \bar{\theta}_P)}{(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M})} \Delta x \Delta y \Delta z + \frac{h_{fg}^* \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M})} \Delta t \Delta x \Delta y \Delta z + \\ &+ \frac{c_v (T_P - \bar{\theta}_P) \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t}}{(\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M})} \Delta x \Delta y \Delta z \end{aligned} \quad (3.56)$$

Usando o esquema *upwind*, pode-se escrever a Equação (3.56) da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{A^* h_c \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} \right) \bar{\theta}_P &= \left(\frac{\Delta z}{\Delta t_m} \right) \bar{\theta}_P^0 + \frac{(h_{fg}^* + c_v T_P) \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} + \\ &\frac{A^* h_c T_P \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} \end{aligned} \quad (3.57)$$

Ou ainda, numa forma geral, tem-se:

$$A_P \bar{\theta}_P = A_P^0 \bar{\theta}_P^0 + S_C^{\bar{\theta}} \quad (3.58)$$

onde:

$$A_P = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} + \frac{A^* h_c \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} + \frac{c_v \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} \quad (3.58a)$$

$$A_p^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.58b)$$

$$S_c^{\bar{\theta}} = \frac{(h_{fg}^* + c_v T_P) \rho_P \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} + \frac{A^* h_c T_P \Delta z}{\rho_P c_P + \rho_P c_w \bar{M}} \quad (3.58c)$$

Onde $\Delta t_m = (\text{np}_y - 1) \Delta t$, e np_y é o número de pontos nodais na direção y .

c) Balanço de massa para o ar

A partir da integração, a Equação 3.34 no volume e no tempo, tem-se como resultado:

$$-\rho_a w_a (x_P - x_S) \Delta t \Delta x \Delta z - \rho_a \varepsilon (x_P - x_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z = \rho_P (\bar{M}_P - \bar{M}_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.59)$$

Usando o esquema *upwind*, pode-se escrever a Equação (3.59) da seguinte maneira:

$$\left(\frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} + \frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} \right) x_P = \left(\frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} \right) x_S + \left(\frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} \right) x_P^0 - \frac{\rho_P}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.60)$$

Ou ainda:

$$A_P x_P = A_S x_S + A_P^0 x_P^0 + S_C^x \quad (3.61)$$

onde:

$$A_P^0 = \frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} + \frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} \quad (3.61a)$$

$$A_S^0 = \frac{\rho_a w_a}{\varepsilon} \quad (3.61b)$$

$$A_P^0 = \frac{\rho_a \Delta y}{\Delta t} \quad (3.61c)$$

$$S_C^x = - \frac{\rho_P}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{M}}{\partial t} dy \quad (3.61d)$$

d) Balanço de massa para o produto

Para o balanço de massa do produto, integrando-se a Equação 3.37 no volume e no tempo, tem-se:

$$(\bar{M}_P - M_P^0)\Delta x\Delta y\Delta z = C_1 \text{Exp}(-k_1 t)\Delta t\Delta x\Delta y\Delta z + C_2 \text{Exp}(-k_2 t)\Delta t\Delta x\Delta y\Delta z + C_3 \text{Exp}(-k_3 t)\Delta t\Delta x\Delta y\Delta z \quad (3.62)$$

Reorganizando os termos, pode-se escrever:

$$\left(\frac{\Delta z}{\Delta t_m}\right)\bar{M}_P = \left(\frac{\Delta z}{\Delta t_m}\right)\bar{M}_P^0 + C_1 \text{Exp}(-k_1 t)\Delta z + C_2 \text{Exp}(-k_2 t)\Delta z + C_3 \text{Exp}(-k_3 t)\Delta z \quad (3.63)$$

Ou ainda:

$$A_P \bar{M}_P = A_P^0 \bar{M}_P^0 + S_C^{\bar{M}} \quad (3.64)$$

onde:

$$A_P = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.64a)$$

$$A_P^0 = \frac{\Delta z}{\Delta t_m} \quad (3.64b)$$

$$S_C^{\bar{M}} = C_1 \text{Exp}(-k_1 t)\Delta z + C_2 \text{Exp}(-k_2 t)\Delta z + C_3 \text{Exp}(-k_3 t)\Delta z \quad (3.64c)$$

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

Nas Equações 3.20, 3.28 e 3.35 utilizou-se o esquema *upwind* como função de interpolação para os termos convectivos e um procedimento parabólico na direção z (MALISKA, 2004).

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais

4.1.1 Caracterização da matéria-prima

Apresenta-se neste item as discussões e os resultados obtidos dos ensaios de caracterização química, mineralógica, granulométrica e térmica/gravimétrica da massa cerâmica utilizada nesta pesquisa.

4.1.1.1 Análise química

A Tabela 4.1 resume a composição química da massa cerâmica utilizada na confecção dos compensadores estudados nos experimentos, oriundos da indústria Cerâmica Cincera.

Analisando os resultados, verifica-se que a argila analisada apresenta alto teor de sílica (SiO_2), 57,533% e teor de alumina (Al_2O_3) equivalente a 23,426%. Esses percentuais são típicos de argila caulínica, influenciando a impureza da argila. Por causa da 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 compensador e conseqüentemente diminuindo o tempo de secagem e retração volumétrica. A sílica livre numa argila causa redução, não somente da plasticidade, como também leva a uma baixa retração linear.

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

Substância	Porcentagem
SiO_2	57,533%
Al_2O_3	23,426%
Fe_2O_3	8,887%

K ₂ O	3,211%
MgO	2,653%
CaO	2,327%
TiO ₂	1,126%
BaO	0,338%
SO ₃	0,222%
MnO	0,136%
P ₂ O ₅	0,700%
SrO	0,400%
Rb ₂ O	0,160%
ZnO	0,014%
C	0,000%

É possível observar que a massa cerâmica é predominantemente constituída de SiO₂ e Al₂O₃, que estão em sua maior parte combinados, formando os aluminossilicatos como a mica muscovita e a caulinita. A cor é uma propriedade importante dos produtos de argila. Vários fatores determinam esta cor, mas o ferro é geralmente seu principal determinante. A cor de um produto de argila é influenciada pelo estado de oxidação do ferro, o tamanho das partículas de minerais de ferro, tais como hematita e goetita, a temperatura de queima e o grau de vitrificação, a proporção de alumina, cal e magnésio na cerâmica e a composição dos gases que entram em contato com o material durante a queima. As cerâmicas que ficam brancas após a queima contêm menos de 1% de Fe₂O₃. Cerâmicas que contêm entre 1% e 5% de Fe₂O₃ apresentam coloração rosácea, e cerâmicas vermelhas contêm 5% ou mais de Fe₂O₃ em sua composição. (COUTINHO e VIEIRA, 2016).

Os óxidos de cálcio e de magnésio ou óxidos alcalinos terrosos (MgO e CaO) podem atuar como fundentes durante a etapa de queima e tende a baixar a refratariedade das argilas. São geralmente provenientes de calcita, dolomita, gipsita e são raramente encontrados nas argilas cauliníticas do tipo refratário. Esses óxidos reagem com fases amorfas e formam fases cristalinas que são mais estáveis frente à ação de umidade (SILVA, 2016).

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 (C), quartzo (Q) e feldspato (F). A caulinita é responsável pelo desenvolvimento da plasticidade em mistura com água. O quartzo é o responsável pelo aumento de porosidade, alto grau de dureza diminuindo assim a variação volumétrica, teor de umidade e plasticidade. O Feldspato aumenta a resistência e a durabilidade da cerâmica. Além dos argilominerais, uma argila pode conter como impurezas: micas, óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio, matéria orgânica e compostos químicos não cristalinos ou amorfos.

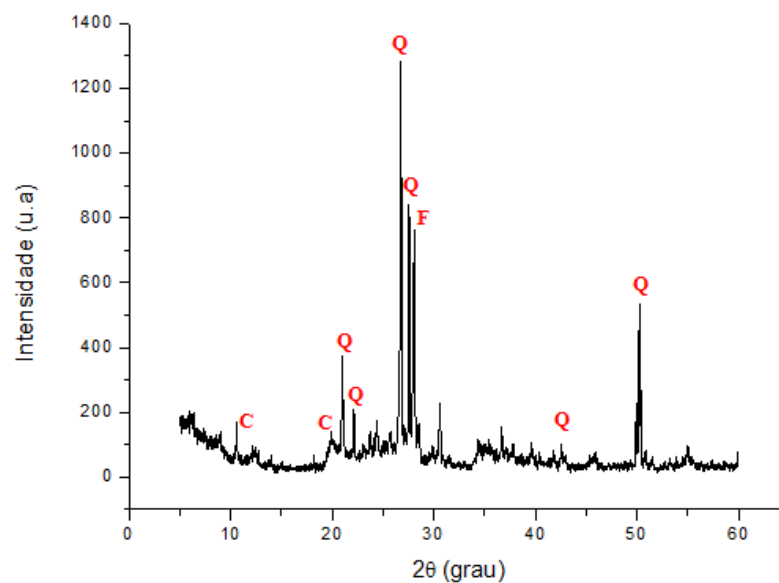


Figura 4.1 – Análise mineralógica da amostra utilizada no experimento via difratograma de Raios X.

O quartzo é considerado como a principal impureza presente nas argilas e atua como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima. A gibsita fornece aumento da refratariedade das argilas e perda de massa durante a queima. A refratariedade do material faz com que ele adquira a característica de suportar altas temperaturas, sem se deformar ou fundir. A goetita representa o teor de ferro presente na massa argilosa. A mica muscovita é um mineral que apresenta morfologia lamelar, podendo causar defeitos na cerâmica (COUTINHO e VIEIRA, 2016).

4.1.1.3 Análise granulométrica

Está representada na Tabela 4.2 os valores da distribuição de tamanho de partículas da matéria-prima estudada.

Tabela 4.2 - Distribuição percentual de tamanho de partículas da matéria-prima estudada.

Amostra	Fração Argila ($< 2 \mu\text{m}$)	Silte ($2 \leq X \leq 50 \mu\text{m}$)	Areia ($50 \leq X \leq 100 \mu\text{m}$)	Diâmetro Médio (μm)
Argila	18,4 %	80,09 %	1,51 %	13,36

Analisando esses valores, verifica-se que a matéria-prima estudada apresenta em sua composição, elevados teores de silte e areia (aproximadamente 82%) e fração de argila de 18,4% e diâmetro médio das partículas de 13,36 μm .

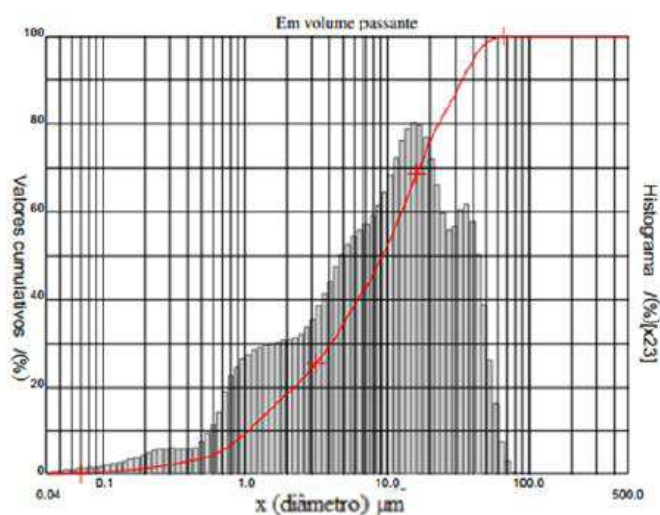


Figura 4.2 – Curva de distribuição de tamanho da partícula da argila.

Na Figura 4.2 está representado a curva de distribuição de tamanho da partícula da argila. Sendo observado através da distribuição granulométrica, uma grande concentração de partículas em torno dos 2 – 100 μm . O gráfico apresenta um tamanho médio de 13,36 μm e D10, D50 e D90 de 1,06, 9,20 e 33,60 μm , respectivamente.

4.1.1.4 Análise térmica e gravimétrica

A Figura 4.3 mostra as curvas termogravimétrica e gravimétrica da argila estudada, ou seja, a distribuição de temperatura e a perda de umidade. Analisando a curva da análise térmica diferencial (ATD), verifica-se um pico endotérmico à 120°C, caracterizado pela

perda de água livre; uma banda exotérmica entre 200 e 500°C, caracterizado pela perda de matéria orgânica; um pico endotérmico à 547°C caracterizado pela presença de hidroxila e uma variação entre 900°C e 1000°C devido a nucleação da mulita.

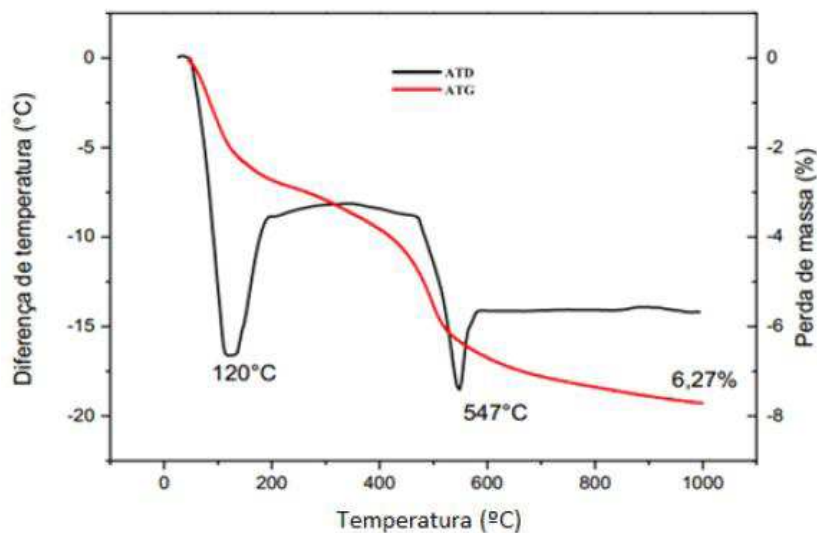


Figura 4.3 - Curva termogravimétrica (ATG) e termodiferencial (ADT) da massa cerâmica.

Em relação à curva térmica gravimétrica (ATG), verifica-se uma perda de massa em torno de 2%, correspondente a água livre, à uma temperatura entre 0 e 170°C; cerca de 4% de matéria orgânica, à uma temperatura entre 170 e 510°C, e perda de 2% de hidroxila, aproximadamente, à uma temperatura acima de 510°C.

4.1.2. Secagem das amostras em estufa

Os experimentos foram realizados com diferentes temperaturas do ar de secagem, conforme mostrado nos apêndices.

Para analisar os efeitos da cinética de secagem foi observando a perda do teor de umidade, aquecimento das amostras e variação das dimensões em função do tempo de secagem.

- Teor de umidade versus temperatura

As Figuras 4.4 a 4.9 ilustram o comportamento do teor de umidade e a temperatura do produto, sendo ambos apresentados na forma adimensional ao longo do processo de secagem.

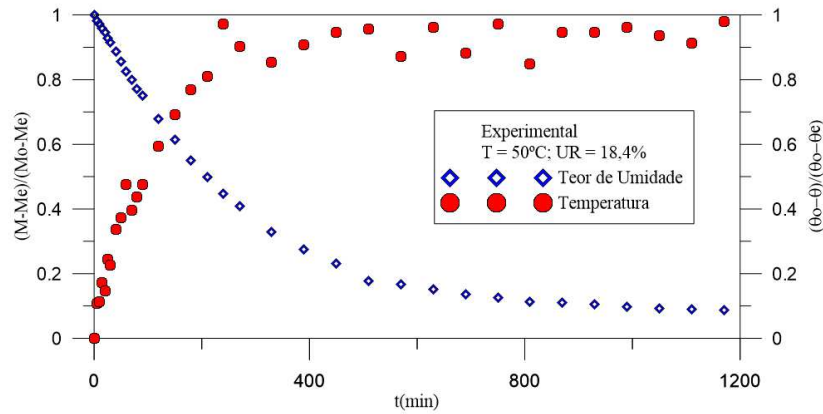


Figura 4.4 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 50°C em função do tempo de secagem.

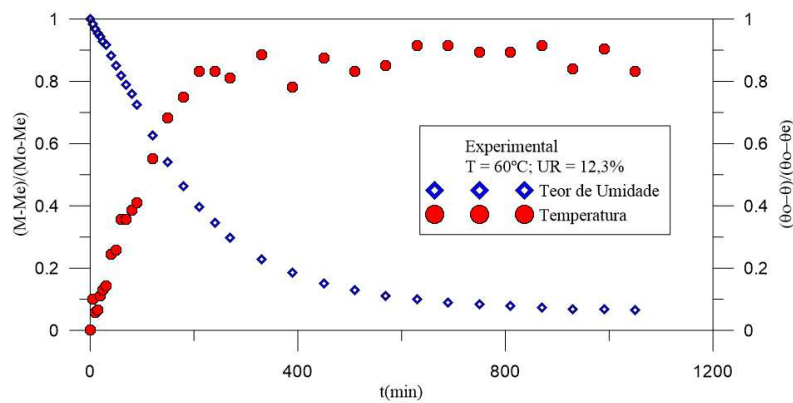


Figura 4.5 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 60°C em função do tempo de secagem.

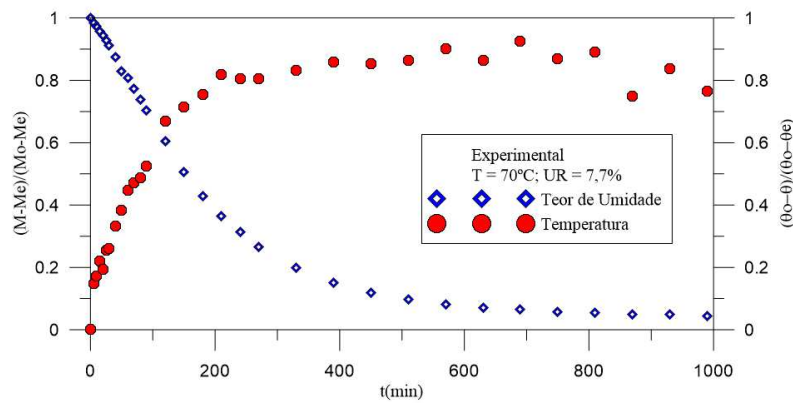


Figura 4.6 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 70°C em função do tempo de secagem.

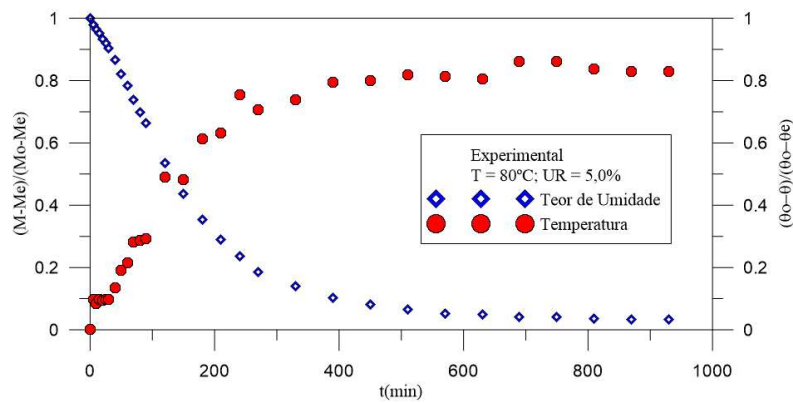


Figura 4.7 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 80°C, em função do tempo de secagem.

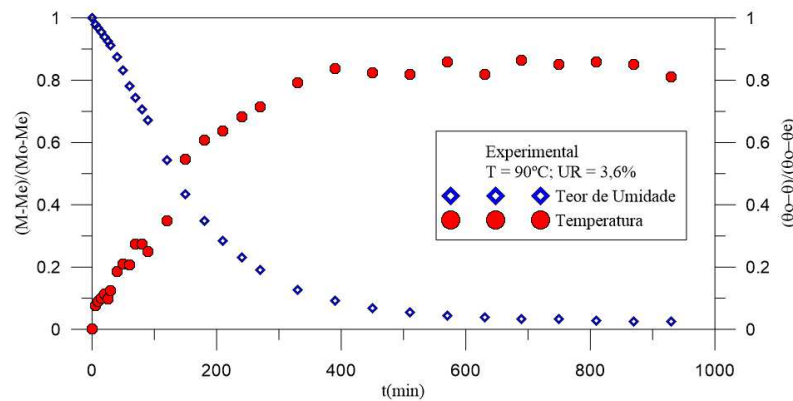


Figura 4.8 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 90°C em função do tempo de secagem.

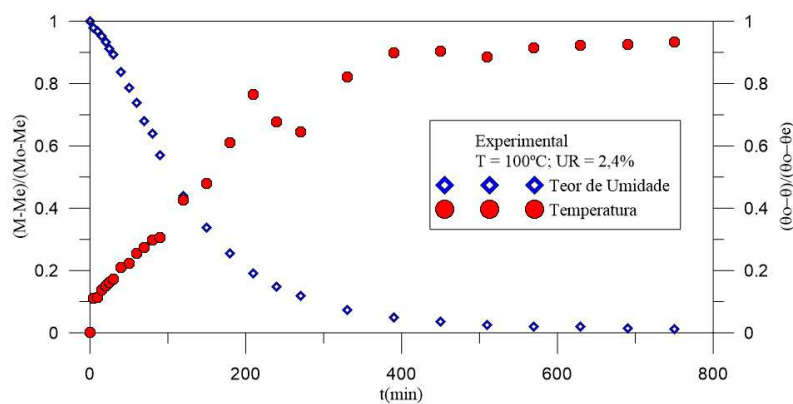


Figura 4.9 – Variação do teor de umidade e temperatura do compensador 07 na temperatura de 100°C, em função do tempo de secagem.

Ao analisar os resultados, verifica-se que a perda de umidade ocorre de forma mais lenta comparada ao seu aquecimento. A taxa de variação de umidade que é diretamente influenciada pela temperatura, mantém uma relação de proporcionalidade com a variação de temperatura e com o tempo, onde é quase diretamente proporcional com a variação de temperatura e inversamente proporcional com o tempo, ou seja, quanto maior for a temperatura, maior será a perda de umidade e menor será o tempo total da secagem até as amostras atingirem a condição de umidade de equilíbrio.

A forma geométrica também influencia na cinética de secagem, quando o material é vazado, o ar de secagem tem uma melhor circulação em seu interior, a água contida no interior do material migra para a superfície mais rapidamente.

No entanto, as temperaturas muito elevadas podem ter efeitos negativos na secagem. Como a temperatura na parede da amostra é maior do que a temperatura no interior, pode-se gerar elevadas tensões hídricas e térmicas no interior da amostra, dando espaço a aparição de trincas, rachaduras e deformações. Esses defeitos, gerados pelos gradientes de umidade e temperatura provocam tensões trativas e compressivas, não aceitáveis, que reduzem drasticamente a qualidade do produto no final do processo, se a secagem não for uniforme.

Na Figura 4.10, é apresentado uma comparação dos teores de umidade experimental para as temperaturas pré-estabelecidas, onde pode-se verificar que a temperaturas baixas é gasto um tempo maior para se chegar ao objetivo, aumentando a temperatura esse tempo é diminuído.

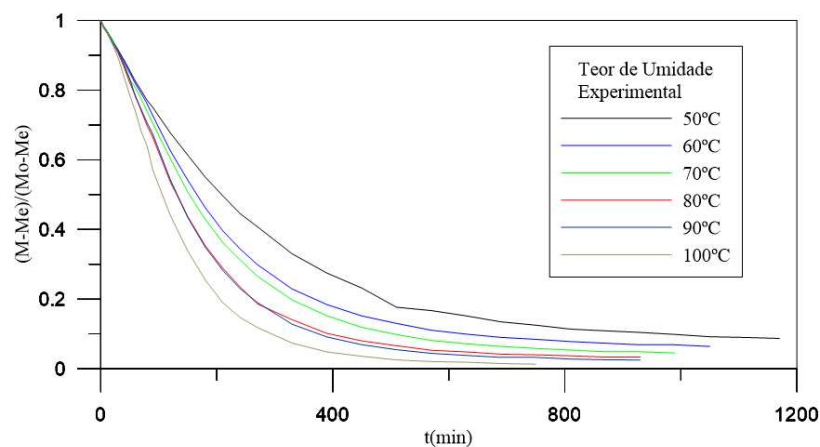


Figura 4.10 – Comparação entre a variação do teor de umidade para várias temperaturas versus o tempo de secagem.

Na Figura 4.11, é apresentado a variação da temperatura do produto para os testes realizados a temperaturas pré-estabelecidas, onde verifica-se uma variação depois de um certo tempo, essa variação ocorre devido ao resfriamento e aquecimento do material.

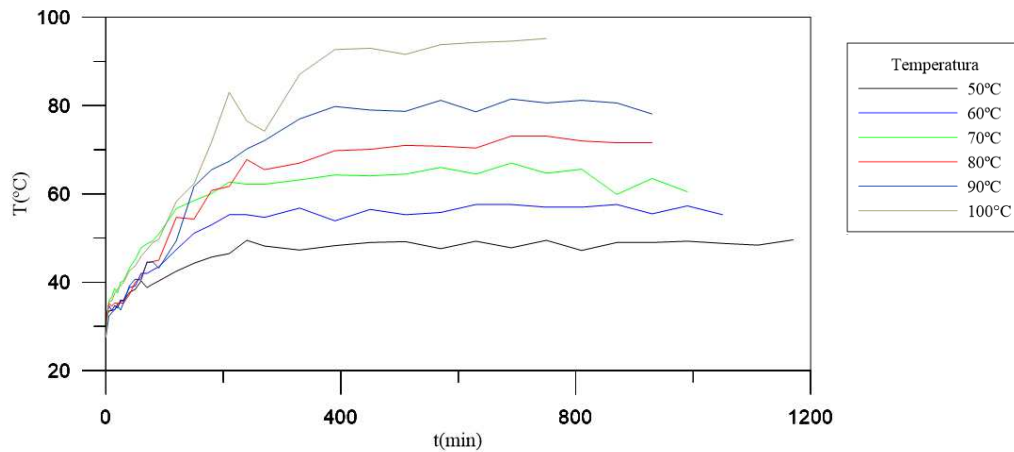


Figura 4.11 - Comparação entre a variação de temperatura versus o tempo de secagem para temperaturas pré-estabelecidas.

➤ Variação volumétrica

As Figuras 4.12 a 4.17 ilustram a retração volumétrica sofrida pelas amostras em relação ao seu volume inicial, por conta da perda de umidade e do aquecimento no processo de secagem. Verifica-se uma forte variação nas dimensões do sólido nos primeiros minutos de secagem, tendendo a um valor constante para tempos longos. Além disso, pode-se observar a não uniformidade na retração volumétrica, por conta do processo de dilatação e contração nas peças, principalmente nos estágios de secagem.

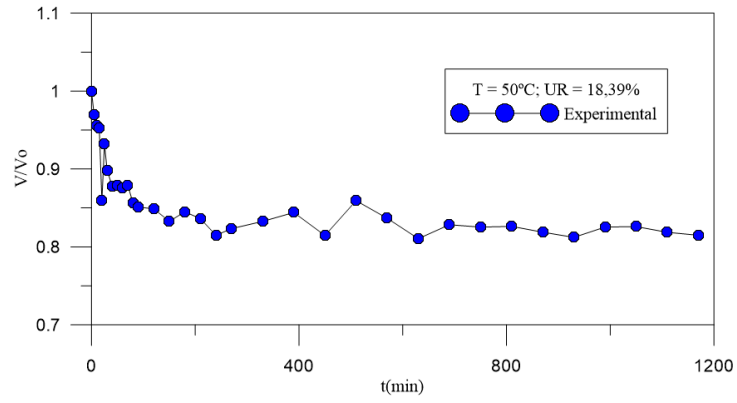


Figura 4.12 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 50°C, em função do tempo de secagem.

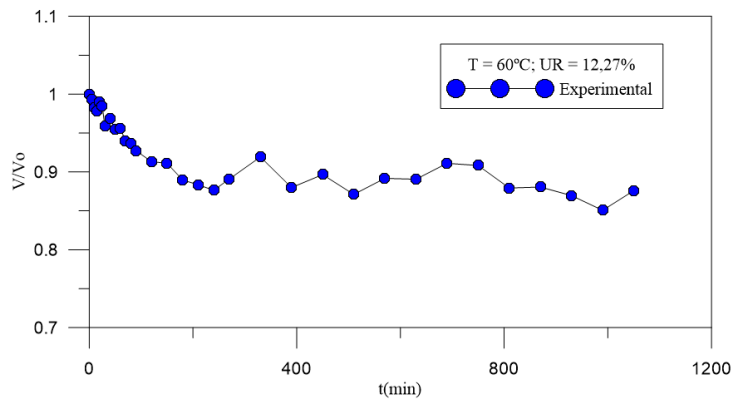


Figura 4.13 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 60°C, em função do tempo de secagem.

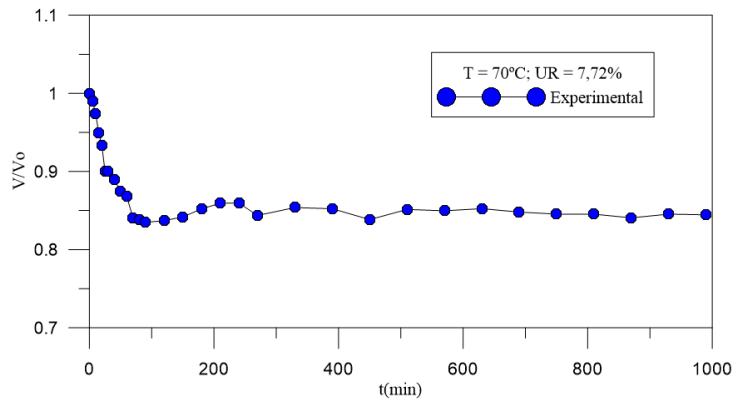


Figura 4.14 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 70°C, em função do tempo de secagem.

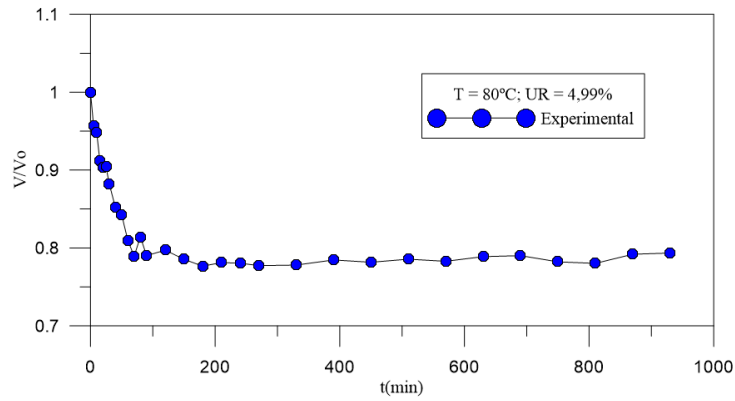


Figura 4.15 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 80°C, em função do tempo de secagem.

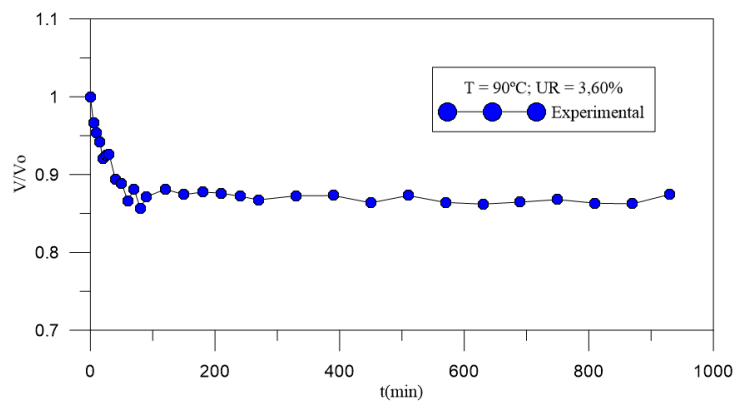


Figura 4.16 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 90°C, em função do tempo de secagem.

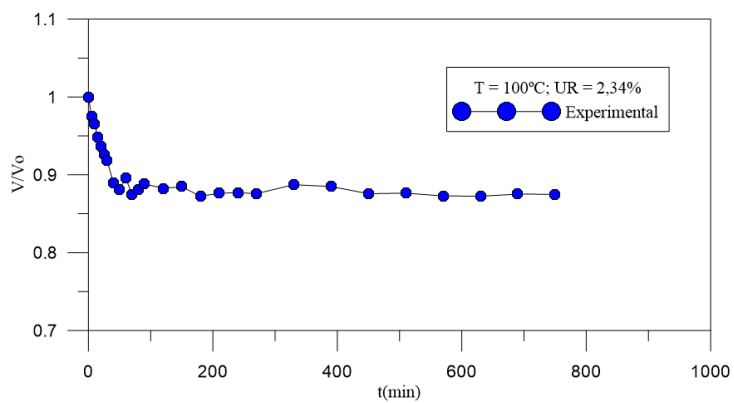


Figura 4.17 – Variação do volume do compensador 07 para temperatura de 100°C, em função do tempo de secagem.

As Tabelas 4.3 a 4.8 apresentam as dimensões dos parâmetros externos das amostras antes e após a secagem e suas variações.

Tabela 4.3 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 50°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3956538	143	303	199	0,1723191
Término da secagem	3224142	136	289	190	0,002685
Variação	732396	7	14	9	0,1696341
Percentual	18,5%	4,9%	4,6%	4,5%	98,44%

Tabela 4.4 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 60°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3538313	140	302	200	0,173163
Término da secagem	3099442	135	289	190	0,001834
Variação	438871	5	13	10	0,171329
Percentual	12,4%	3,6%	4,3%	5%	98,9%

Tabela 4.5 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 70°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3682082	142	300	200	0,170186
Término da secagem	3109589	137	288	191	0,001189
Variação	572493	5	12	9	0,168997
Percentual	15,6%	3,5%	4%	4,5%	99,3%

Tabela 4.6 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 80°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3842866	144	300	200	0,172723
Término da secagem	3049143	138	287	191	0,000826
Variação	793723	6	13	9	0,171897
Percentual	20,7%	4,2%	4,3%	4,5%	99,5%

Tabela 4.7 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 90°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3732089	143	300	199	0,167900
Término da secagem	3264174	139	288	190	0,000511
Variação	467915	4	12	9	0,167389
Percentual	12,5%	2,8%	4%	4,5%	99,7

Tabela 4.8 – Parâmetros experimentais externo do compensador 07, para temperatura de 100°C.

	V (mm ³)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	M ₀ (kg/kg)
Início da secagem	3869290	142	301	201	0,169366
Término da secagem	3385790	138	291	192	0,000054
Variação	483500	4	10	9	0,169312
Percentual	12,5%	2,8%	3,3%	4,5%	100%

O volume do compensador varia em média 15,4%, tendo sua maior variação para temperatura de 80°C (20,7%), devido a fissuras surgidas durante o processo. A largura (L) teve percentual maior de variação (4,6%) em relação ao comprimento e largura, devido a quantidade de espaços vazios (furos). Com relação ao teor de umidade, quando aumentou-se a temperatura, ocorreu um aumento na retirada de água do produto, ou seja, seu teor de umidade diminuiu, como esperado.

As Tabelas 4.9 a 4.14 apresentam as dimensões dos parâmetros internos das amostras antes e após a secagem e suas variações.

Tabela 4.9 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 50°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	14,32	15,21	33,03	73,08	75,90	37,89	24,65	30,92	62,90
Término da secagem	14,03	15,54	33,00	70,11	73,04	36,02	24,44	29,81	60,38
Variação	0,29	0,33	0,03	2,97	2,86	1,87	0,21	1,11	2,52
Percentual	2,0%	2,2%	0,1%	4,1%	3,8%	4,9%	0,9%	3,6%	4,0%

Tabela 4.10 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 60°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	15,77	15,20	33,75	72,94	78,00	37,26	28,91	30,58	64,23
Término da secagem	15,67	14,62	32,77	69,99	75,17	35,50	27,45	28,60	61,60
Variação	0,10	0,60	0,98	2,95	2,83	1,76	1,46	1,98	2,63
Percentual	0,6%	4,0%	2,9%	4,0%	3,6%	4,7%	5,1%	6,5%	4,1%

Tabela 4.11 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 70°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	15,40	15,97	33,41	74,00	75,61	36,75	26,54	31,04	62,84
Término da secagem	15,57	16,29	32,72	71,32	73,33	35,78	25,85	30,45	61,04
Variação	0,17	0,32	0,69	2,68	2,28	0,97	0,69	0,59	1,8
Percentual	1,1%	2,0%	2,1%	3,6%	3,0%	2,6%	2,6%	1,9%	2,9%

Tabela 4.12 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 80°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	15,19	15,52	33,91	74,38	74,91	35,89	26,54	31,57	63,10
Término da secagem	15,13	15,27	33,04	71,64	71,85	35,58	25,77	30,09	61,24
Variação	0,06	0,25	0,87	2,74	3,06	0,31	0,77	1,48	1,86
Percentual	0,4%	1,6%	2,6%	3,7%	4,1%	0,9%	2,9%	4,7%	3,0%

Tabela 4.13 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 90°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	15,27	15,57	34,82	73,94	75,13	36,81	26,17	30,77	63,19
Término da secagem	14,97	15,30	33,64	71,28	72,77	36,17	25,77	30,60	61,10
Variação	0,30	0,27	1,18	2,66	2,36	0,64	0,40	0,17	2,09
Percentual	2,0%	1,7%	3,4%	3,6%	3,1%	1,7%	1,5%	0,6%	3,3%

Tabela 4.14 - Parâmetros experimentais interno do compensador 07, para temperatura de 100°C.

	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
Início da secagem	14,49	15,35	31,70	73,85	75,67	36,16	26,86	30,29	63,78
Término da secagem	14,47	15,29	32,78	71,25	71,98	35,39	26,21	30,12	62,56
Variação	0,02	0,06	1,08	2,6	3,69	0,77	0,65	0,17	1,22
Percentual	0,1%	0,4%	3,4%	3,5%	4,9%	2,1%	2,4%	0,6%	1,9%

Nas Tabelas 4.9 a 4.14, observa-se uma variação média entre os furos de 4,33%, tendo em média sua maior variação sendo apresentada para temperatura de 60°C.

Essa variação foi ocasionada pelas deformações surgidas durante o processo de secagem para todas as temperaturas pré-estabelecidas.

Suas maiores variações ocorreram nas maiores dimensões (furos 2 e 4), tendo uma variação média de 7,06%.

Nas Tabelas A1–F4, do Apêndice, encontram-se dados obtidos experimentalmente para as temperaturas pré-estabelecidas:

- Cinética de secagem;
- Variação da temperatura do produto;
- Variação dos parâmetros internos;
- Variação dos parâmetros externos.

A diferença entre a temperatura ajustada na estufa e a temperatura final das amostras é devido a sua posição dentro da estufa, bem como a erros de leitura, devido a um mal posicionamento do termômetro.

São apresentados nas Figuras 4.18-4.23 imagens do bloco cerâmico utilizado nos experimentos no tempo inicial, um tempo médio e no tempo final, em suas respectivas temperaturas de secagem.

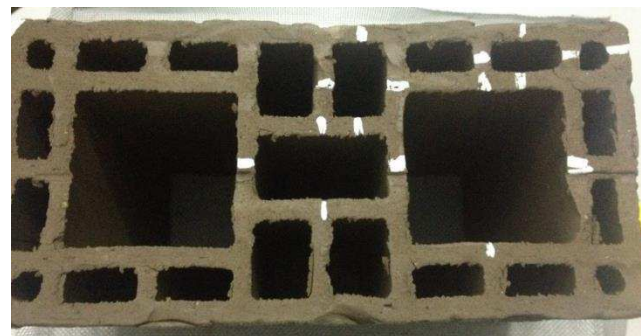
A Figura 4.18 apresenta algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 50°C. A Figura 4.18a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min; a Figura 4.18b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.18c apresenta o final do processo de secagem em $t = 1170$ min.



a)



b)

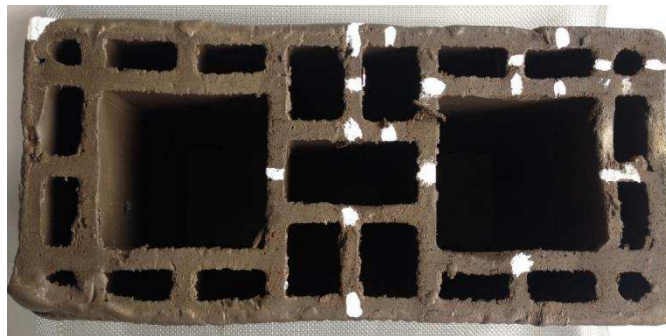


c)

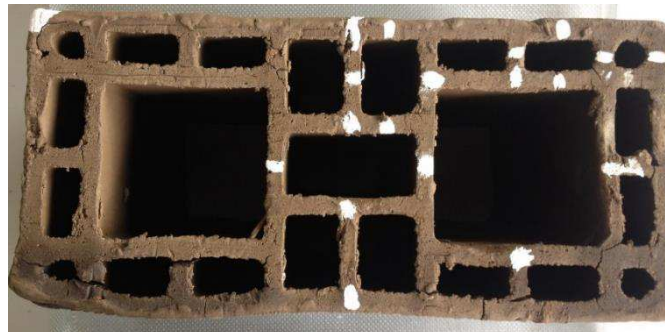
Figura 4.18 – Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 50°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 1170$ min.

Analisando a Figura 4.18, percebe-se que no início do processo não existe fissuras, aparecendo umas pequenas durante o processo e aparentemente sumindo já no final.

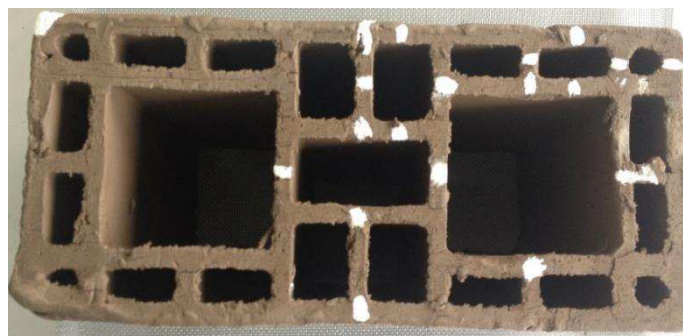
A Figura 4.19 apresentam algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 60°C. A Figura 4.19a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min; a Figura 4.19b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.19c apresenta o final do processo de secagem em $t = 1050$ min.



a)



b)

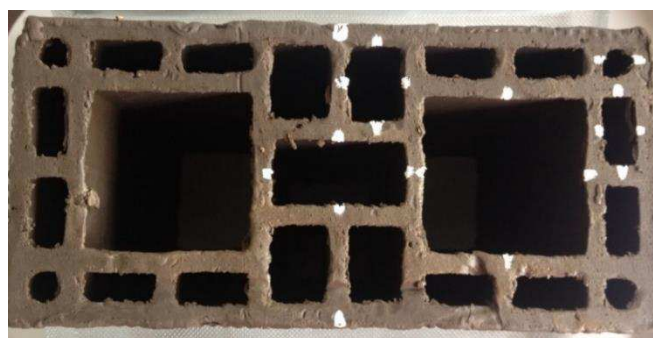


c)

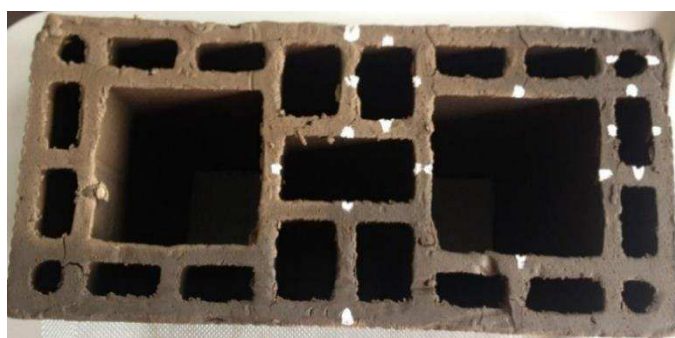
Figura 4.19 - Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 60°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 1050$ min.

Neste caso, o aparecimento das trincas já é mais visível do que no caso anterior, já no final do processo as trincas diminuem sua espessura.

A Figura 4.20 apresentam algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 70°C. A Figura 4.20a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min, a Figura 4.20b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.20c apresenta o final do processo de secagem em $t = 990$ min.



a)



b)

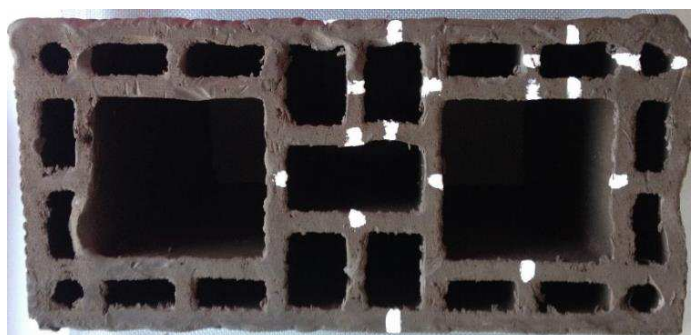


c)

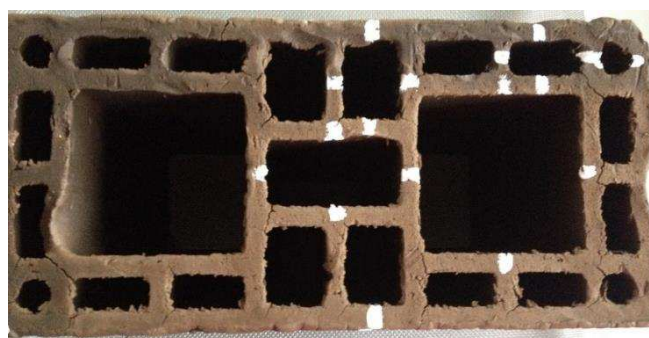
Figura 4.20 - Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 70°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 990$ min.

Com o aumento da temperatura as trincas ficam mais visíveis, percebe-se no final do processo, sua aparição ficando mais perceptível.

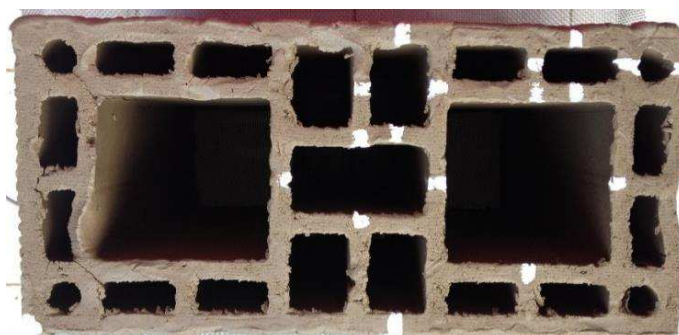
A Figura 4.21 apresentam algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 80°C. A Figura 4.21a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min; a Figura 4.21b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.21c apresenta o final do processo de secagem em $t = 930$ min.



a)



b)

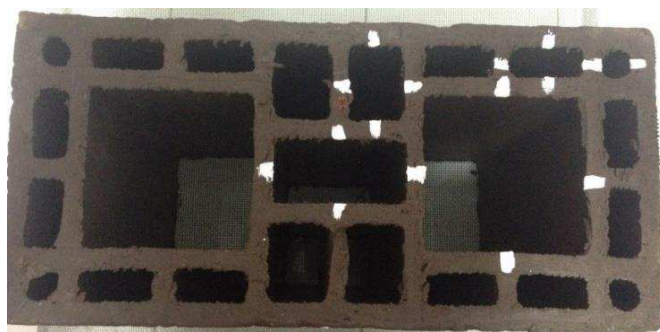


c)

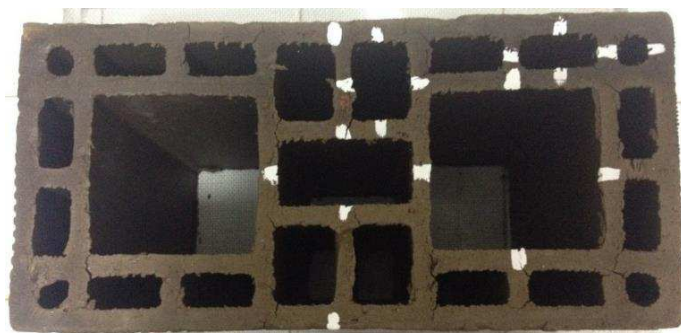
Figura 4.21 - Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 80°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 930$ min.

Com a temperatura de 80°C, o aparecimento de trincas é mais visível que nos casos anteriores, continuando até o final do processo.

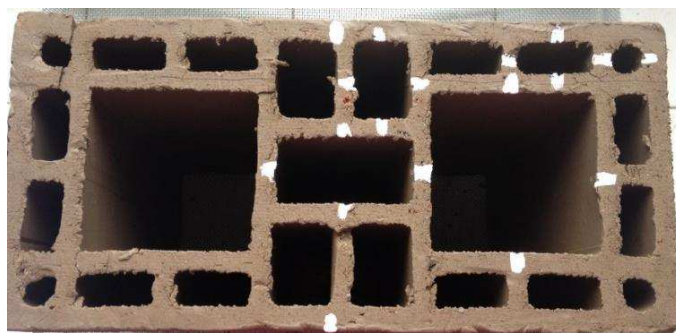
A Figura 4.22 apresentam algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 90°C. A Figura 4.22a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min, a Figura 4.22b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.22c apresenta o final do processo de secagem em $t = 930$ min.



a)



b)

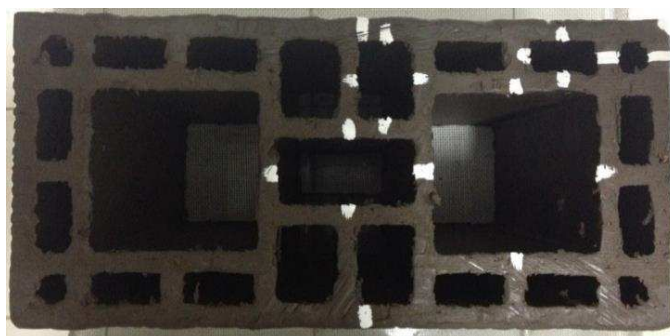


c)

Figura 4.22 - Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 90°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 930$ min.

Para essa temperatura, percebe-se que as trincas ficam mais perceptíveis não só durante o processo de secagem, mas também no final do processo.

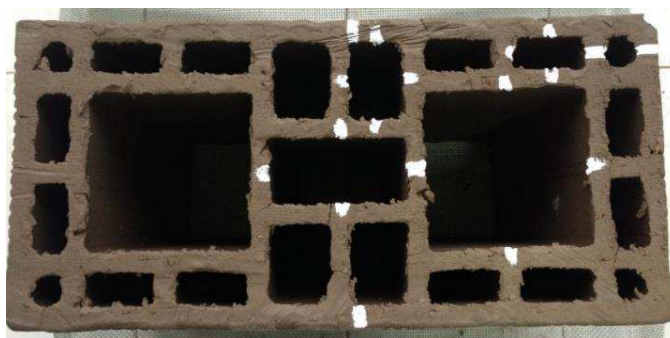
A Figura 4.23 apresentam algumas imagens das amostras durante o processo de secagem para a temperatura de 100°C. A Figura 4.23a apresenta o produto no início do processo de secagem, ou seja, em $t = 0$ min, a Figura 4.23b apresenta uma etapa intermediária do processo de secagem do produto ($t = 30$ min), e a Figura 4.23c apresenta o final do processo de secagem em $t = 750$ min.



a)



b)



c)

Figura 4.23 - Imagem do compensador 07 durante o processo de secagem a temperatura constante de 100°C. a) $t = 0$ min, b) $t = 30$ min e c) $t = 750$ min.

Percebe-se neste teste que as trincas aparecem com maior frequência do que nos casos anteriores, mostrando que a secagem a alta temperatura constante resulta em um material defeituoso.

Analisando e comparando as Figuras 4.18 a 4.23, percebe-se que quando a secagem é feita de forma muito rápida a retirada de água do produto fica sem controle, o que pode causar danos estruturais como trincas, deformações, empenamentos e consequentemente uma grande perda do produto.

Nos primeiros minutos do processo, percebe-se o aparecimento de fissuras para todas as temperaturas pré-estabelecidas, após um certo tempo, essas fissuras começam a desaparecer, aparentemente elas desaparecem por completo, mas na prática apenas diminuíram.

As camadas exteriores e interiores do produto secam mais rapidamente que o centro, contraindo-se primeiro, produzindo uma redução nas dimensões do corpo e consequentemente no seu volume.

Esta redução no volume corresponde, em alguns casos, exatamente a perda de água pelo processo de evaporação, as transferências de calor também influenciam no processo, aumentando o volume do corpo.

4.2 Resultados Empíricos

Modelos matemáticos são usados para descrever as características cinéticas do processo de secagem, visando melhorar, projetar e controlar os sistemas de secagem.

Nesta pesquisa, modelos baseados na análise concentrada foram usados para prever a perda de água dos compensadores 07. A Tabela 4.15 reporta os parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste com os dados experimentais, para cada condição de secagem.

As Figuras 4.24 - 4.29 ilustram as curvas de ajuste do teor de umidade versus tempo de secagem. É evidenciado na Tabela 4.15 e gráficos apresentados, a excelente concordância entre os valores preditos e experimentais.

Tabela 4.15 – Parâmetros da Equação (3.9) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.

T (°C)	Parâmetros						R	Proporção da variância R ² (%)	Função da perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂	A ₃	K ₃			
50	0,387821	0,004265	0,091216	0,000258	0,535953	0,003671	0,99946	99,891	0,004823258
60	0,574559	0,004633	0,419857	0,004719	0,040949	-0,000146	0,99869	99,737	0,011336955
70	0,511129	0,004934	0,510657	0,004929	0,018652	-0,000326	0,99875	99,750	0,010912852
80	-0,670062	0,018504	1,606741	0,008782	0,054324	0,000440	0,99995	99,989	0,000472258
90	0,252810	0,005576	0,338899	0,005921	0,463447	0,005702	0,99740	99,481	0,023480731
100	0,521918	0,007286	0,144841	0,007151	0,401816	0,007247	0,99690	99,380	0,025547162

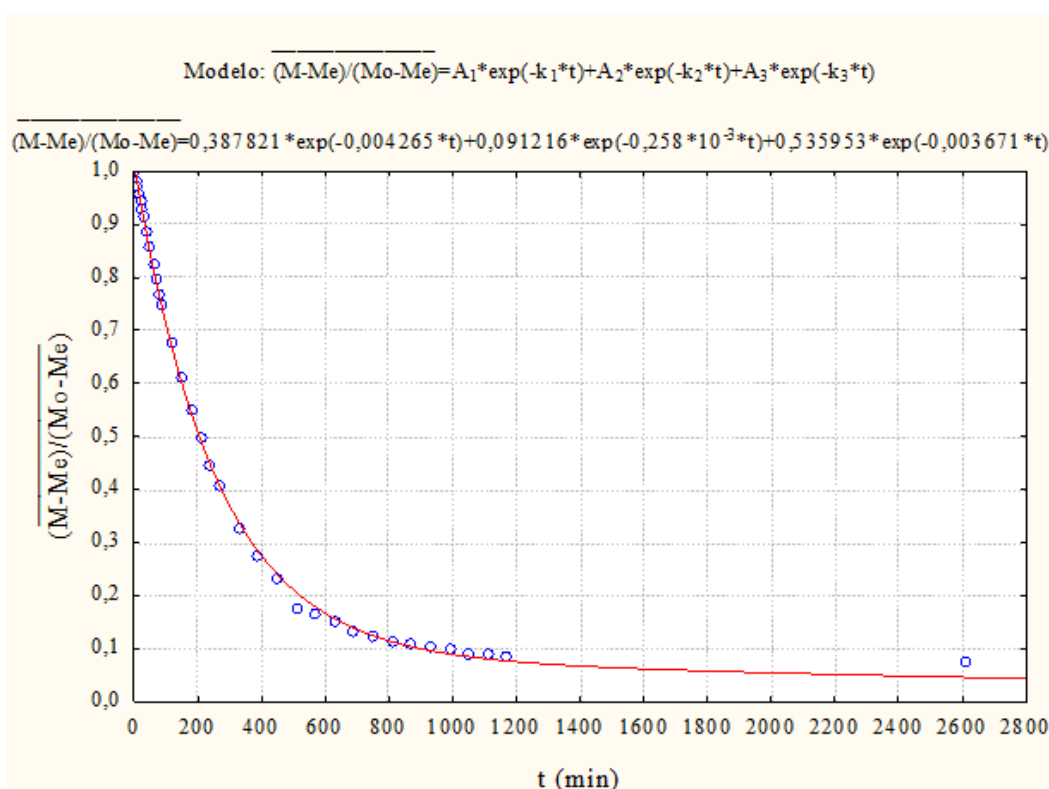


Figura 4.24 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

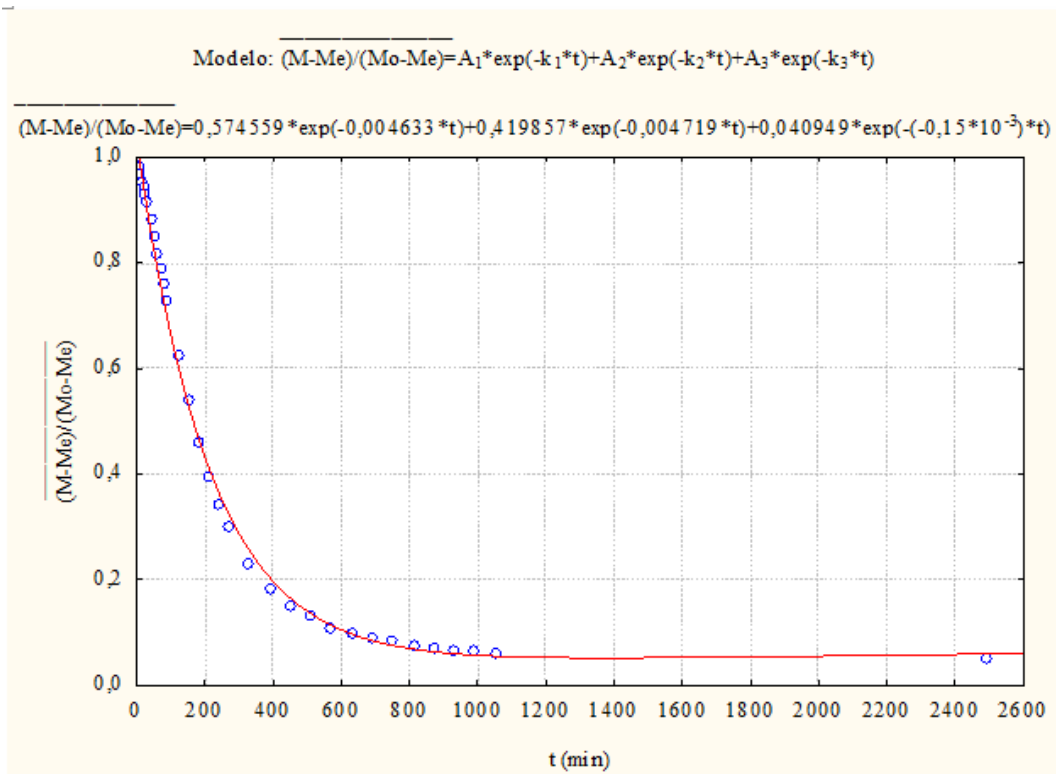


Figura 4.25 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

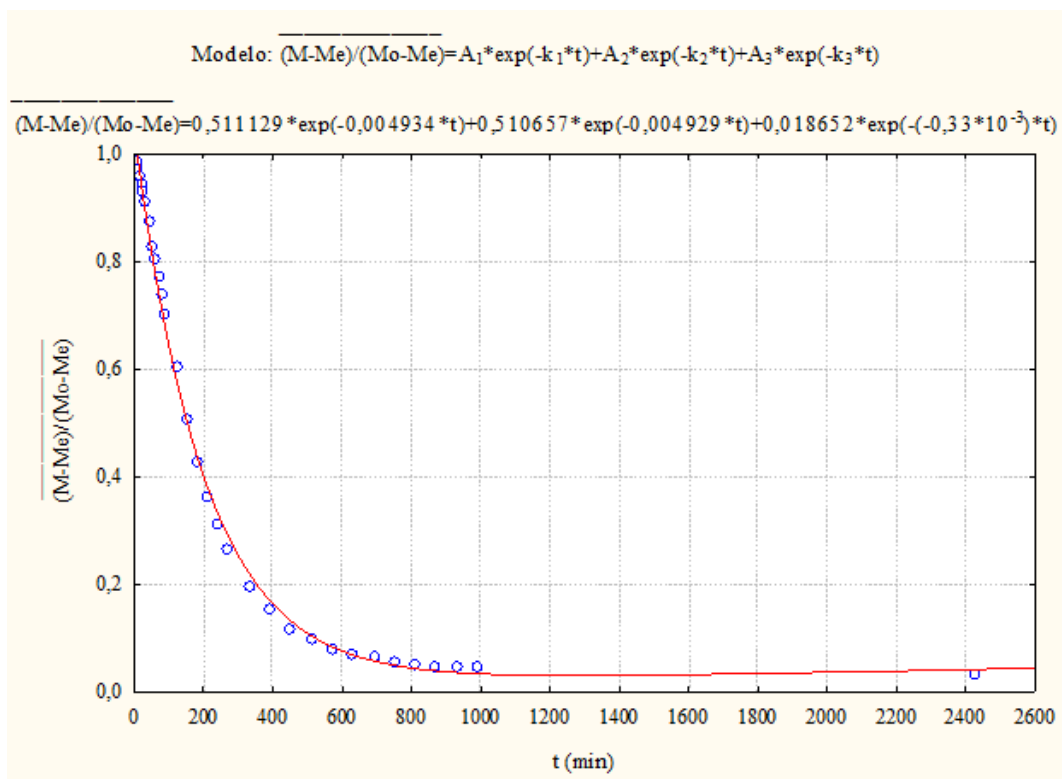


Figura 4.26 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

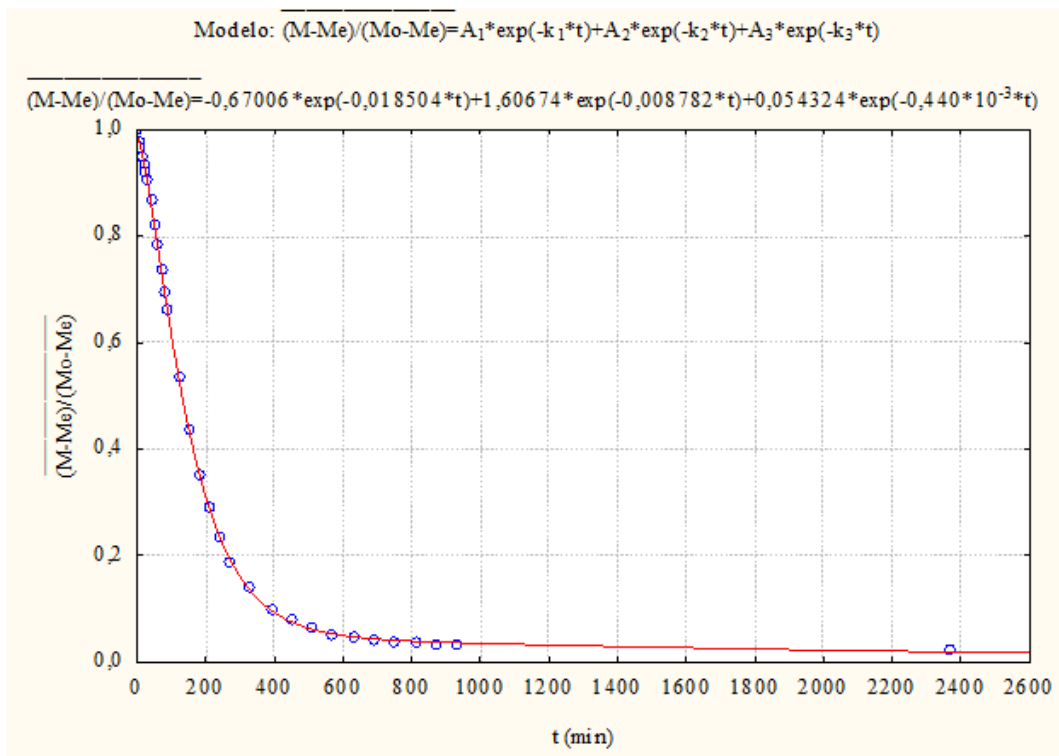


Figura 4.27 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

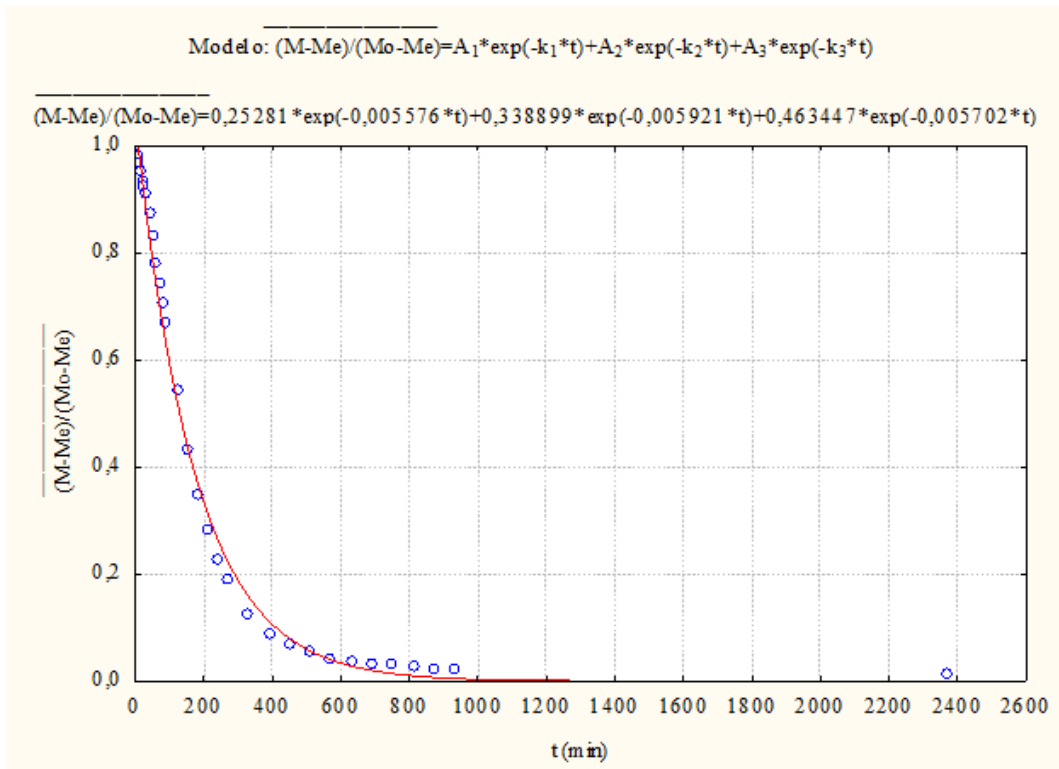


Figura 4.28 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.

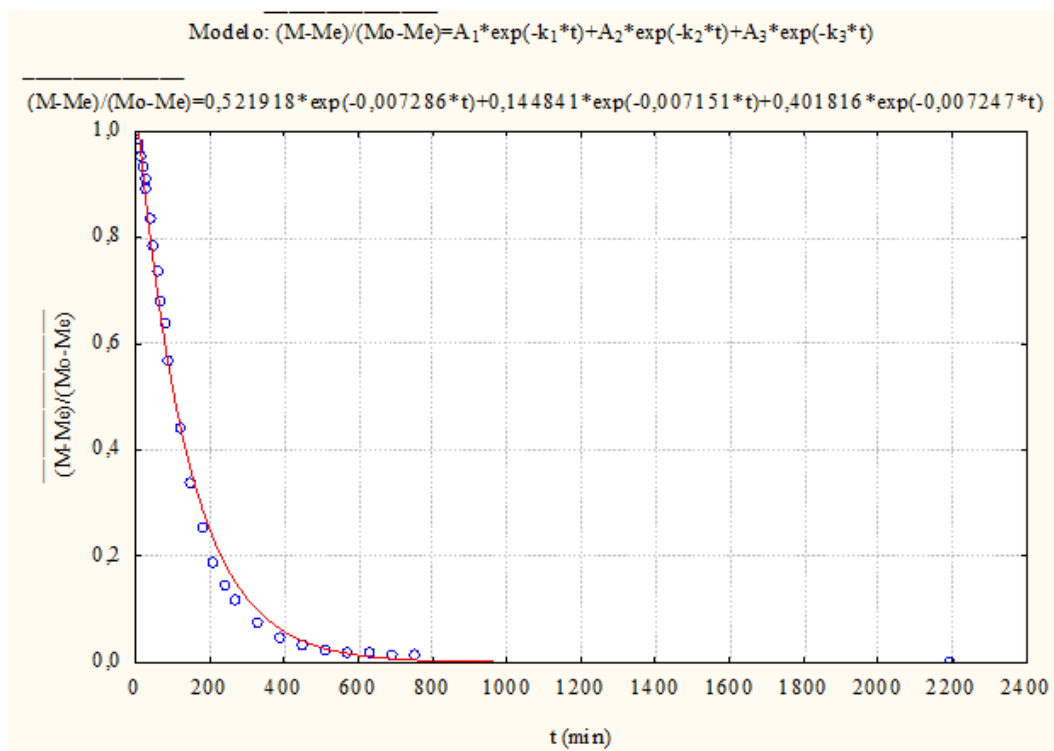


Figura 4.29 - Comparação entre os teores de umidade médios da amostra, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.

A Tabela 4.16 reporta os parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste com os dados experimentais, para cada condição de secagem.

Tabela 4.16 – Parâmetros da Equação (3.10) obtidos após ajuste aos dados experimentais da temperatura do compensador 07.

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância R ² (%)	Função da perda (obs-pred) ²
	A ₁	A ₂	A ₃	K ₁			
50	-787,916	67,19074	3389,015	0,634396	0,99203	98,413	0,020156985
60	-0,719279	0,031483	24257966	5,796751	0,97985	96,011	0,103145044
70	-0,430192	0,099995	24,29616	1,484782	0,98561	97,144	0,060579904
80	-0,916498	0,099981	743,2643	1,935063	0,98590	97,200	0,071052816
90	-1,02358	0,099994	1737,664	2,080468	0,98609	97,236	0,067527313
100	-1,20292	0,100005	8471,309	2,370514	0,98701	97,418	0,055786056

As Figuras 4.30 a 4.35 ilustram as curvas de ajuste da temperatura na superfície do compensador 07 versus tempo de secagem. É evidenciado na tabela e nos gráficos apresentados, a boa concordância entre os valores preditos e experimentais.

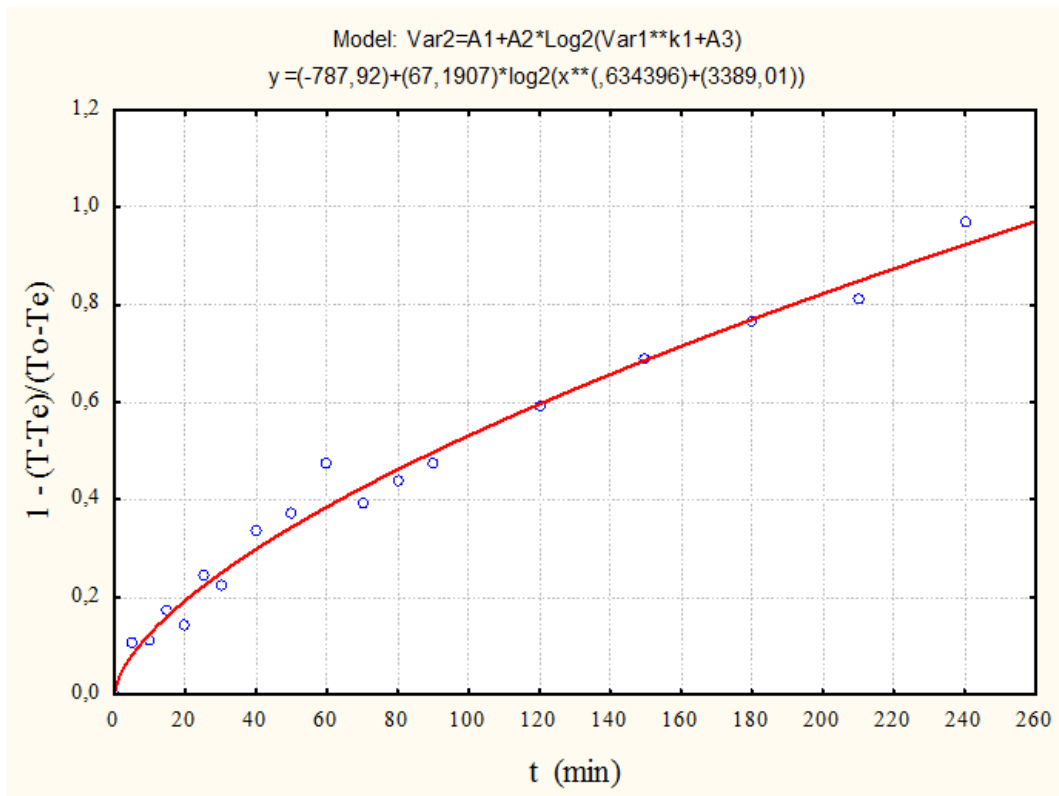


Figura 4.30 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

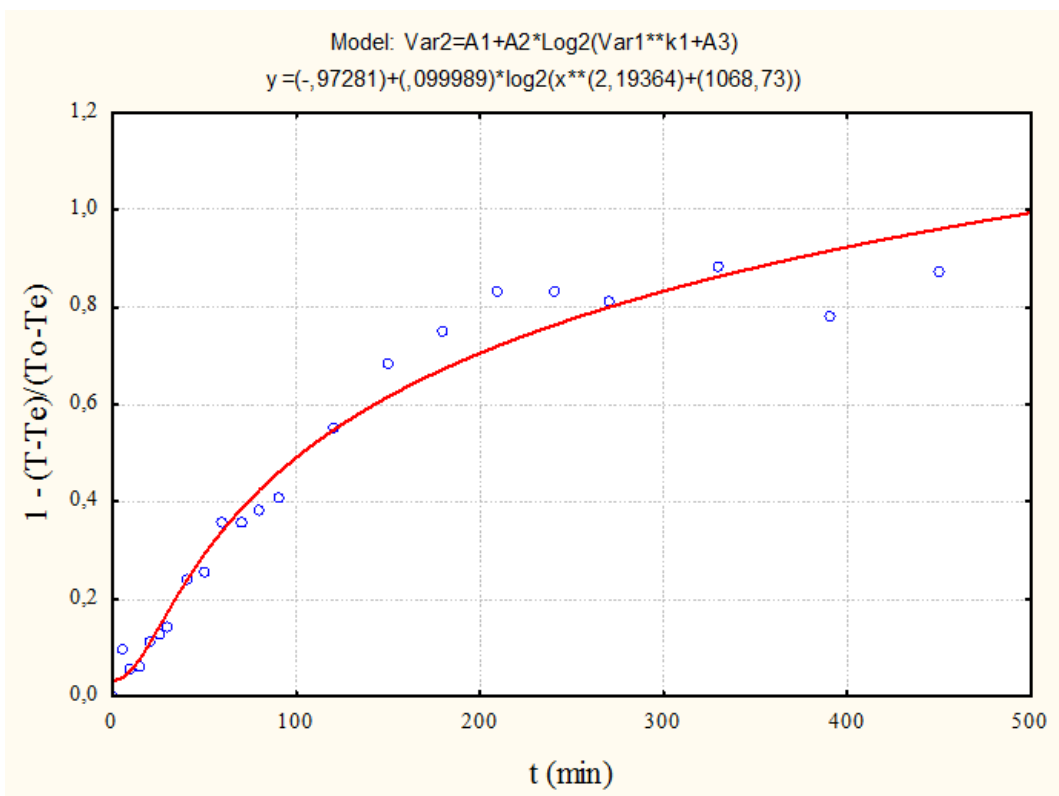


Figura 4.31 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

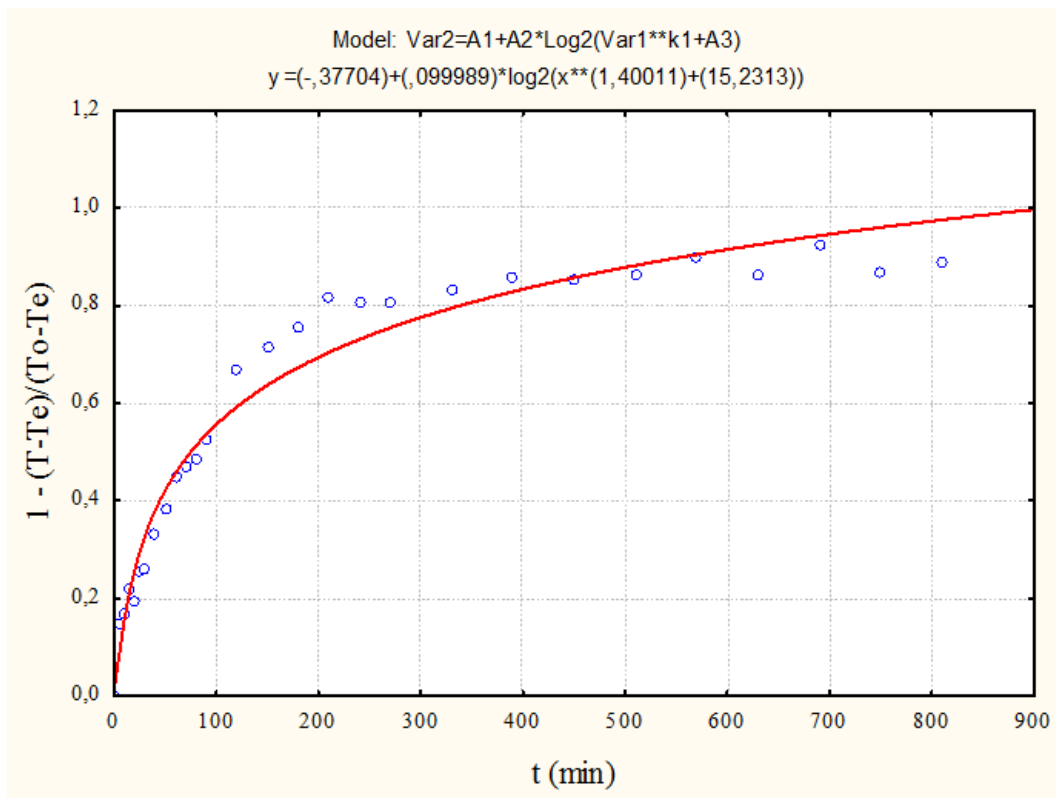


Figura 4.32 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

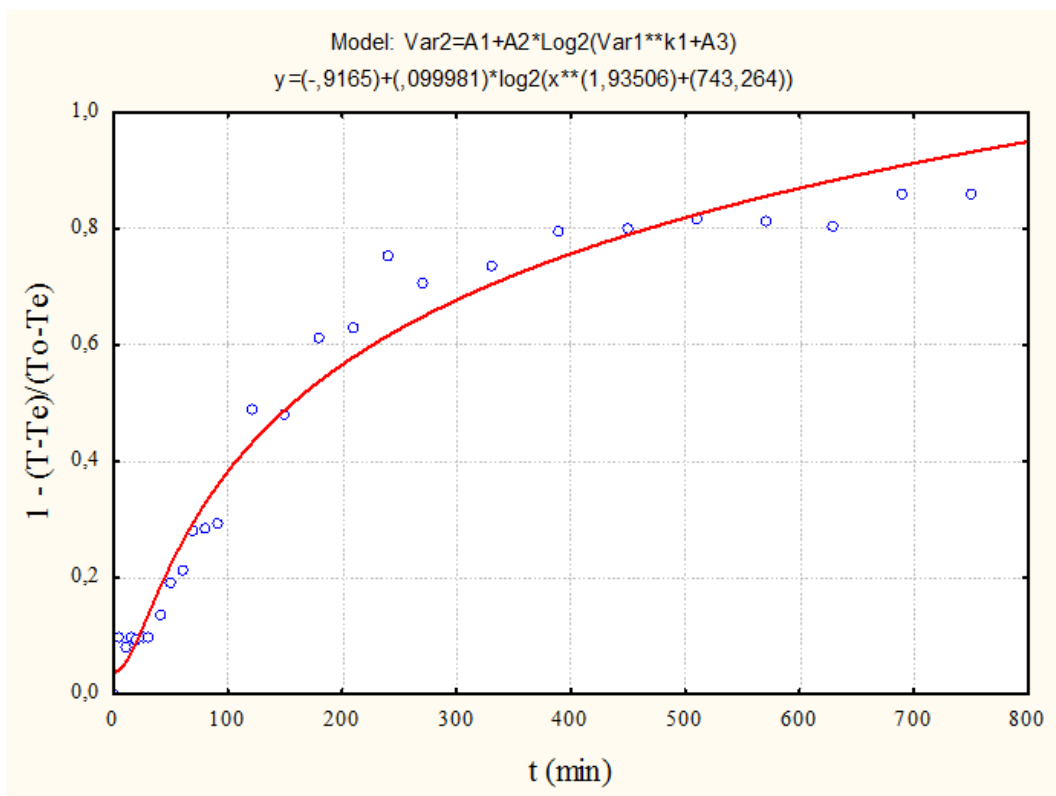


Figura 4.33 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental ($\circ\circ\circ$) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

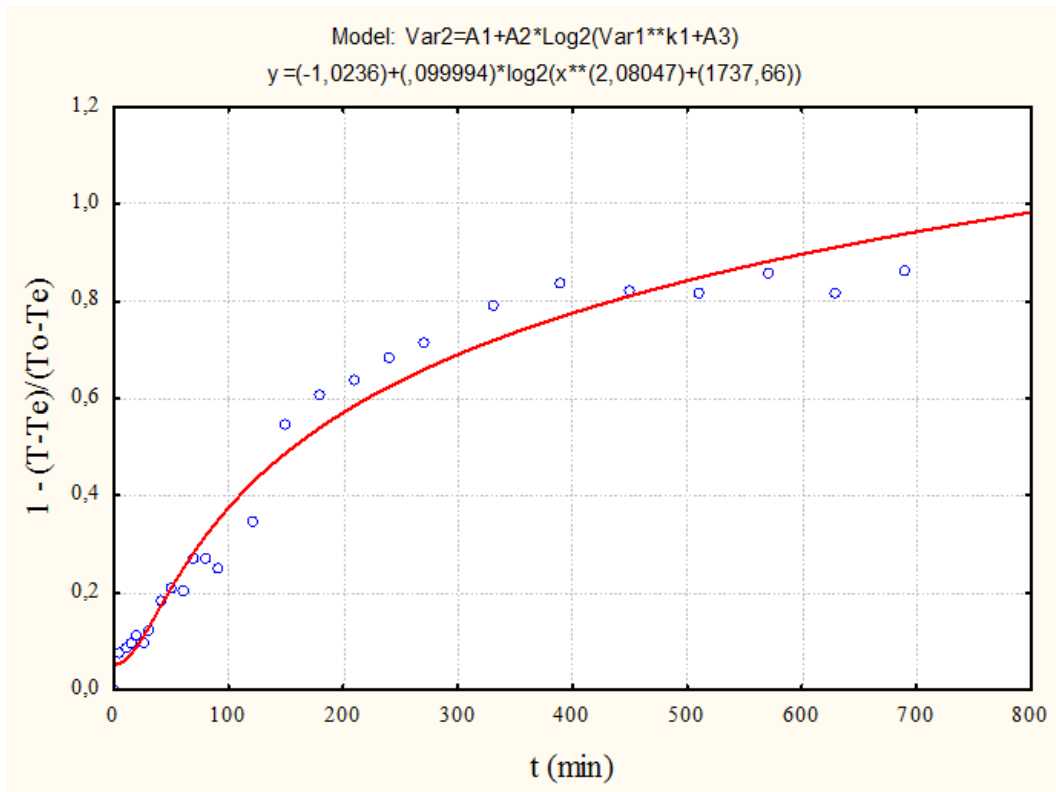


Figura 4.34 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.

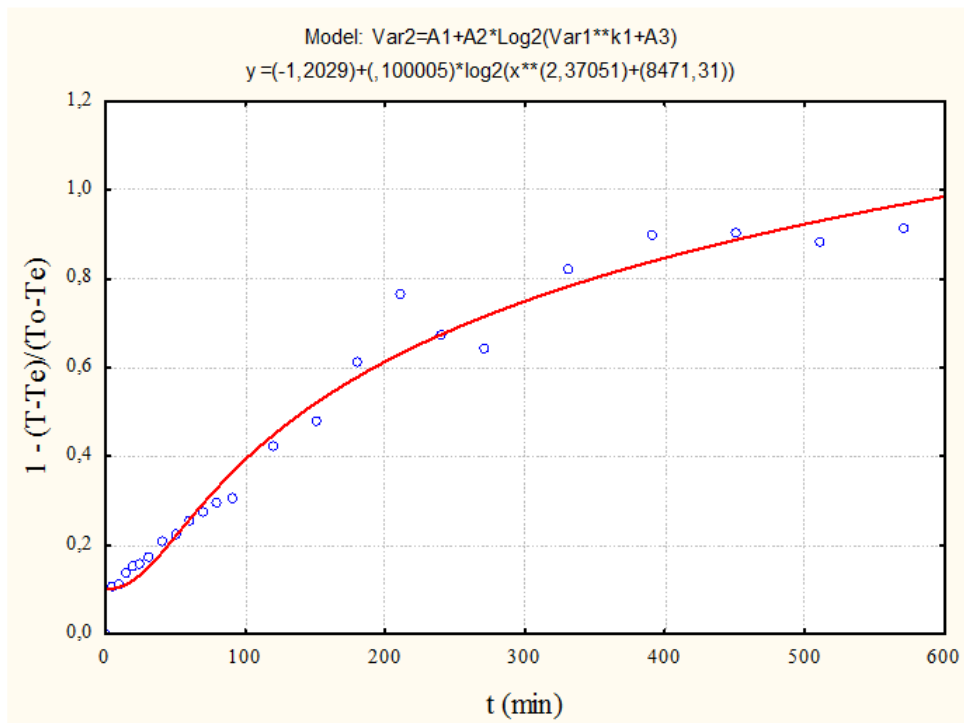


Figura 4.35 - Comparação entre as temperaturas na superfície do compensador 07, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.

As Figuras 4.36 a 4.41 ilustram as curvas de ajuste da variação volumétrica versus teor de umidade em base seca. A Tabela 4.17 apresenta os parâmetros da Equação (3.11) onde se verifica que um bom ajuste foi obtido caracterizado.

Tabela 4.17 – Parâmetros da Equação (3.11) obtidos após ajuste aos dados experimentais da retração volumétrica e da umidade em base seca.

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância R ² (%)	Função da perda (obs-pred) ²
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄			
50	138,8301	-28,3998	1,743784	0,799623	0,93609	87,626	0,010510213
60	46,12506	-7,11487	0,578258	0,875063	0,95756	91,691	0,005242792
70	197,2900	-39,6807	1,947327	0,832275	0,96984	94,058	0,004023262
80	128,3147	-18,4338	0,409029	0,788854	0,97447	94,959	0,006020077
90	138,4372	-26,8351	1,270814	0,861886	0,95375	90,964	0,003402164
100	86,36272	-13,2380	0,317325	0,884270	0,91048	82,898	0,005858689

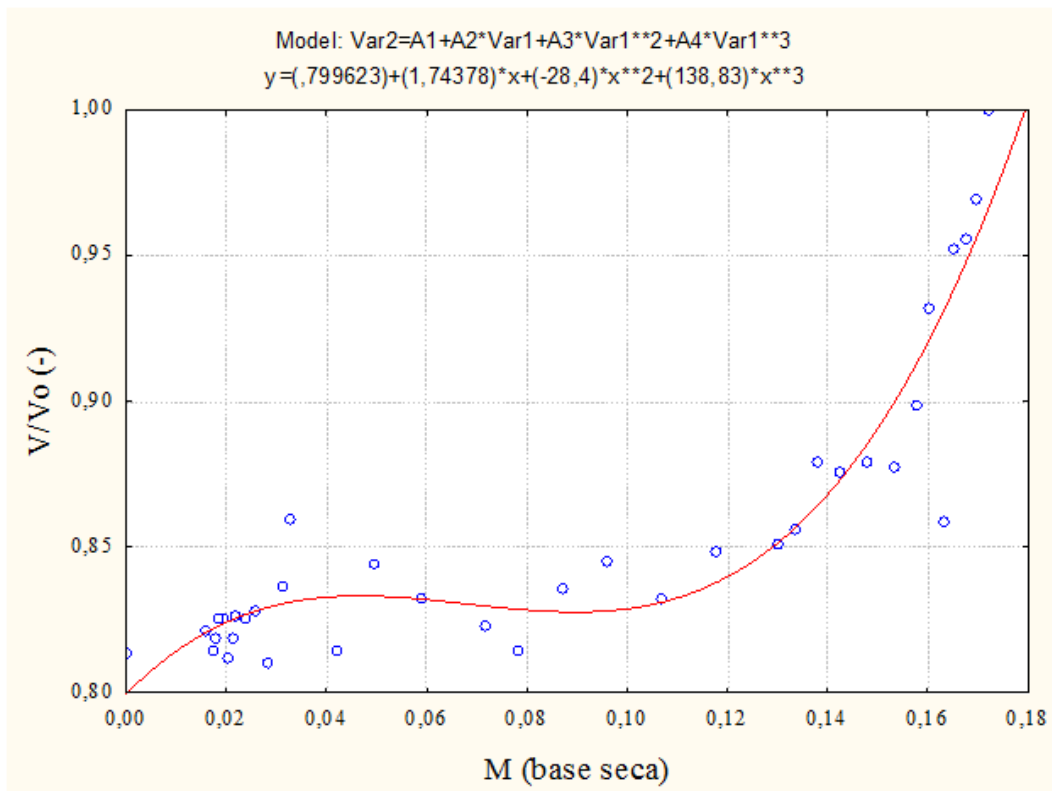


Figura 4.36 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 50°C.

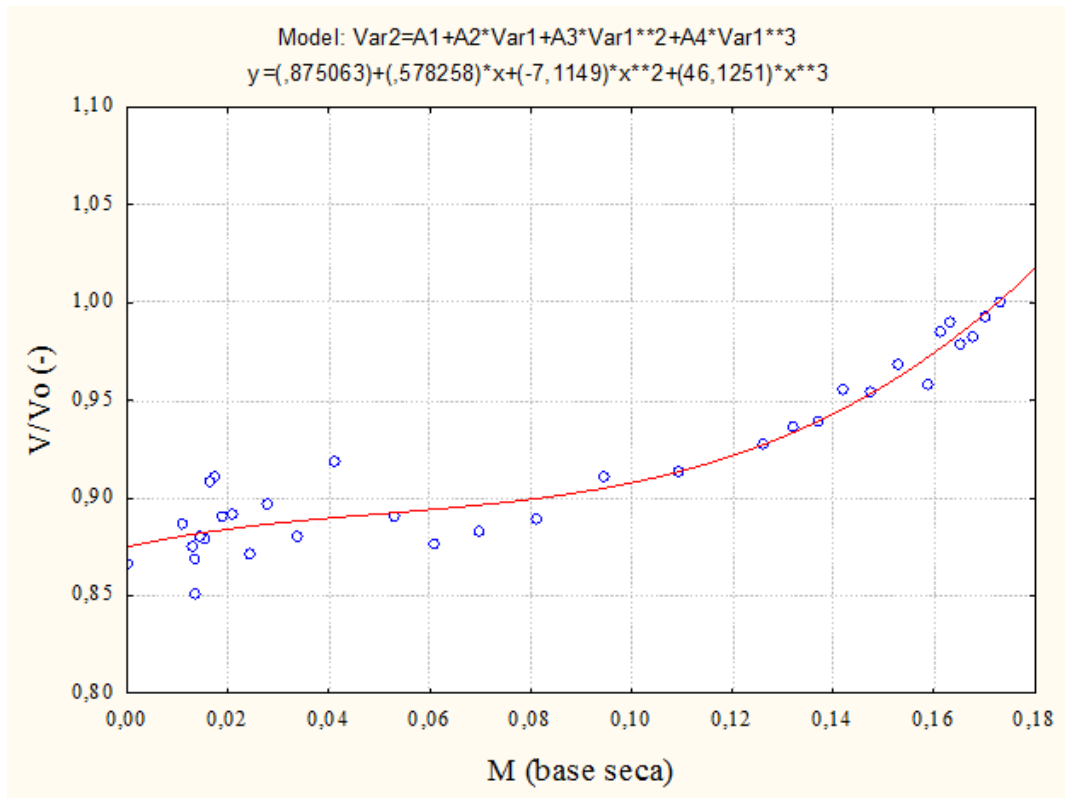


Figura 4.37 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 60°C.

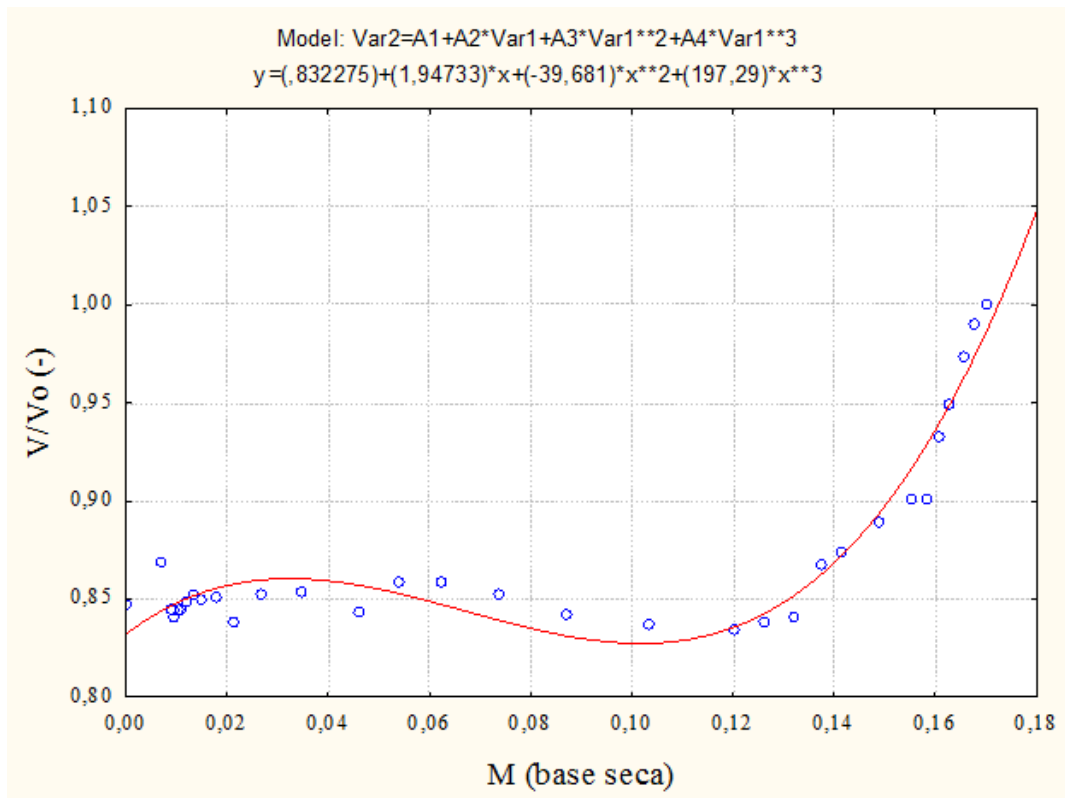


Figura 4.38 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (___) para o experimento realizado na temperatura de 70°C.

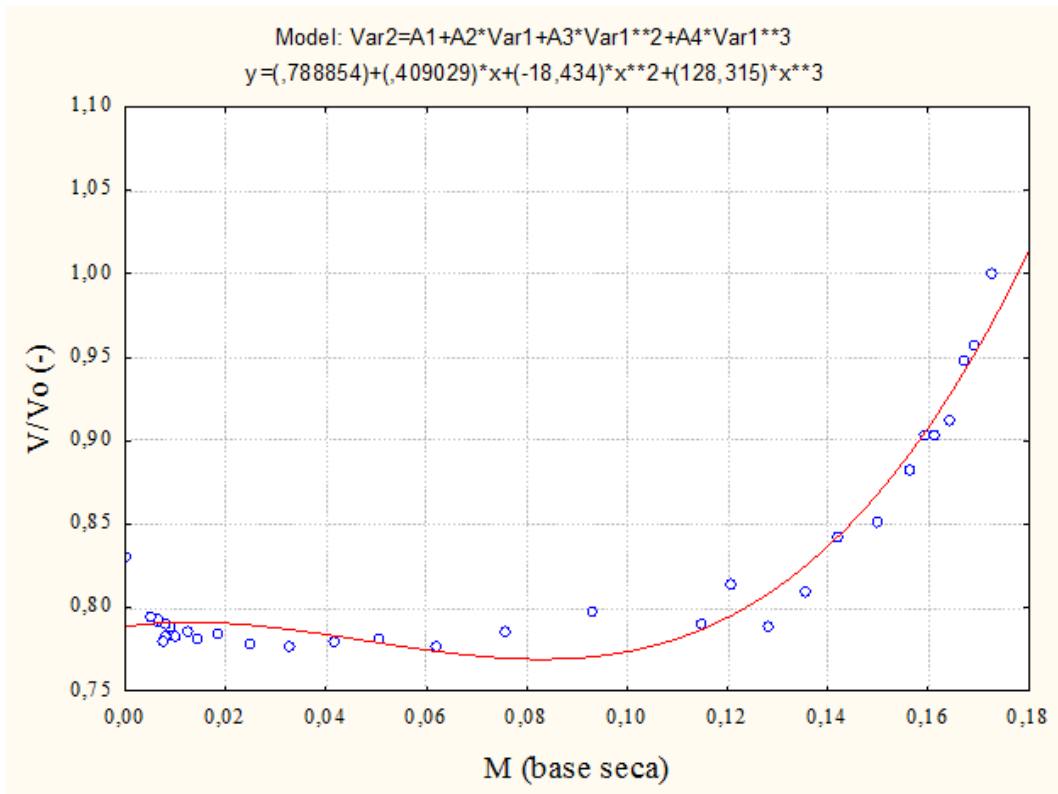


Figura 4.39 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 80°C.

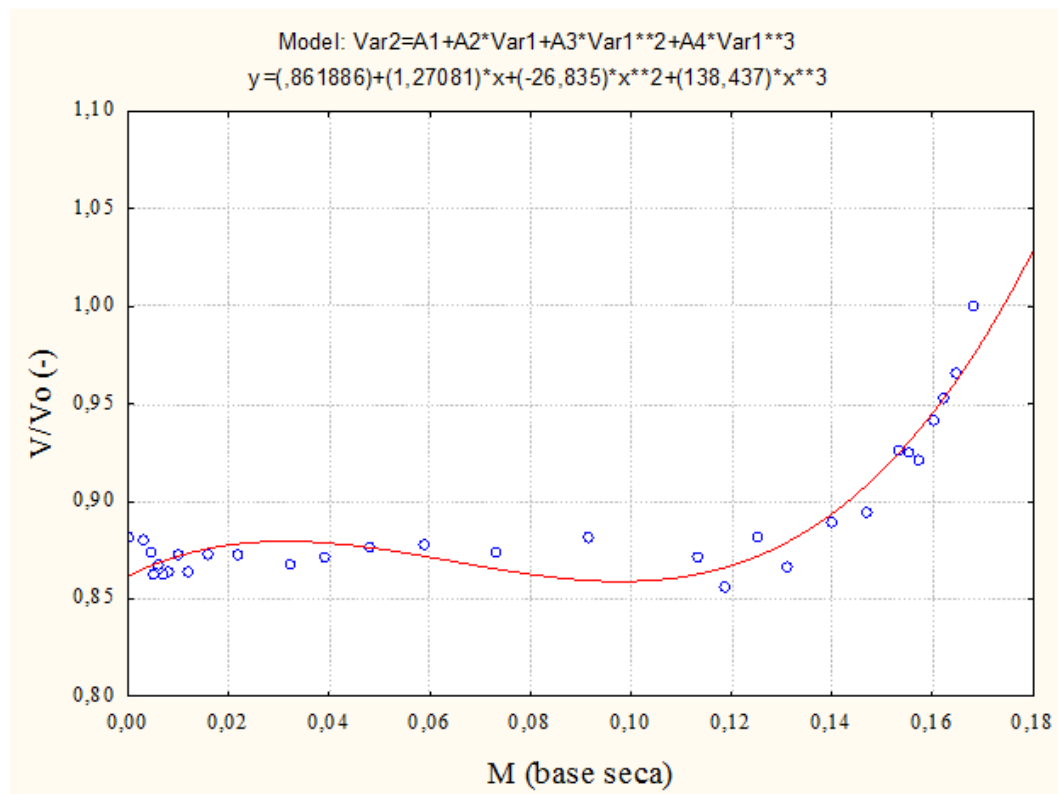


Figura 4.40 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 90°C.

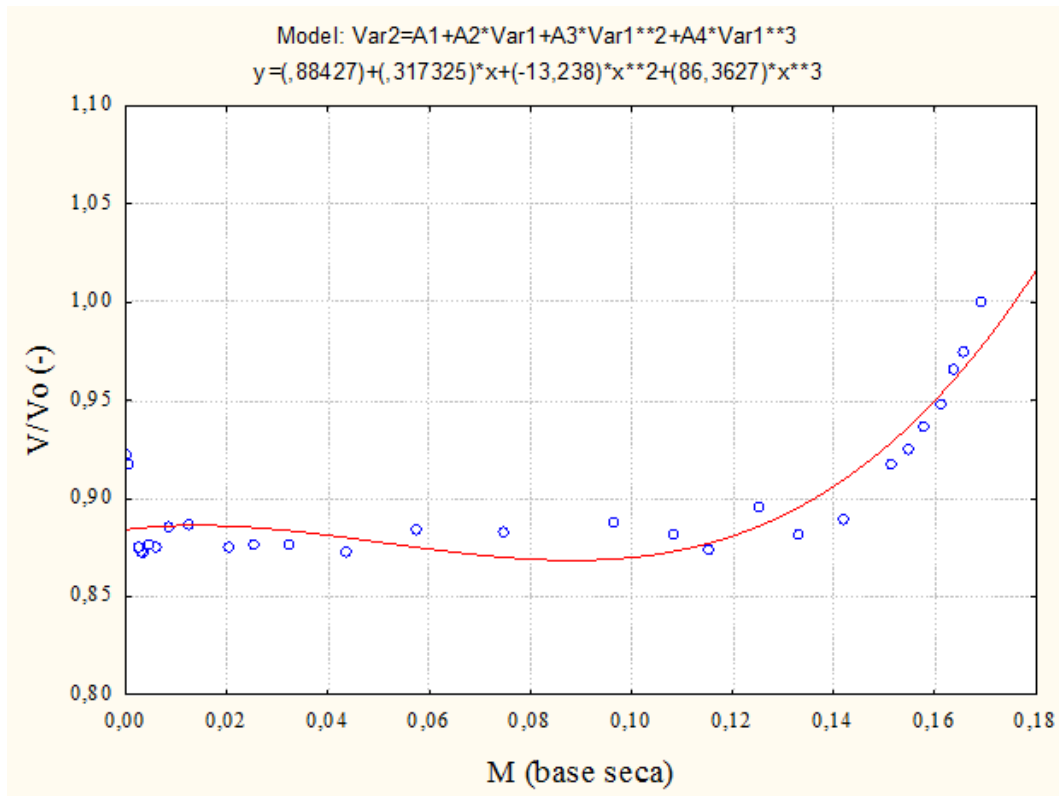


Figura 4.41 - Comparação entre o volume adimensional do compensador 07, experimental (ooo) e predito (—) para o experimento realizado na temperatura de 100°C.

4.3 Resultados obtidos com o simulador

As Figuras 4.42 a 4.47 ilustram as curvas do teor de umidade do experimento versus o encontrado através da simulação em um secador tipo túnel de fluxos cruzados em função do tempo de secagem, a fim de validar a metodologia utilizada.

A comparação pode ser efetuada, pois a análise tem como base a primeira camada do compensador no leito ($y = 0$), possibilitando uma melhor comparação e consequentemente uma melhor aproximação dos dados.

Percebe-se analisando essas Figuras que foi obtido êxito na secagem a baixas temperaturas, com o aumento da temperatura houve um distanciamento das curvas.

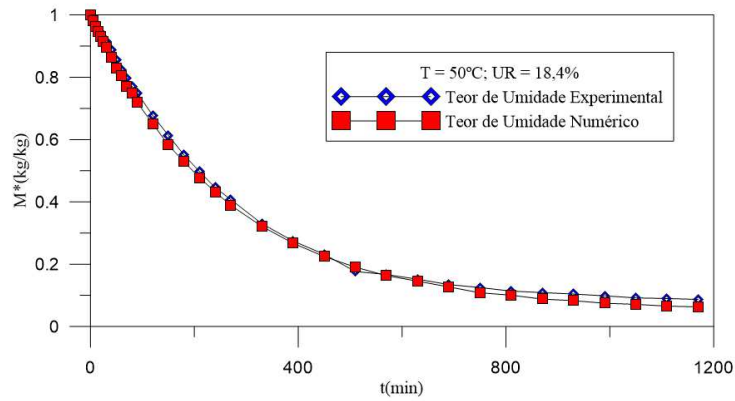


Figura 4.42 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 50°C.

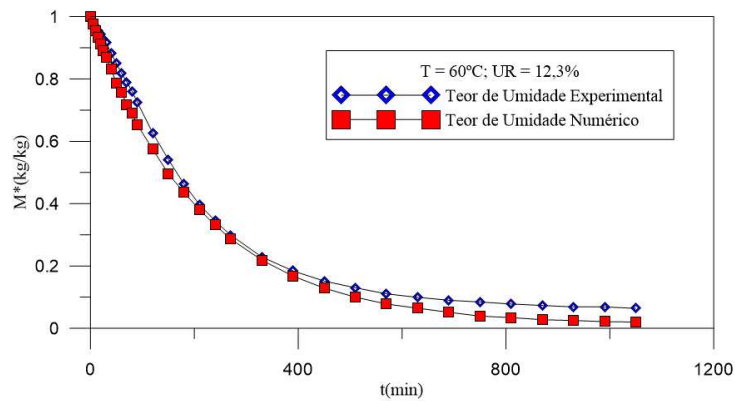


Figura 4.43 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 60°C.

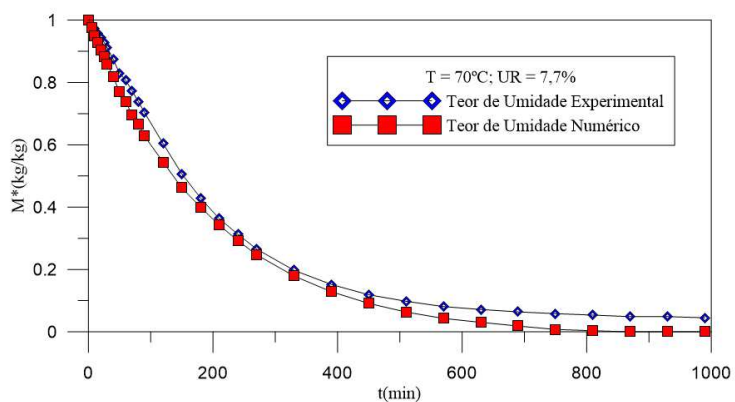


Figura 4.44 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 70°C.

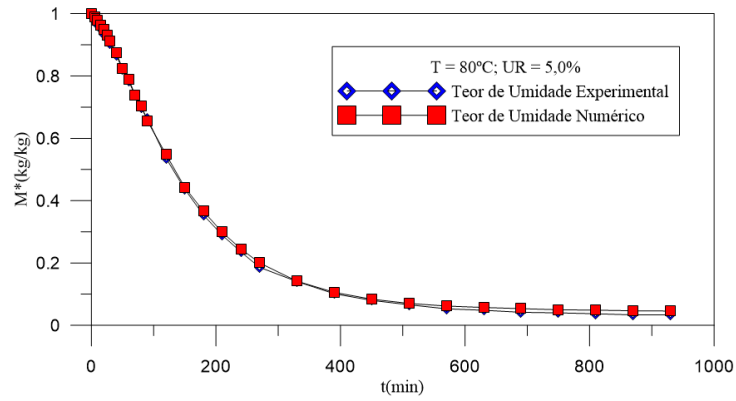


Figura 4.45 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 80°C.

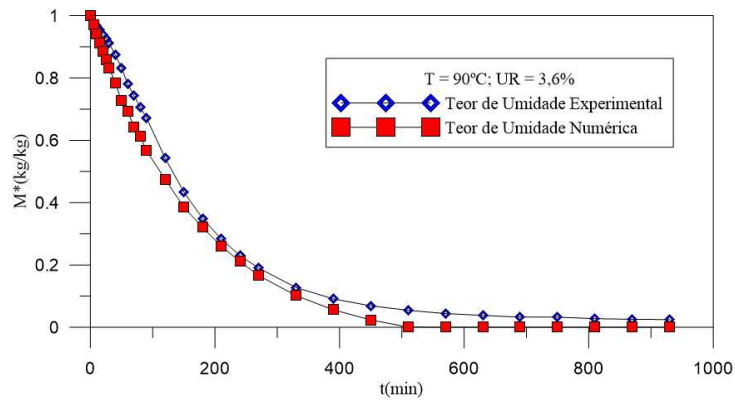


Figura 4.46 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 90°C.

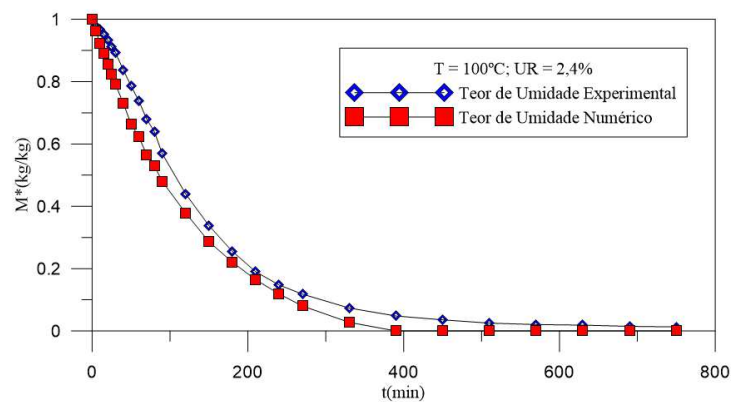


Figura 4.47 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais do teor de umidade do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura constante de 100°C.

Nas Figuras 4.48 a 4.53, é mostrado a comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado.

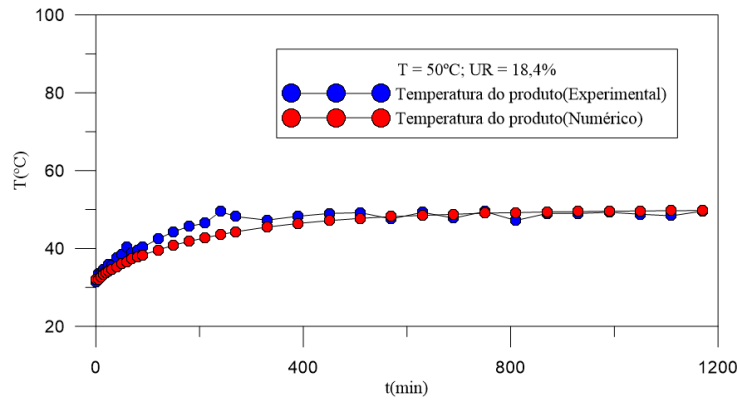


Figura 4.48 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 50°C.

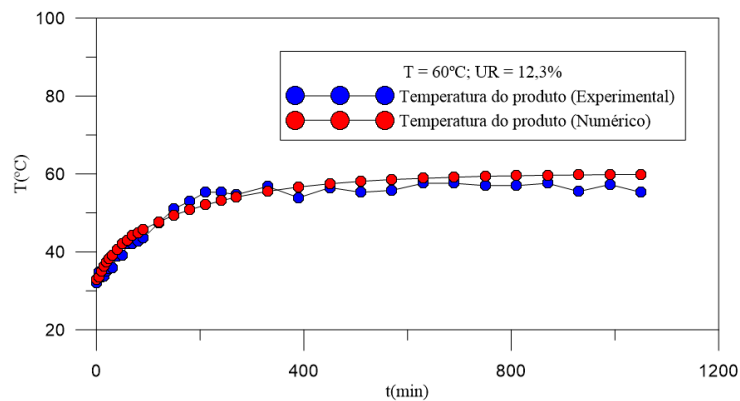


Figura 4.49 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 60°C.

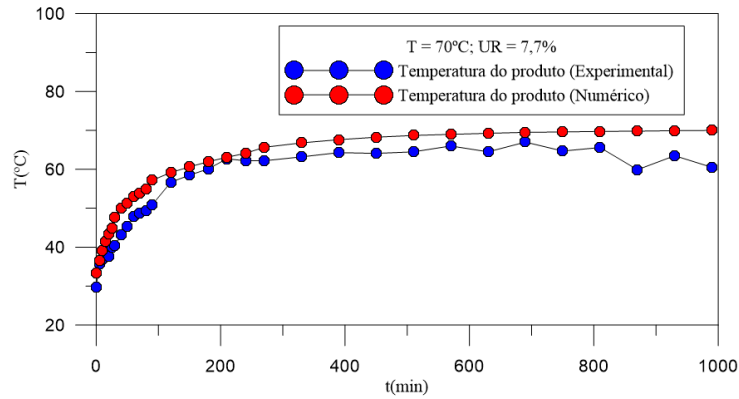


Figura 4.50 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 70°C.

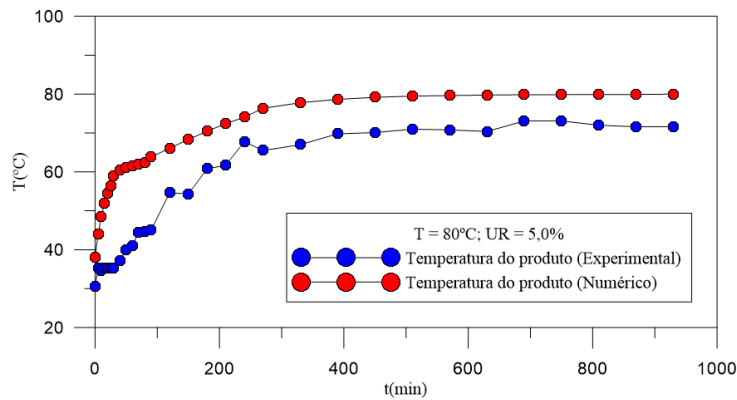


Figura 4.51 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 80°C.

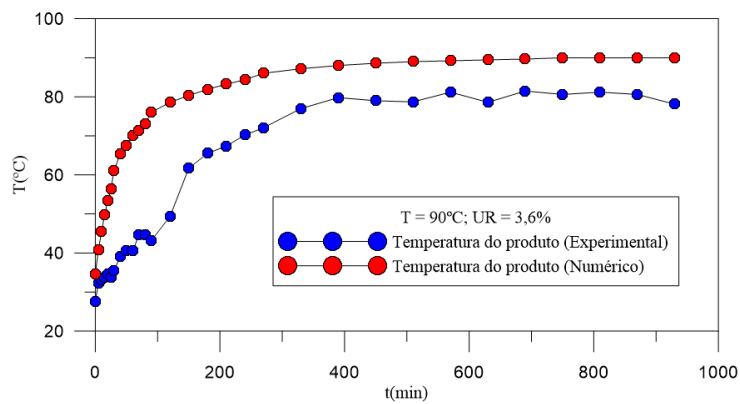


Figura 4.52 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 90°C.

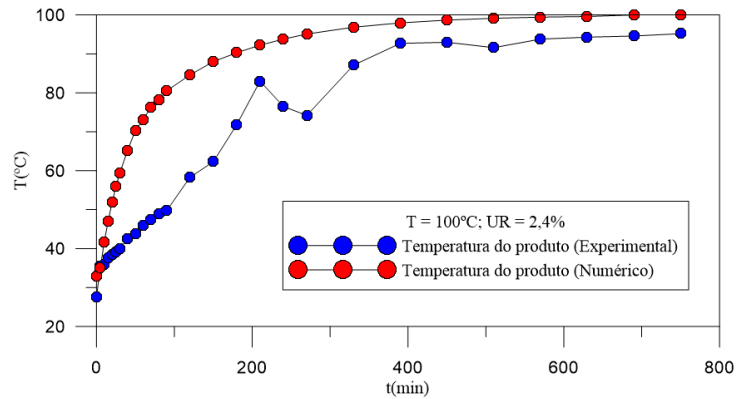


Figura 4.53 - Comparação entre os dados numéricos e experimentais da temperatura do compensador industrial durante o processo de secagem em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para temperatura de 100°C.

É perceptível nas Figuras apresentadas que a baixas temperaturas o experimental condiz com o numérico.

Ainda analisando as Figuras é evidenciado que a temperatura vinha aumentando até um certo tempo e depois começou a variar, esse fenômeno pode ser explicado devido ao fato da velocidade do ar de secagem no secador industrial, que foi usada para obter os dados numéricos ser bem maior que a velocidade do ar na estufa.

Nas Figuras 4.54 a 4.65 temos os valores do teor de umidade (M), temperatura do compensador (θ), razão de umidade do ar (x), temperatura do ar (T), pressão de vapor saturado (Pvs) e umidade relativa (UR) em nove tempos diferentes ao longo do leito para as temperaturas de 50°C e 100°C, respectivamente.

Percebe-se nos tempos analisados (Figuras 4.54 a 4.57) que não há uma grande diferença do teor de umidade e da temperatura ao longo do leito, o que implica afirmar que não se verifica a presença de altos gradientes térmicos e hídricos durante a secagem.

Altos gradientes térmicos e hídricos ao longo do leito não são recomendados, por que isso produz uma secagem não uniforme e grandes tensões termo hídricas no compensador causando trincas, empenamentos, entre outros defeitos.

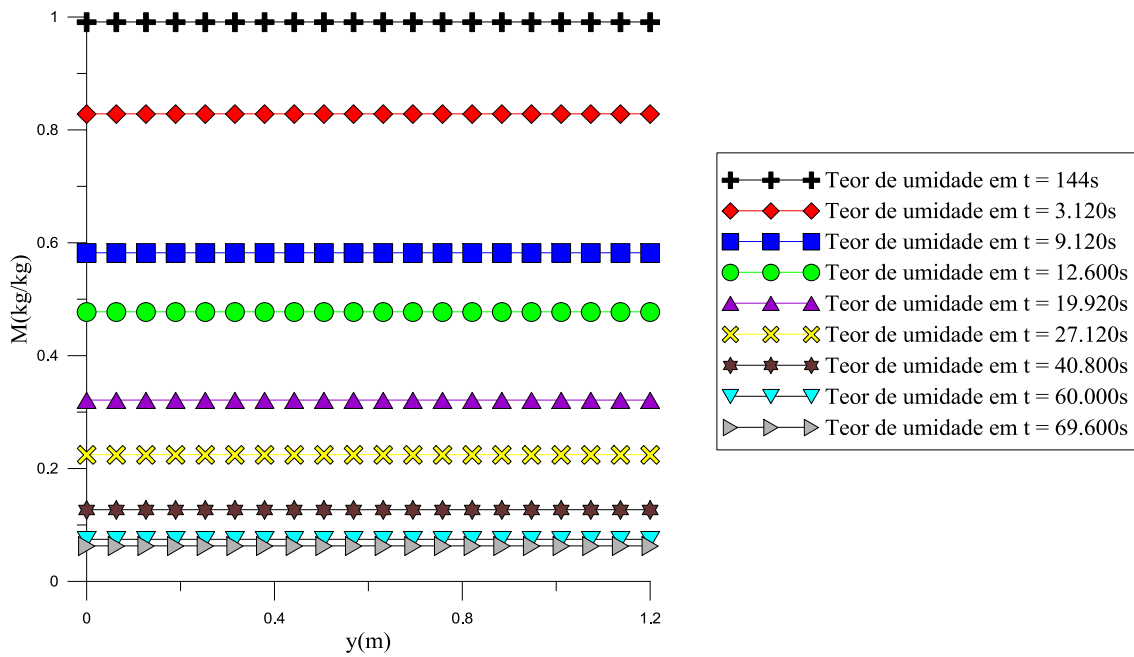


Figura 4.54 - Variação do teor de umidade ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

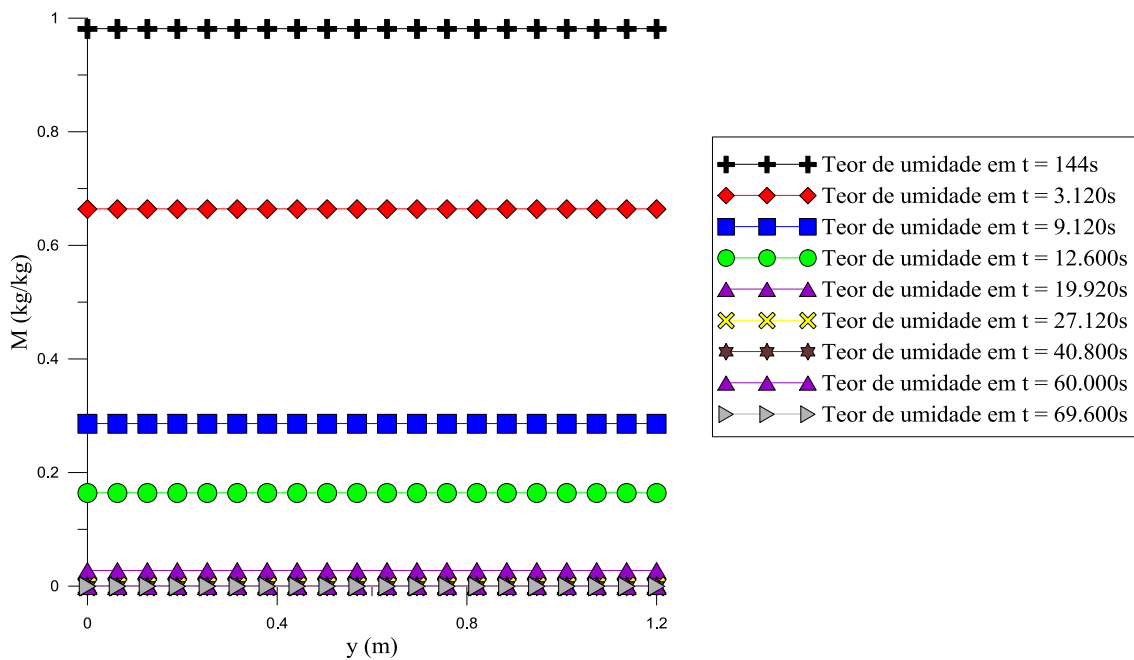


Figura 4.55 - Variação do teor de umidade ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

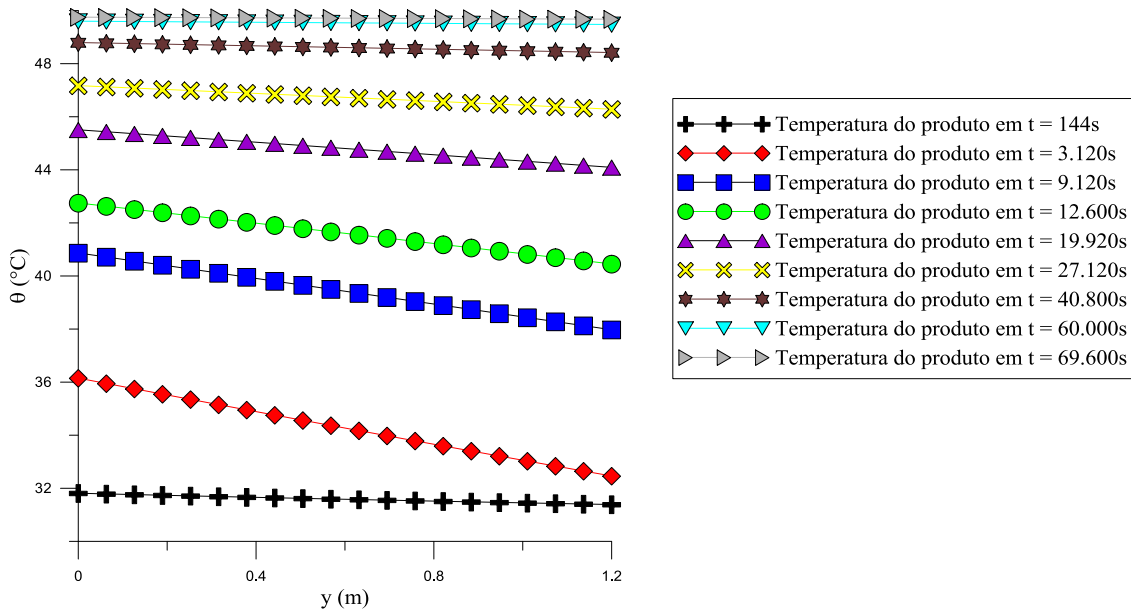


Figura 4.56 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

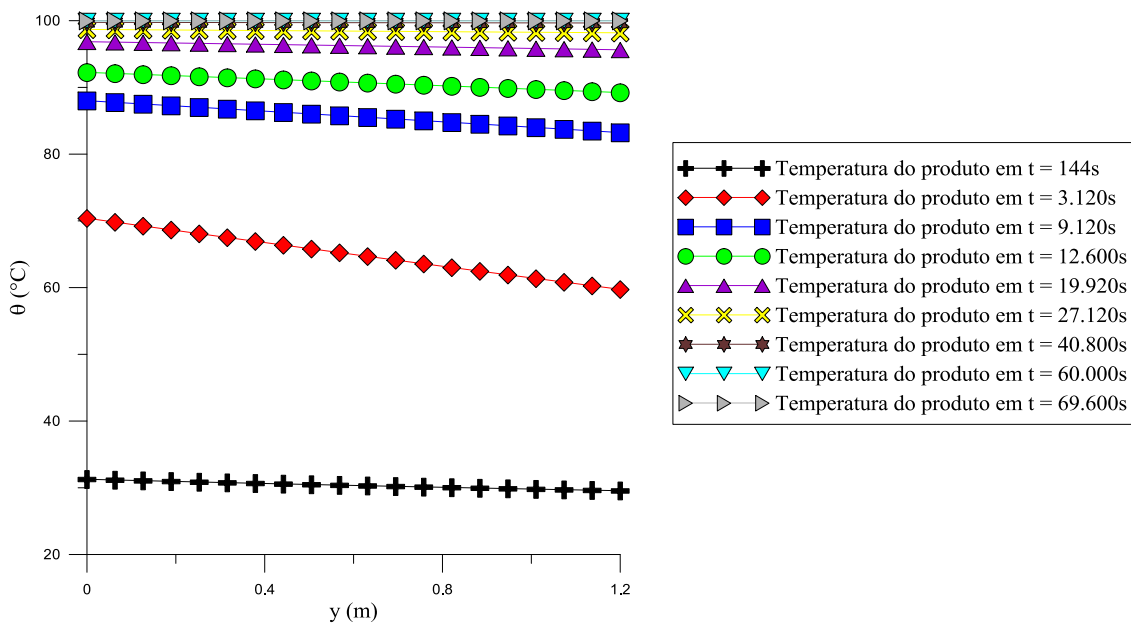


Figura 4.57 - Variação da temperatura do produto ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

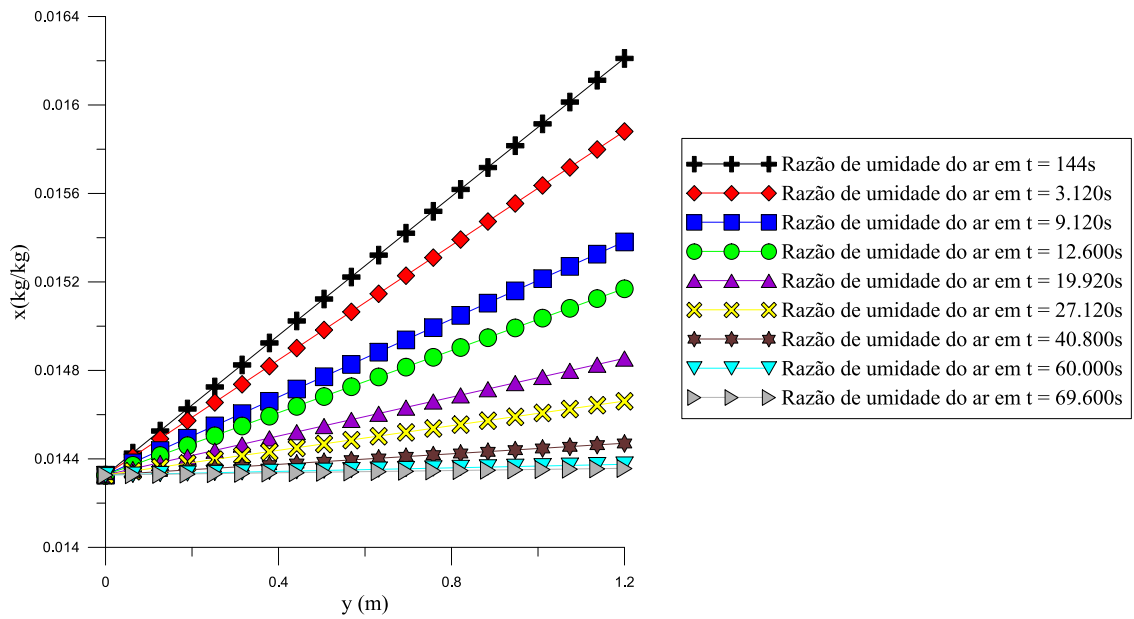


Figura 4.58 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

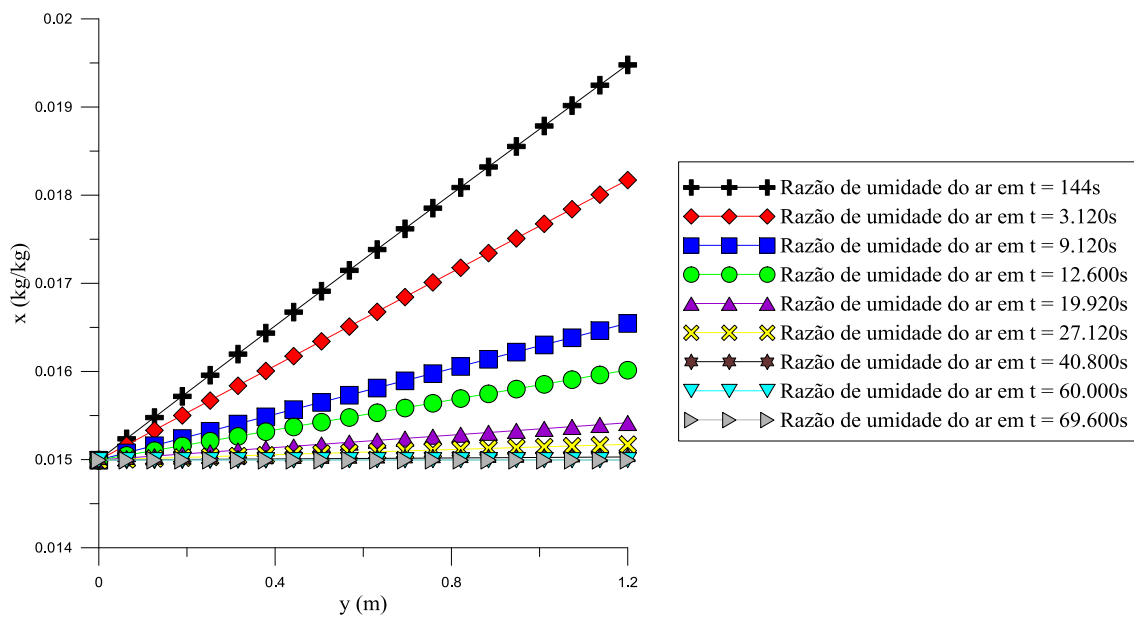


Figura 4.59 - Variação da razão de umidade do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

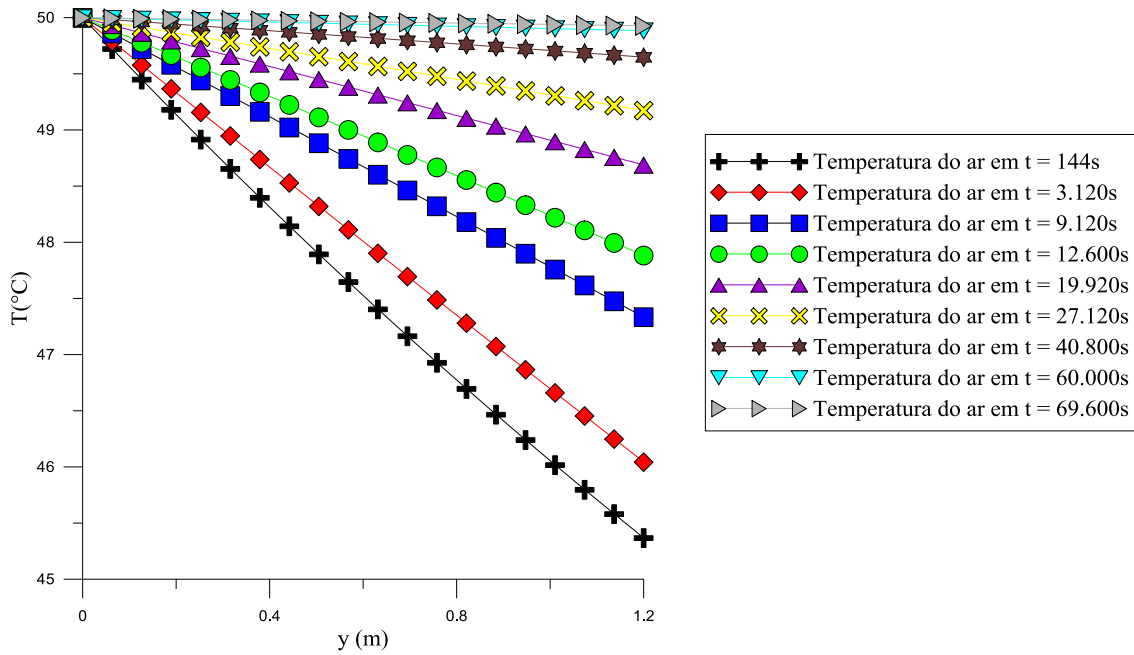


Figura 4.60 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

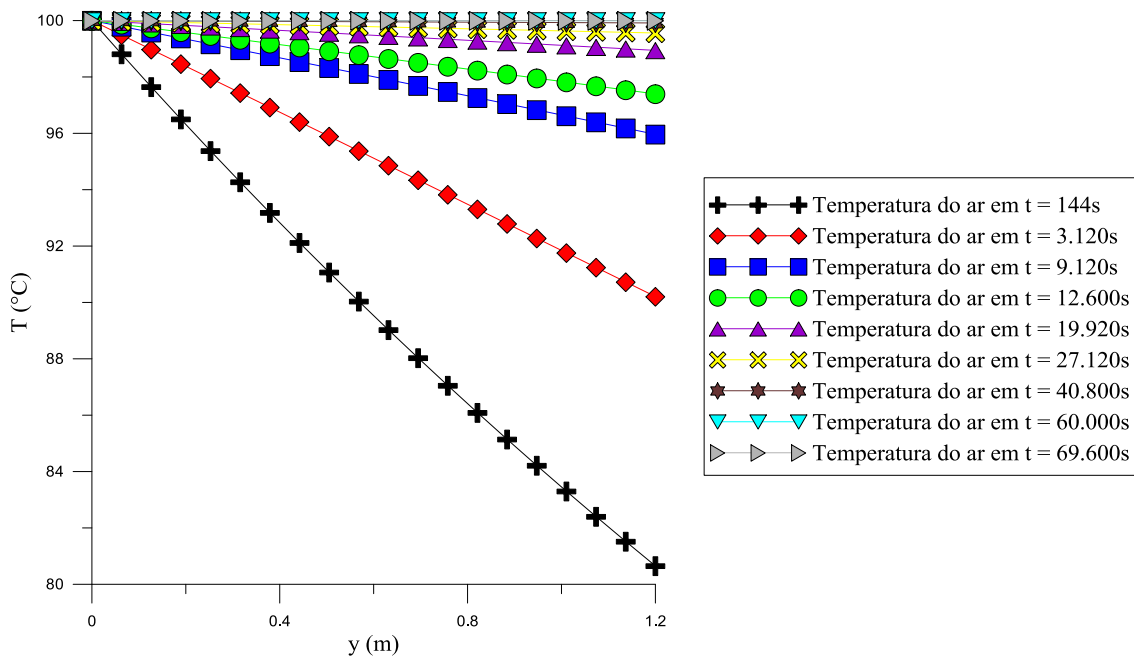


Figura 4.61 - Variação da temperatura do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

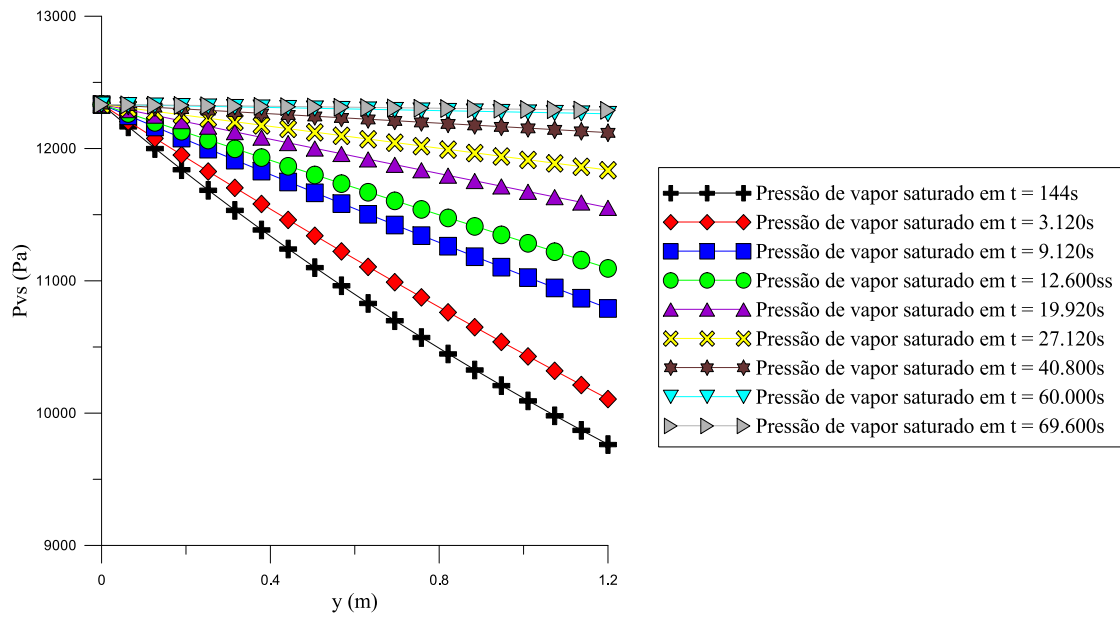


Figura 4.62 - Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

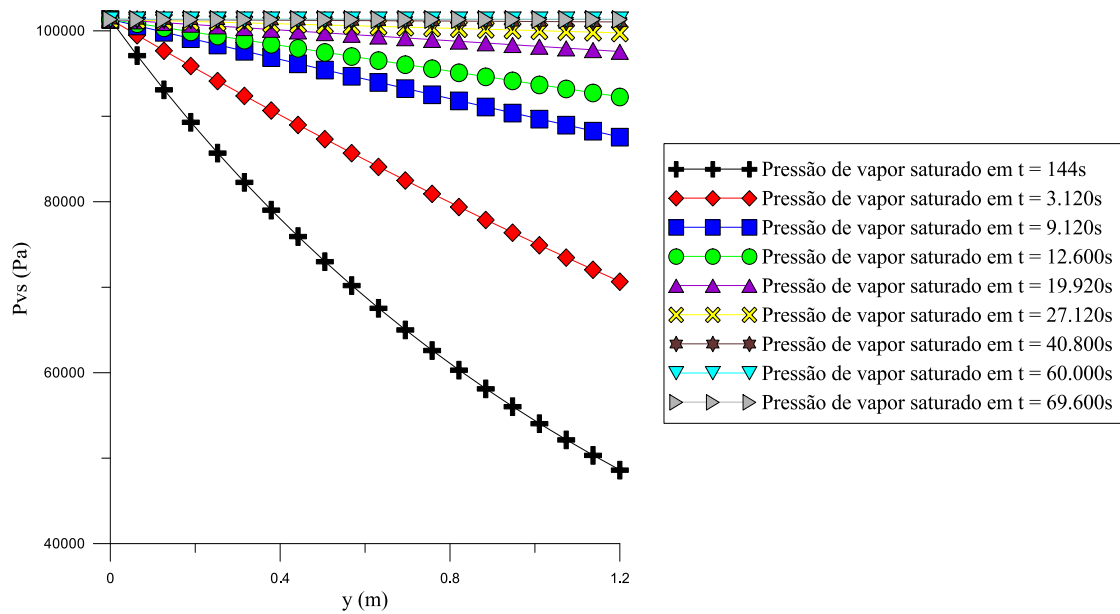


Figura 4.63 - Variação da pressão de vapor saturado ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

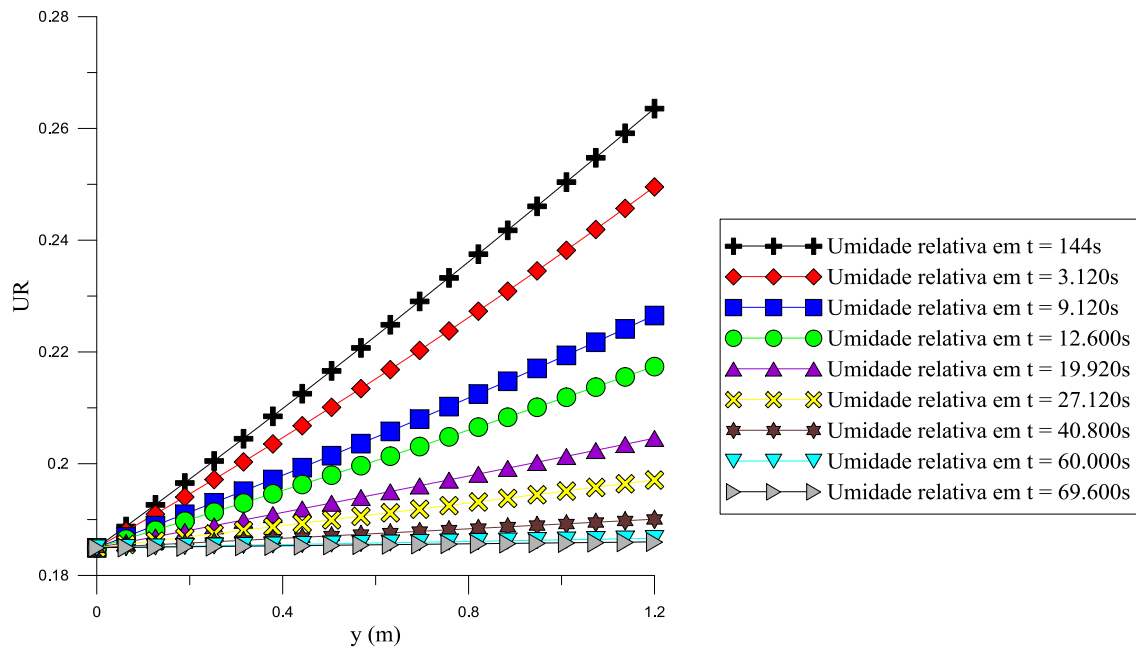


Figura 4.64 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 50°C.

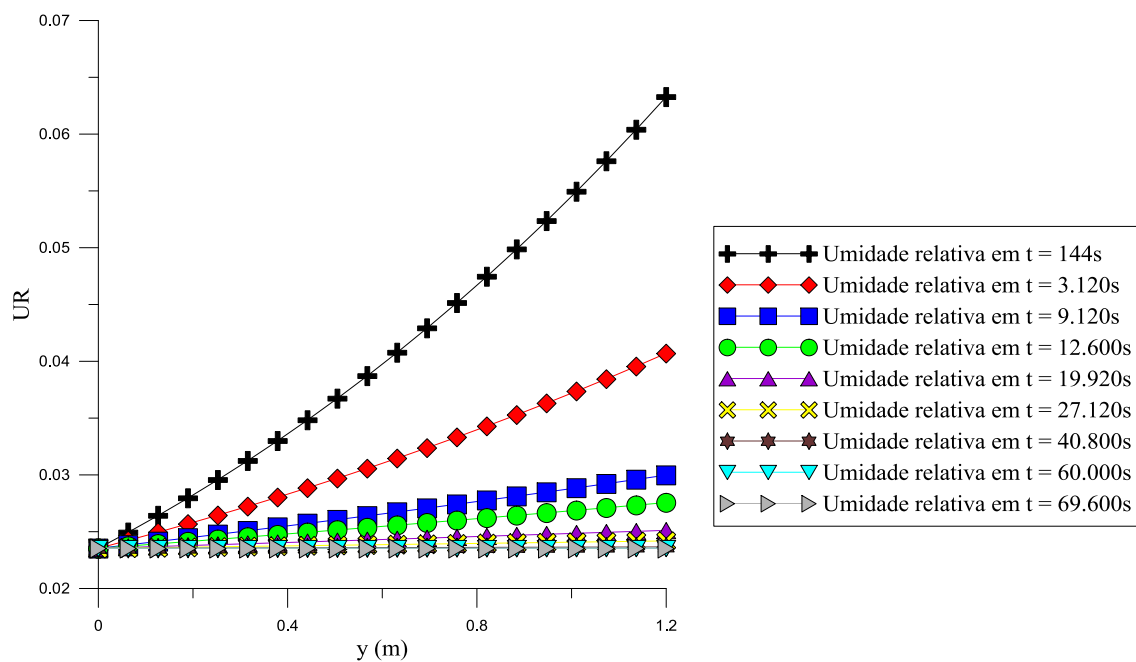


Figura 4.65 - Variação da umidade relativa do ar ao longo do leito para nove tempos diferentes durante o processo de secagem do compensador industrial em um secador tipo túnel de fluxo cruzado para a temperatura de 100°C.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 Conclusões

Após as análises laboratoriais, dados experimentais e formulação matemática para secagem de blocos cerâmicos industriais pode-se concluir que:

- Caracterização química, mineralógica, granulométrica, térmica e gravimétrica.
 - a) Com relação a análise química, a argila apresenta característica de argila vermelha, prevalecendo a sílica (57,533%), alumina (23,426%) e o óxido de ferro III (8,887%);
 - b) Com relação a fase mineralógica a matéria-prima usada, é constituída basicamente de: caulinita, quartzo e feldspato;
 - c) Apresenta alto teor de silte (80,09%), um percentual de (1,51%) de areia e uma fração de argila equivalente a (18,4%);
 - d) Com relação a curva termogravimétrica foi detectado perda de 2% de massa (0 e 170°C), perda de 4% de matéria orgânica (170°C e 510°C) e perda de hidroxila (acima de 510°C);
 - e) Com relação a curva termo diferencial foi detectados picos endotérmicos por causa da perda de água (120°C) e da presença de hidroxila (547°C).
- Secagem em estufa
 - a) Variáveis do ar de secagem como umidade relativa e temperatura afetam diretamente o aquecimento do sólido úmido e a cinética de secagem. Para menores

temperaturas a velocidade de secagem é menor, diminuindo os riscos de defeitos no produto;

- b) Secagem em altas temperaturas geram grandes taxas de retração volumétrica, o que geralmente pode provocar a propagação de trincas, fissuras ou rachaduras, e compromete a qualidade e a capacidade do produto suportar tensões de compressão;
- c) Verifica-se, através dos experimentos com temperatura constante de 50°C, 60°C, 70°C, 80°C, 90°C e 100°C que o compensador adquire seu ponto de equilíbrio térmico e cinético com 1170 min, 1050 min, 990 min, 930 min, 930 min e 750 min respectivamente.
- d) O produto apresentou um encolhimento praticamente linear nos primeiros minutos em todas as temperaturas, ocorrendo oscilações logo em seguida devido ao aquecimento e resfriamento do produto;
- e) O compensador apresentou em média uma variação volumétrica de 15,37%, tendo para temperatura de 80°C sua maior variação (20,7%). Em média seu teor de umidade teve uma diminuição de mais de 99%.

➤ Modelagem e simulação

- a) O método numérico de volumes finitos, usados para discretização das equações se mostraram eficientes, possibilitando uma excelente análise do processo;

- b) Os modelos empíricos de secagem, aquecimento e variação volumétrica do bloco cerâmico propostos, adequaram-se muito bem aos dados experimentais, com proporções de variância superior a 99,3%, 97,2% e 82,9%, respectivamente.
- c) A equação utilizada para descrever a secagem do compensador industrial se mostrou eficiente, concordando com os dados experimentais;
- d) Foi obtida uma excelente concordância com relação a perda de umidade e o aquecimento nos primeiros minutos. Uma pequena discrepância foi verificada para tempos maiores devido a influência da redução da umidade relativa.
- e) Foi verificado uma boa aproximação das curvas referentes aos dados experimentais e numéricos, viabilizando a utilização do programa computacional.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões futuras pode-se citar:

- a) Analisar o efeito da variação da umidade relativa dentro da estufa durante o processo de secagem de materiais cerâmicos;
- b) Analisar a cinética de secagem de materiais com dimensões diferentes e umidade relativa variável dentro da estufa durante o processo de secagem de materiais cerâmicos;
- c) Analisar a cinética de secagem de materiais cerâmicos para temperaturas variáveis durante o processo de secagem.

REFERÊNCIAS

ABCERAM (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA), Disponível em: <http://www.abceram.org.br> Acesso realizado em 27/02/2014.

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

ALMEIDA, G. S.; CAVALCANTE, F. J. N.; LIMA, A. G. B. Transporte de calor e massa em sólidos heterogêneos: um estudo teórico via análise concentrada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, V. 5, n. 1, p. 1 – 16, 2003.

ALMEIDA, G. S. **Simulação e experimentação da secagem de cerâmica vermelha em sistemas térmicos industriais**. 211 f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2009.

AMADO, J. D. S.; VILLAFRADES, P. Y. M.; TUTA, E. M. C.; Caracterización de arcillas y preparación de pastas cerámicas para la fabricación de tejas y ladrillos en la región de barichara, Santander. **DYNA**, Volumen 78, Número 167, p. 50-58, 2011.

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

ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, louças sanitárias e congêneres) – 2011. Disponível no site: <http://www.anfacer.org.br/>. Acesso realizado em 20/02/2014.

ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, louças sanitárias e congêneres) – 2014. Disponível no site: <http://www.anfacer.org.br/>
Acesso realizado em 20/02/2014.

ANFACER, (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, louças sanitárias e congêneres) – 2017. Disponível no site: <http://www.anfacer.org.br/>
Acesso realizado em 31/07/2017.

ANTONIETTI, M; HU, B; WANG, K.; WU, L.; YU, S.; TITIRICI, M. Engineering Carbon Materials from the Hydrothermal Carbonization Process of Biomass, 2010.

APICER (Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica), Promoção do empreendedorismo e da criação de empresas com maior valor acrescentado, 222 f, Dezembro de 2012.

APICER (Associação Portuguesa da Indústria Cerâmica), Manual de eficiência energética, sector cerâmico, 51 f, Junho de 2016.

AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; BELGUITH, A. Experimental analysis of heat and mass transfer during grape air drying. In: **International drying Symposium (IDS'96)**, Krakow. Proceedings, v.B, p.881-887, 1996.

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. Disponível em: www.abphe.org.br/congresso2003/doc/programa.doc. 2003.

CARMO, J. E. F. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos esferoidais: estudo de caso – secagem de lentilhas**. 139 f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, 2004.

CASTRO, A. L.; SANTOS, R. F. C.; GONÇALVES, K. M.; QUARCIONI, V. A.; Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica V.63**, p. 65-76, São Paulo, 2017.

COUTINHO, N. C.; VIEIRA, C. M. F.; Caracterização e incorporação de cinza de resíduo sólido urbano em cerâmica vermelha. **Cerâmica V.62**, ISSN 1678-4553, v. 62, n. 363, p. 249-255, São Paulo, 2016.

DALPASQUALE, V. A.; SPERANDIO, D. **Modelo de simulação de secagem de produtos agrícolas usando entalpia do ar constante**. Engenharia Agrícola, V.30, n. 4, p. 726-731, 2010.

DIAS, L. G. **Estudo do processo de secagem em estufa e por microondas de compósitos cerâmicos de argila e resíduos de esteatito**. 98 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Ciências Térmicas e dos Fluidos e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2013.

FARIAS, R. P. **Secagem de banana em estufa: Efeitos térmicos e geométricos**. 160f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia, 2011.

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

GORINI, A. P. F.; CORREA, A. R.; **Cerâmica para revestimentos**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 10, p. 201 – 252, setembro, 1999.

HOLANDA, P. R. H. **Secador para casulos do bicho-da-seda: Desenvolvimento, simulação e experimentação**. 181 f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande. Centro de Ciências e Tecnologia, Campina Grande – PB, 2007.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 657 f, ISBN 978-85-216-1584-2, Rio de Janeiro, LTC, 2008.

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

LIMA, A. G. B. **Estudo da secagem e dimensionamento de secador de casulos do bicho-da-seda**. 190 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, PB, 1995.

LIMA, A. G. B.; MATA, S. F. **Secagem de casulos do bicho-da-seda: Modelagem e simulação**. Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola/ Congresso Latino-americano de Engenharia Agrícola, Bauru - SP, 1996.

LIMA, A. G. B. **Fenômeno de Difusão em Sólidos Esferoidais Prolatos. Estudo de Caso: Secagem de banana**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 1999.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos. Editora S. A, 453f, 2004.

MEIRA, J. M. L. **Argilas: o que são, suas propriedades e classificações**. Comunicações técnicas, Janeiro de 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos 2016**, 99 f, Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, 2017.

MOTA NETO, J. **Controle simultâneo de temperatura e estequiometria aplicado em um secador vertical de revestimentos cerâmicos alimentado com gás natural**, 105 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008.

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

OLIVEIRA, G. H. H.; ARAGÃO, D. M. S.; OLIVEIRA, A. P. L. R.; SILVA, M. G.; GUSMÃO, A. C. A. Modelagem e propriedades termodinâmicas na secagem de morangos. **Brazilian Journal of Food Technology**. Campinas, v. 18, n. 4, p. 314-321, out/dez. 2015.

OLIVEIRA, B. F.; SILVA, M. A.; FREITAS, M. S. **Secagem de materiais cerâmicos. Trabalho da Disciplina de Materiais Cerâmicos**. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2010.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.; OLIVEIRA, R. A.; PARK, K. J. B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas – SP, março de 2007.

PAKOWSKI, Z.; BARTCZAK, Z.; STRUMILLO, C.; STENSTROM, S. Evaluation of equations approximating thermodynamic and transport properties of water, steam and air for use in CAD of drying processes. **Drying Technology**. v. 9, n. 3, p. 753-773. 1991.

PÉREZ, V. H. **Estudo do comportamento da temperatura da banana durante o processo de secagem**. 127f, Dissertação de Mestrado, Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1998.

ROCHA, R. D. C. da; ZOREL JR, H. E.; LANDO, T. Utilização de planejamento experimental no estudo para imobilização de lodo galvânico em cerâmica vermelha para minimização de impactos ambientais. **Cerâmica V. 63**, p. 1 – 10, 2017.

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

SANTOS JR, E. L.; LIED, E. B.; ACERGO, C. V.; FAQUIM, V.; FRARE, P. R.; MOREJON, C. F. M.; Avaliação de Impacto Ambiental da indústria Cerâmica Estrutural como Ferramenta da Produção Mais Limpa. **International Workshop Advances in cleaner Production**, São Paulo, 2017.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas), **Cerâmica vermelha: estudos de mercado** SEBRAE/ESPM, 2008.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas), **Cerâmica vermelha: panorama do mercado no Brasil** SEBRAE/ESPM, 2015.

SILVA, J. B. **Simulação e experimentação da secagem de tijolos cerâmicos vazados**. 199 f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2009.

SILVA, A. M. V. da. **Desenvolvimento experimental de um sistema de secagem solar para oleaginosas usadas na produção de biodiesel**. 124f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2012.

SILVA, L. D. da; SILVA, W. P. da; SILVA, C. M. D. P.S.; FARIAS, V. S. O. Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. **Cerâmica** **59**, 409 – 416, 2013.

SILVA, V. S. **Transferência de Calor e Massa em Materiais com Forma Complexa via Método da Análise Concentrada. Estudo de Caso: Secagem de Materiais Cerâmicos**. 198 f, Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2016.

SILVÉRIO, B. C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios concorrentes**. 101 f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2010.

SINGH, R. P.; HELDMAN, D. R. Introduction to food engineering. 4th ed. London: Academic Press, xxii, 841 p. (**Food Science and Technology, International Series**), 2009.

SOUSA, M. B. **Cinética de secagem e composição química da torta e do farelo de mamona em função das condições de secagem e armazenagem**. 145f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2007.

VÉRAS, A. O. M. **Secagem de pimenta dedo-de-moça (*capsicumbaccatum* var. *pendulum*) em secador convectivo horizontal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, 2010.

VIEIRA, C. M. F.; PINHEIRO, R. M. Avaliação de argilas caulínicas de Campos dos Goytacazes utilizadas para fabricação de cerâmica vermelha. **Cerâmica V. 57**, 319-323, 2011.

VIEIRA, C. M. F.; MORAIS, A. S. C.; MONTEIRO, S. N.; DELAQUA, G. C. G. Teste industrial de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de vidro de lâmpada fluorescente. **Cerâmica V. 62**, 376-385, 2016.

YESILAY, S.; ÇAKI, M.; ERGUN, H. **Usage of marble wastes in traditional artistic stoneware clay body.** Elsevier, *Ceramics International* 43, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 50°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela A.1 – Dados da cinética de secagem para 50°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,1723191	0,002685	7.259	0,172319	1	0	100
		7.241	0,169412	0,982863	5	98,28633
		7.230	0,167636	0,972391	10	97,23908
		7.215	0,165213	0,958110	15	95,81102
		7.201	0,162952	0,944782	20	94,47817
		7.184	0,160207	0,928597	25	92,85970
		7.169	0,157784	0,914316	30	91,43164
		7.140	0,153101	0,886707	40	88,67072
		7.108	0,147933	0,856242	50	85,62419
		7.075	0,142603	0,824825	60	82,48246
		7.047	0,138081	0,798167	70	79,81675
		7.018	0,133398	0,770558	80	77,05583
		6.996	0,129845	0,749613	90	74,96134
		6.920	0,117571	0,677258	120	67,72584
		6.853	0,106751	0,613472	150	61,34717
		6.787	0,096092	0,550637	180	55,06370
		6.731	0,087048	0,497323	210	49,73228
		6.677	0,078327	0,445913	240	44,59126
		6.637	0,071867	0,407831	270	40,78310
		6.555	0,058624	0,329764	330	32,97637
		6.497	0,049257	0,274545	390	27,45454
		6.452	0,041990	0,231704	450	23,17036
		6.394	0,032623	0,176485	510	17,64852
		6.384	0,031008	0,166965	570	16,69648

Continuação da cinética de secagem 50°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.368	0,028424	0,151732	630	15,17322
6.350	0,025517	0,134595	690	13,45955
6.340	0,023902	0,125075	750	12,50751
6.328	0,021964	0,113651	810	11,36506
6.323	0,021156	0,108890	870	10,88904
6.318	0,020349	0,104130	930	10,41302
6.312	0,019380	0,098418	990	9,841795
6.305	0,018249	0,091754	1050	9,175367
6.303	0,017926	0,089850	1110	8,984959
6.300	0,017442	0,086993	1170	8,699347
6.290	0,015827	0,077473	2610	7,747306
6.192	0	-0,01583	4050	-1,58269

Tabela A.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 50°C.

t (min)	To	Te	T (t)	T*	%
0	31,5	50,5	31,5	0	0
5			33,5	0,105263	10,52632
10			33,6	0,110526	11,05263
15			34,7	0,168421	16,84211
20			34,2	0,142105	14,21053
25			36,0	0,236842	23,68421
30			35,7	0,221053	22,10526
40			37,7	0,326316	32,63158
50			38,4	0,363158	36,31579
60			40,3	0,463158	46,31579
70			38,8	0,384211	38,42105
80			39,6	0,426316	42,63158
90			40,3	0,463158	46,31579
120			42,5	0,578947	57,89474
150			44,3	0,673684	67,36842
180			45,7	0,747368	74,73684
210			46,5	0,789474	78,94737
240			49,5	0,947368	94,73684
270			48,2	0,878947	87,89474
330			47,3	0,831579	83,15789
390			48,3	0,884211	88,42105
450			49,0	0,921053	92,10526
510			49,2	0,931579	93,15789
570			47,6	0,847368	84,73684
630			49,3	0,936842	93,68421
690			47,8	0,857895	85,78947
750			49,5	0,947368	94,73684
810			47,2	0,826316	82,63158
870			49,0	0,921053	92,10526
930			49,0	0,921053	92,10526

Continuação da variação da temperatura para 50°C.

t (min)	T (t)	T*	%
990	49,3	0,936842	93,68421
1.050	48,8	0,910526	91,05263
1.110	48,4	0,889474	88,94737
1.170	49,6	0,952632	95,26316
2.610	50,5	1	100
4.050	92,5	3,210526	321,0526

Tabela A.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 50°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	14,32	15,21	33,03	73,08	75,90	37,89	24,65	30,92	62,90
5	14,59	15,03	33,11	73,04	76,20	37,79	24,77	31,06	62,21
10	14,49	15,41	33,14	72,91	76,02	37,42	25,07	31,14	62,55
15	14,36	15,77	33,18	72,86	76,21	37,09	25,03	30,89	61,76
20	14,91	15,60	33,01	72,10	76,12	36,67	25,31	30,81	61,73
25	14,83	15,10	34,33	72,51	76,17	36,80	24,88	30,92	61,17
30	14,66	16,04	34,33	72,53	76,94	36,38	25,60	30,63	61,33
40	14,61	15,70	34,10	72,47	75,93	36,30	25,68	30,43	60,92
50	14,46	15,27	33,93	72,30	76,86	36,33	24,77	30,22	60,66
60	13,79	15,18	33,99	72,61	75,93	36,14	24,38	30,19	60,41
70	14,78	15,40	33,65	72,33	75,36	36,19	24,27	29,64	60,20
80	14,80	15,41	33,88	72,28	76,05	36,22	24,50	29,80	60,27
90	14,66	15,98	33,47	72,19	74,86	36,30	24,64	29,92	59,62
120	14,61	15,10	33,14	72,00	74,98	36,26	24,27	29,77	60,22
150	14,70	15,49	33,42	71,77	74,47	36,23	24,32	29,82	59,86
180	14,53	15,16	32,99	71,27	73,82	36,25	23,72	29,59	60,18
210	14,44	15,43	33,05	71,07	73,65	36,23	23,60	29,66	60,39
240	13,88	15,43	33,07	70,49	73,82	35,94	24,67	29,69	60,23
270	13,59	15,00	33,08	70,68	73,69	35,88	24,68	29,71	60,58
330	14,55	15,35	32,97	70,37	72,93	36,25	23,88	29,68	60,25
390	14,15	14,62	32,97	70,14	72,62	36,09	24,49	29,87	59,79
450	14,20	15,38	32,91	70,06	73,46	36,03	23,94	29,99	60,03
510	14,06	15,67	32,49	70,06	72,61	35,33	23,33	29,73	60,11
570	14,03	15,31	32,99	70,15	72,48	35,85	24,40	30,03	60,68
630	14,19	15,86	33,03	70,00	73,30	36,46	24,80	30,08	60,73
690	13,95	15,32	33,18	69,97	73,34	36,12	24,04	29,83	60,43
750	14,09	15,15	32,85	70,45	73,22	36,50	24,50	30,02	60,80
810	13,63	15,03	33,18	70,17	73,21	36,34	23,95	29,60	59,89
870	14,01	15,32	33,16	70,13	73,41	35,78	24,00	30,07	60,14
930	13,86	15,38	33,38	70,55	72,54	36,18	24,77	29,98	60,25

Continuação da variação volumétrica interna para 50°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
990	14,12	14,76	33,28	70,00	73,56	35,95	25,37	29,84	59,77
1.050	13,03	15,35	33,23	69,90	72,75	36,35	24,77	30,08	60,25
1.110	13,69	15,78	33,07	70,18	72,55	36,20	24,38	30,17	60,56
1.170	14,03	15,54	33,00	70,11	73,04	36,02	24,44	29,81	60,38
2.610	13,68	15,01	33,18	70,16	73,37	36,18	24,28	30,10	60,78
4.050	13,50	15,92	32,96	70,17	73,21	36,47	24,83	29,85	60,22

Tabela A.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 50°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	143	303	199	3.956.538	3.956.538	1	100
5	141	303	199		3.835.745	0,969470	96,94700
10	141	302	199		3.782.782	0,956084	95,60838
15	141	302	199		3.766.867	0,952061	95,20613
20	135	301	198		3.398.988	0,859081	85,90812
25	140	301	198		3.688.530	0,932262	93,22620
30	140	300	198		3.554.607	0,898413	89,84134
40	138	300	196		3.472.629	0,877694	87,76937
50	138	299	195		3.479.081	0,879324	87,93245
60	138	298	193		3.466.388	0,876116	87,61164
70	138	298	193		3.477.922	0,879032	87,90315
80	138	296	193		3.388.256	0,856369	85,63688
90	138	295	193		3.367.293	0,851070	85,10704
120	137	294	192		3.358.618	0,848878	84,88779
150	137	293	191		3.295.030	0,832806	83,28062
180	137	292	190		3.343.451	0,845045	84,50445
210	137	291	190		3.308.439	0,836195	83,61954
240	136	290	190		3.224.280	0,814924	81,49244
270	136	290	190		3.257.922	0,823427	82,34273
330	137	289	190		3.294.636	0,832707	83,27068
390	137	289	189		3.339.934	0,844156	84,41555
450	136	289	189		3.223.061	0,814616	81,46164
510	138	289	190		3.399.798	0,859286	85,92860
570	137	289	190		3.310.536	0,836725	83,67253
630	137	289	189		3.207.119	0,810587	81,05870
690	137	289	189		3.277.829	0,828459	82,84588
750	137	289	189		3.265.651	0,825381	82,53809
810	136	289	190		3.269.503	0,826354	82,63543
870	136	289	190		3.239.836	0,818856	81,88563
930	136	289	190		3.213.620	0,812230	81,22303

Continuação da variação volumétrica externa para 50°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
990	136	290	190	3.265.961	0,825459	82,54592
1.050	136	290	190	3.268.303	0,826051	82,60511
1.110	136	290	190	3.239.299	0,818720	81,87204
1.170	136	289	190	3.224.142	0,814890	81,48896
2.610	136	289	190	3.249.272	0,821241	82,12412
4.050	137	289	189	3.218.670	0,813506	81,35065

APÊNDICE B

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 60°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela B.1 – Dados da cinética de secagem para 60°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,173163	0,001834	7.344	0,173163	1	0	100
		7.326	0,170288	0,983217	5	98,32171
		7.309	0,167572	0,967367	10	96,73666
		7.295	0,165335	0,954313	15	95,43132
		7.283	0,163419	0,943125	20	94,31247
		7.268	0,161022	0,929139	25	92,91389
		7.254	0,158786	0,916086	30	91,60856
		7.218	0,153035	0,882520	40	88,25198
		7.183	0,147444	0,849886	50	84,98864
		7.149	0,142013	0,818185	60	81,81854
		7.119	0,137220	0,790214	70	79,02139
		7.087	0,132109	0,760378	80	76,03776
		7.050	0,126198	0,725879	90	72,58795
		6.943	0,109105	0,626115	120	62,61145
		6.852	0,094569	0,541268	150	54,12677
		6.768	0,081150	0,462948	180	46,29475
		6.697	0,069808	0,396748	210	39,67484
		6.641	0,060863	0,344535	240	34,45349
		6.592	0,053035	0,298848	270	29,88482
		6.517	0,041054	0,228919	330	22,89195
		6.469	0,033387	0,184165	390	18,41651
		6.434	0,027796	0,151532	450	15,15317
		6.411	0,024121	0,130087	510	13,00869
		6.390	0,020767	0,110507	570	11,05069

Continuação da cinética de secagem para 60°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.378	0,018850	0,099318	630	9,931829
6.368	0,017252	0,089994	690	8,999446
6.362	0,016294	0,084400	750	8,440016
6.355	0,015176	0,077873	810	7,787348
6.350	0,014377	0,073212	870	7,321157
6.345	0,013578	0,068550	930	6,854966
6.345	0,013578	0,06855	990	6,854966
6.340	0,012780	0,063888	1.050	6,388774
6.327	0,010703	0,051767	2.490	5,176677
6.260	0	-0,0107	3.930	-1,07029

Tabela B.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 60°C.

t (min)	To	Te	T (t)	T*	%
0	32,0	58,0	32,0	0	0
5			34,8	0,107692	10,76923
10			33,6	0,061538	6,153846
15			33,8	0,069231	6,923077
20			35,1	0,119231	11,92308
25			35,6	0,138462	13,84615
30			36,0	0,153846	15,38462
40			38,8	0,261538	26,15385
50			39,2	0,276923	27,69231
60			42,0	0,384615	38,46154
70			42,0	0,384615	38,46154
80			42,8	0,415385	41,53846
90			43,5	0,442308	44,23077
120			47,4	0,592308	59,23077
150			51,1	0,734615	73,46154
180			53,0	0,807692	80,76923
210			55,3	0,896154	89,61538
240			55,3	0,896154	89,61538
270			54,7	0,873077	87,30769
330			56,8	0,953846	95,38462
390			53,9	0,842308	84,23077
450			56,5	0,942308	94,23077
510			55,3	0,896154	89,61538
570			55,8	0,915385	91,53846
630			57,6	0,984615	98,46154
690			57,6	0,984615	98,46154
750			57,0	0,961538	96,15385
810			57,0	0,961538	96,15385
870			57,6	0,984615	98,46154
930			55,5	0,903846	90,38462

Continuação da variação da temperatura para 60°C.

t (min)	T (t)	T*	%
990	57,3	0,973077	97,30769
1.050	55,3	0,896154	89,61538
2.490	58,0	1	100
3.930	90,3	2,242308	224,2308

Tabela B.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 60°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	15,77	15,20	33,75	72,94	78,00	37,26	28,91	30,58	64,23
5	16,40	14,61	34,08	72,53	77,85	36,94	28,55	29,14	63,98
10	16,39	14,75	33,85	72,69	77,64	37,03	27,92	30,05	63,28
15	16,36	15,25	33,92	72,68	77,37	36,62	28,40	29,43	63,31
20	15,58	14,76	33,88	72,54	77,57	35,85	28,57	30,09	63,19
25	15,99	15,06	33,05	72,03	77,43	36,08	28,18	30,09	63,01
30	15,60	15,32	33,71	71,94	77,50	35,86	28,29	30,04	62,80
40	15,62	14,85	33,44	72,07	77,21	35,87	28,07	29,75	62,22
50	15,57	14,84	33,46	71,68	77,08	35,58	27,99	29,81	61,81
60	15,76	14,85	33,34	71,39	76,69	35,45	27,75	29,62	61,59
70	15,33	14,74	33,25	71,35	76,53	35,49	27,65	28,28	61,51
80	15,34	14,61	33,12	70,93	76,12	35,37	27,51	29,36	61,64
90	15,23	14,90	33,05	70,80	76,05	35,41	27,71	29,01	61,62
120	15,26	15,04	32,75	70,52	75,27	35,63	27,44	29,25	61,56
150	15,00	14,78	32,65	70,58	75,34	35,61	27,26	28,98	61,07
180	15,37	15,04	32,96	70,53	75,34	35,97	27,45	28,84	61,59
210	15,66	14,69	33,01	69,98	75,24	35,60	27,39	28,56	61,72
240	15,39	14,78	33,20	70,09	75,11	35,57	27,67	29,40	61,75
270	15,70	13,97	33,06	70,13	75,06	36,08	27,61	29,44	61,72
330	15,65	14,20	33,08	69,76	75,19	36,13	26,66	29,15	61,66
390	15,75	14,58	33,04	70,25	75,24	35,25	27,68	29,34	61,88
450	15,66	14,64	33,14	70,24	75,01	35,06	27,74	29,31	61,78
510	15,28	14,92	32,96	70,27	75,19	35,36	27,66	29,57	61,34
570	15,34	14,06	33,01	70,81	75,23	34,70	26,94	29,04	61,77
630	14,27	14,15	32,77	70,68	75,00	35,72	27,58	29,49	61,65
690	15,76	14,34	32,98	70,60	75,02	35,32	27,62	20,03	61,54
750	14,68	14,02	32,86	70,78	75,08	35,29	25,81	28,51	61,68
810	15,53	14,64	33,12	70,62	75,00	35,37	27,47	27,96	61,50
870	15,66	14,16	33,16	70,71	75,11	35,34	27,66	29,40	61,69
930	15,73	14,57	33,18	70,16	74,94	35,28	27,72	29,39	61,77

Continuação da variação volumétrica interna para 60°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
990	15,78	14,65	32,91	70,42	75,21	35,69	27,71	28,66	61,70
1.050	15,67	14,62	32,77	69,99	75,17	35,50	27,45	28,60	61,60
2.490	15,39	14,16	32,72	70,50	74,89	35,20	27,55	28,86	61,24
3.930	15,72	14,51	32,98	70,53	75,11	35,62	27,72	29,41	61,60

Tabela B.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 60°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	140	302	200	3.538.313	3.538.313	1	100
5	138	302	201		3.513.623	0,99302	99,30223
10	138	301	200		3.475.734	0,98231	98,23138
15	138	301	201		3.461.315	0,97824	97,82388
20	138	301	200		3.504.560	0,99046	99,04608
25	138	300	199		3.483.872	0,98461	98,46139
30	137	300	199		3.391.651	0,95855	95,85504
40	137	299	199		3.428.830	0,96906	96,90580
50	137	298	196		3.377.070	0,95443	95,44293
60	137	297	196		3.382.737	0,95603	95,60311
70	136	296	195		3.325.000	0,93971	93,97135
80	136	295	194		3.312.407	0,93615	93,61543
90	136	295	193		3.281.233	0,92734	92,73439
120	136	292	193		3.231.325	0,91324	91,32389
150	136	291	192		3.223.868	0,91113	91,11314
180	136	290	192		3.148.104	0,88972	88,97188
210	135	290	191		3.126.156	0,88352	88,35159
240	135	290	191		3.101.205	0,87646	87,64643
270	135	290	191		3.152.305	0,89091	89,09063
330	136	291	191		3.252.598	0,91925	91,92512
390	135	290	191		3.113.443	0,87992	87,99229
450	136	290	191		3.172.413	0,89659	89,65891
510	135	290	190		3.082.268	0,87111	87,11123
570	135	289	191		3.155.228	0,89173	89,17322
630	135	290	190		3.151.256	0,89061	89,06098
690	135	290	190		3.223.782	0,91111	91,11070
750	135	290	190		3.213.811	0,90829	90,82891
810	135	290	190		3.111.283	0,87931	87,93126
870	135	290	190		3.115.934	0,88063	88,06271
930	135	289	190		3.076.864	0,86959	86,95851

Continuação da variação volumétrica externa para 60°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
990	134	289	190	3.009.934	0,85067	85,06692
1.050	135	289	190	3.099.442	0,87597	87,59660
2.490	135	289	190	3.136.061	0,88632	88,63154
3.930	135	289	190	3.066.667	0,86670	86,67032

APÊNDICE C

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 70°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela C.1 – Dados da cinética de secagem para 70°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,170186	0,001189	7.316	0,170186	1	0	100
		7.300	0,167626	0,984857	5	98,48566
		7.287	0,165547	0,972553	10	97,25525
		7.270	0,162828	0,956463	15	95,64627
		7.258	0,160909	0,945105	20	94,51051
		7.241	0,158189	0,929015	25	92,90152
		7.223	0,155310	0,911979	30	91,19788
		7.182	0,148752	0,873174	40	87,31738
		7.136	0,141395	0,829636	50	82,96365
		7.112	0,137556	0,806921	60	80,69213
		7.077	0,131958	0,773795	70	77,37951
		7.040	0,126040	0,738776	80	73,87759
		7.003	0,120122	0,703757	90	70,37568
		6.897	0,103167	0,603432	120	60,34316
		6.795	0,086852	0,506892	150	50,68922
		6.713	0,073736	0,429282	180	42,92822
		6.643	0,062540	0,363030	210	36,30297
		6.590	0,054063	0,312867	240	31,28671
		6.540	0,046065	0,265544	270	26,55439
		6.468	0,034549	0,197398	330	19,73985
		6.420	0,026871	0,151968	390	15,19682
		6.385	0,021273	0,118842	450	11,88420
		6.363	0,017754	0,098020	510	9,801976
		6.345	0,014875	0,080983	570	8,098341

Continuação da cinética de secagem para 70°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.335	0,013276	0,071519	630	7,151877
6.327	0,011996	0,063947	690	6,394706
6.321	0,011036	0,058268	750	5,826827
6.316	0,010237	0,053536	810	5,353595
6.311	0,009437	0,048804	870	4,880363
6.311	0,009437	0,048804	930	4,880363
6.307	0,008797	0,045018	990	4,501777
6.296	0,007038	0,034607	2.430	3,460667
6.252	0	-0,00704	3.870	-0,70377

Tabela C.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 70°C.

t (min)	To	Te	T (t)	T*	%
0	29,8	64,7	29,8	0	0
5			35,7	0,169054	16,90544
10			36,7	0,197708	19,77077
15			38,6	0,252149	25,21490
20			37,6	0,223496	22,34957
25			40,0	0,292264	29,22636
30			40,3	0,300860	30,08596
40			43,2	0,383954	38,39542
50			45,2	0,441261	44,12607
60			47,8	0,515759	51,57593
70			48,7	0,541547	54,15473
80			49,4	0,561605	56,16046
90			50,9	0,604585	60,45845
120			56,7	0,770774	77,07736
150			58,5	0,822350	82,23496
180			60,1	0,868195	86,81948
210			62,7	0,942693	94,26934
240			62,2	0,928367	92,83668
270			62,2	0,928367	92,83668
330			63,2	0,957020	95,70201
390			64,3	0,988539	98,85387
450			64,1	0,982808	98,28080
510			64,5	0,994269	99,42693
570			66,0	1,037249	103,7249
630			64,5	0,994269	99,42693
690			67,0	1,065903	106,5903
750			64,7	1	100
810			65,6	1,025788	102,5788
870			59,9	0,862464	86,24642
930			63,5	0,965616	96,56160

Continuação da variação da temperatura para 70°C.

t (min)	T (t)	T*	%
990	60,5	0,879656	87,96562
2.430	64,7	1	100
3.870	89,5	1,710602	171,0602

Tabela C.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 70°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	15,40	33,41	15,97	74,00	75,61	36,75	26,54	31,04	62,84
5	15,71	33,95	16,05	73,86	75,93	36,76	26,43	31,16	62,85
10	15,85	33,90	16,12	74,09	76,18	36,72	26,86	31,60	63,03
15	15,73	33,99	16,30	74,12	76,43	35,83	26,93	31,58	62,74
20	16,51	33,55	16,43	74,23	76,15	36,17	27,10	31,64	62,19
25	16,28	33,93	16,72	74,41	76,72	36,39	27,12	31,63	62,27
30	15,99	33,93	16,87	74,39	76,49	36,33	27,26	31,53	62,21
40	16,29	33,85	17,18	74,28	76,49	35,94	26,87	30,95	61,68
50	16,71	33,29	17,13	74,27	76,28	35,43	26,66	31,11	60,92
60	16,49	33,24	17,71	73,98	76,56	35,47	26,09	30,47	60,00
70	16,47	32,84	17,99	73,88	75,90	35,51	26,33	30,78	60,77
80	16,83	32,96	18,43	73,42	75,36	35,60	26,02	30,59	60,80
90	16,33	32,82	18,56	73,01	75,30	35,33	25,88	30,45	61,06
120	15,89	32,75	18,06	72,28	74,45	35,33	25,71	30,12	60,38
150	16,09	32,76	17,13	71,62	74,07	35,46	25,98	29,96	60,42
180	15,74	32,84	16,40	71,43	74,00	35,60	26,12	29,46	60,62
210	15,54	32,51	15,96	71,20	73,28	35,63	26,16	29,98	60,97
240	15,65	32,38	15,91	70,82	73,33	35,34	26,27	30,22	60,80
270	15,58	32,63	16,40	71,26	73,59	35,65	26,27	30,41	61,07
330	15,88	32,73	16,01	71,08	73,21	35,55	26,34	30,32	60,96
390	15,61	32,70	16,27	71,34	73,09	35,68	25,78	30,43	60,90
450	15,80	32,78	16,27	71,32	73,64	35,74	26,22	30,49	60,90
510	15,62	32,37	16,12	71,45	72,99	35,69	26,21	30,24	60,92
570	15,71	32,73	16,17	71,33	72,96	35,63	25,94	30,35	60,78
630	15,64	32,65	15,96	70,91	73,34	35,49	26,33	30,48	61,10
690	15,45	32,71	16,08	71,31	73,18	35,71	26,32	30,33	61,00
750	15,49	32,72	16,22	71,26	73,19	35,71	26,19	30,48	61,13
810	15,76	32,09	16,55	71,31	73,22	35,55	26,08	30,39	61,05
870	15,66	32,76	16,47	70,92	73,48	35,79	25,97	30,54	61,04
930	15,49	32,62	16,47	70,95	73,13	35,65	26,18	30,39	60,79

Continuação da variação volumétrica interna para 70°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
990	15,57	32,72	16,29	71,32	73,33	35,78	25,85	30,45	61,04
2.430	14,81	32,55	15,87	71,22	73,19	35,72	26,05	29,93	60,35
3.870	13,87	31,77	15,75	72,22	72,77	34,03	27,25	29,16	60,80

Tabela C.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 70°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	142	300	200	3.682.082	3.682.082	1	100
5	142	300	200		3.645.042	0,989941	98,99405
10	142	300	199		3.587.621	0,974346	97,43458
15	141	299	199		3.494.977	0,949185	94,91848
20	141	298	198		3.436.019	0,933173	93,31728
25	141	299	193		3.316.590	0,900738	90,07377
30	140	298	198		3.315.567	0,900460	90,04598
40	140	297	197		3.276.713	0,889907	88,99075
50	139	296	196		3.218.327	0,874051	87,40508
60	140	294	195		3.194.946	0,867701	86,77009
70	139	293	194		3.096.307	0,840912	84,09119
80	139	293	194		3.087.933	0,838638	83,86378
90	139	292	193		3.074.306	0,834937	83,49367
120	138	291	192		3.082.199	0,837080	83,70804
150	138	289	191		3.099.925	0,841894	84,18945
180	138	288	191		3.137.398	0,852072	85,20717
210	137	288	192		3.164.184	0,859346	85,93464
240	137	288	191		3.164.410	0,859408	85,94076
270	137	288	192		3.106.740	0,843745	84,37453
330	137	288	192		3.143.942	0,853849	85,38488
390	137	288	192		3.138.342	0,852328	85,23281
450	137	288	191		3.087.114	0,838415	83,84153
510	137	288	191		3.135.075	0,851441	85,14407
570	137	288	191		3.128.578	0,849676	84,96763
630	137	288	191		3.138.815	0,852456	85,24564
690	137	288	191		3.122.495	0,848024	84,80243
750	137	288	191		3.113.053	0,845460	84,54599
810	137	288	191		3.112.631	0,845345	84,53454
870	137	288	191		3.095.507	0,840695	84,06947
930	137	288	191		3.112.870	0,845410	84,54102

Continuação da variação volumétrica externa para 70°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
990	137	288	191	3.109.589	0,844519	84,45191
2.430	137	289	191	3.199.628	0,868972	86,89724
3.870	136	287	190	3.121.759	0,847824	84,78243

APÊNDICE D

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 80°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela D.1 – Dados da cinética de secagem para 80°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,172723	0,000826	7.326	0,172723	1	0	100
		7.302	0,168881	0,977650	5	97,76504
		7.290	0,166960	0,966476	10	96,64755
		7.273	0,164239	0,950645	15	95,06446
		7.255	0,161357	0,933882	20	93,38823
		7.241	0,159116	0,920845	25	92,08450
		7.224	0,156395	0,905014	30	90,50141
		7.183	0,149832	0,866833	40	86,68334
		7.134	0,141988	0,821203	50	82,12029
		7.093	0,135425	0,783022	60	78,30223
		7.046	0,127901	0,739254	70	73,92543
		7.001	0,120698	0,697349	80	69,73487
		6.964	0,114775	0,662893	90	66,28930
		6.828	0,093005	0,536245	120	53,62451
		6.721	0,075876	0,436603	150	43,66030
		6.632	0,061630	0,353723	180	35,37231
		6.563	0,050584	0,289468	210	28,94679
		6.505	0,041300	0,235456	240	23,54563
		6.452	0,032816	0,186101	270	18,61008
		6.403	0,024972	0,140470	330	14,04703
		6.361	0,018249	0,101358	390	10,13585
		6.338	0,014567	0,079940	450	7,994006
		6.323	0,012166	0,065972	510	6,597154
		6.309	0,009925	0,052934	570	5,293425

Continuação da cinética de secagem para 80°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.304	0,009124	0,048278	630	4,827808
6.297	0,008004	0,041759	690	4,175943
6.295	0,007684	0,039897	750	3,989696
6.292	0,007203	0,037103	810	3,710326
6.288	0,006563	0,033378	870	3,337832
6.288	0,006563	0,033378	930	3,337832
6.277	0,004802	0,023135	2.370	2,313474
6.247	0	-0,0048	3.810	-0,48023

Tabela D.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 80°C.

t (min)	To	Te	T (t)	T*	%
0	30,5	68,6	30,5	0	0
5			35,3	0,125984	12,59843
10			34,6	0,107612	10,76115
15			35,3	0,125984	12,59843
20			35,2	0,123360	12,33596
25			35,3	0,125984	12,59843
30			35,3	0,125984	12,59843
40			37,2	0,175853	17,58530
50			40,0	0,249344	24,93438
60			41,1	0,278215	27,82152
70			44,4	0,364829	36,48294
80			44,7	0,372703	37,27034
90			45,0	0,380577	38,05774
120			54,7	0,635171	63,51706
150			54,3	0,624672	62,46719
180			60,8	0,795276	79,52756
210			61,7	0,818898	81,88976
240			67,8	0,979003	97,90026
270			65,5	0,918635	91,86352
330			67,0	0,958005	95,80052
390			69,8	1,031496	103,1496
450			70,1	1,039370	103,9370
510			71,0	1,062992	106,2992
570			70,8	1,057743	105,7743
630			70,4	1,047244	104,7244
690			73,1	1,118110	111,8110
750			73,1	1,118110	111,8110
810			72,0	1,089239	108,9239
870			71,6	1,078740	107,8740
930			71,6	1,078740	107,8740

Continuação da variação da temperatura para 80°C.

t (min)	T (t)	T*	%
2.370	68,6	1	100
3.810	91,0	1,587927	158,7927

Tabela D.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 80°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	15,19	15,52	33,91	74,38	74,91	35,89	26,54	31,57	63,10
5	15,48	16,23	34,12	74,46	75,29	36,34	27,03	31,53	62,76
10	15,27	15,97	34,17	74,49	75,25	35,50	27,10	31,37	63,42
15	15,57	16,49	33,95	74,33	75,01	36,30	27,22	31,53	63,32
20	15,33	16,60	34,18	74,14	74,72	36,04	27,31	31,36	62,88
25	15,30	16,71	34,28	73,88	74,08	36,42	27,43	31,41	62,78
30	15,39	16,88	34,32	73,59	74,12	36,30	27,20	31,26	62,37
40	15,25	16,86	34,43	72,93	73,66	36,00	26,95	30,97	62,05
50	15,38	17,04	34,42	72,46	73,28	35,64	26,56	30,69	61,54
60	15,12	17,13	34,21	72,19	72,96	35,45	26,72	30,51	61,58
70	15,39	16,91	34,06	72,01	72,61	35,30	26,48	30,32	61,49
80	15,26	16,70	33,93	71,86	72,46	35,54	26,19	30,17	61,54
90	15,42	16,47	33,82	71,78	72,31	35,20	26,34	30,16	61,30
120	15,42	16,01	33,42	71,74	72,08	34,72	26,01	30,06	61,48
150	15,37	15,76	33,34	71,73	71,95	35,03	26,01	30,06	61,54
180	14,98	15,83	33,40	71,78	71,95	35,17	26,07	30,13	61,56
210	15,07	15,78	33,32	71,75	71,95	34,82	26,04	29,96	61,39
240	15,25	15,71	33,29	71,67	71,92	35,17	26,05	30,05	61,49
270	15,05	15,77	33,34	71,74	71,94	35,45	26,06	30,06	61,54
330	15,05	15,78	33,32	71,70	71,94	35,41	26,04	30,04	61,55
390	15,04	15,67	33,20	71,71	71,83	35,22	26,01	29,71	61,55
450	15,00	15,70	33,29	71,69	71,89	35,17	26,03	30,17	61,55
510	15,01	15,60	33,20	71,65	71,89	35,16	26,04	30,05	61,32
570	14,57	15,77	33,25	71,72	71,90	35,12	26,04	30,12	61,47
630	15,08	15,68	33,18	71,68	71,89	35,26	25,19	30,14	61,40
690	14,92	15,38	33,14	71,71	71,84	35,27	26,04	30,20	61,26
750	14,91	15,73	33,22	71,77	71,71	35,26	26,10	30,18	61,33
810	15,00	15,67	33,33	71,69	72,00	35,41	26,05	30,08	61,38
870	15,21	15,4	33,16	71,48	71,8	35,13	25,98	30,04	61,15
930	15,13	15,27	33,04	71,64	71,85	35,58	25,77	30,09	61,24

Continuação da variação volumétrica interna para 80°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
2.370	15,38	14,98	31,86	71,51	72,15	35,55	25,66	29,33	59,97
3.810	14,49	14,78	33,15	71,21	71,37	35,05	25,58	29,91	59,49

Tabela D.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 80°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	144	300	200	3.842.866	3.842.866	1	100
5	143	300	200		3.676.452	0,956695	95,66953
10	143	299	199		3.642.857	0,947953	94,79531
15	142	298	199		3.505.074	0,912099	91,20990
20	142	298	198		3.471.570	0,903380	90,33804
25	142	298	198		3.473.998	0,904012	90,40122
30	141	297	198		3.390.909	0,882391	88,23908
40	140	296	196		3.273.708	0,851892	85,18923
50	140	295	195		3.238.351	0,842692	84,26917
60	139	293	194		3.110.693	0,809472	80,94723
70	138	292	193		3.033.965	0,789506	78,95058
80	139	292	193		3.128.572	0,814125	81,41247
90	138	291	192		3.036.515	0,790169	79,01693
120	138	289	192		3.063.411	0,797168	79,71684
150	138	288	191		3.018.423	0,785461	78,54614
180	138	287	191		2.984.595	0,776659	77,66587
210	138	287	191		3.002.045	0,781200	78,11995
240	138	287	191		2.999.230	0,780467	78,04671
270	138	287	191		2.987.220	0,777342	77,73417
330	138	287	191		2.989.915	0,778043	77,80429
390	138	287	191		3.015.146	0,784609	78,46088
450	138	287	191		3.003.788	0,781653	78,16532
510	138	287	191		3.018.896	0,785584	78,55845
570	138	287	191		3.008.403	0,782854	78,28540
630	138	287	191		3.031.396	0,788837	78,88374
690	138	287	191		3.036.272	0,790106	79,01061
750	138	287	191		3.005.948	0,782215	78,22151
810	138	287	191		2.998.093	0,780171	78,01711
870	138	287	191		3.043.432	0,791969	79,19693
930	138	287	191		3.049.143	0,793456	79,34555

Continuação da variação volumétrica externa para 80°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
2.370	137	288	190	3.057.326	0,795585	79,55850
3.810	139	288	190	3.192.293	0,830706	83,07063

APÊNDICE E

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 90°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela E.1 – Dados da cinética de secagem para 90°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,1679	0,000511	7.262	0,167900	1	0	100
		7.241	0,164522	0,979824	5	97,98236
		7.228	0,162432	0,967333	10	96,73334
		7.214	0,160180	0,953882	15	95,38825
		7.197	0,157446	0,937549	20	93,75492
		7.185	0,155516	0,926020	25	92,60198
		7.170	0,153104	0,911608	30	91,16081
		7.130	0,146671	0,873177	40	87,31769
		7.088	0,139916	0,832824	50	83,28241
		7.033	0,131071	0,779981	60	77,99811
		6.995	0,124960	0,743471	70	74,34714
		6.956	0,118688	0,706001	80	70,60009
		6.921	0,113059	0,672374	90	67,23736
		6.786	0,091348	0,542668	120	54,26681
		6.673	0,073175	0,434100	150	43,40998
		6.585	0,059022	0,349551	180	34,95511
		6.516	0,047925	0,283257	210	28,32572
		6.461	0,039080	0,230414	240	23,04142
		6.419	0,032326	0,190061	270	19,00614
		6.354	0,021872	0,127611	330	12,76106
		6.316	0,015761	0,091101	390	9,110092
		6.293	0,012062	0,069003	450	6,900295
		6.278	0,009649	0,054591	510	5,459123
		6.267	0,007880	0,044023	570	4,402264

Continuação da cinética de secagem para 90°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.261	0,006915	0,038258	630	3,825795
6.255	0,005950	0,032493	690	3,249326
6.255	0,005950	0,032493	750	3,249326
6.250	0,005146	0,027689	810	2,768936
6.248	0,004825	0,025768	870	2,576779
6.247	0,004664	0,024807	930	2,480701
6.237	0,003056	0,015199	2.370	1,519920
6.218	0	-0,00306	3.810	-0,30556

Tabela E.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 90°C.

t (min)	To	Te	T (t)	T*	%
0	27,6	76,2	27,6	0	0
5			32,3	0,096708	9,670782
10			33,1	0,113169	11,31687
15			33,8	0,127572	12,75720
20			34,6	0,144033	14,40329
25			33,7	0,125514	12,55144
30			35,4	0,160494	16,04938
40			39,2	0,238683	23,86831
50			40,7	0,269547	26,95473
60			40,5	0,265432	26,54321
70			44,6	0,349794	34,97942
80			44,6	0,349794	34,97942
90			43,2	0,320988	32,09877
120			49,4	0,448560	44,85597
150			61,7	0,701646	70,16461
180			65,5	0,779835	77,98354
210			67,4	0,818930	81,89300
240			70,2	0,876543	87,65432
270			72,1	0,915638	91,56379
330			77,0	1,016461	101,6461
390			79,8	1,074074	107,4074
450			79,0	1,057613	105,7613
510			78,7	1,051440	105,1440
570			81,2	1,102881	110,2881
630			78,6	1,049383	104,9383
690			81,5	1,109053	110,9053
750			80,6	1,090535	109,0535
810			81,2	1,102881	110,2881
870			80,6	1,090535	109,0535
930			78,1	1,039095	103,9095

Continuação da variação da temperatura para 90°.

t (min)	T (t)	T*	%
2.370	76,2	1	100
3.810	89,2	1,26749	126,749

Tabela E.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 90°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	15,27	15,57	34,82	73,94	75,13	36,81	26,17	30,77	63,19
5	14,91	15,75	34,62	74,08	75,71	37,26	26,71	30,98	62,95
10	14,85	15,76	34,82	73,75	75,68	37,18	26,85	31,14	62,89
15	15,15	16,11	34,60	73,43	75,63	37,42	26,82	31,12	62,53
20	14,98	16,42	34,78	73,09	75,25	37,35	26,73	31,04	62,18
25	15,00	16,39	34,66	72,85	75,08	37,15	27,09	30,99	61,98
30	15,02	16,62	34,64	72,71	74,58	37,20	27,00	30,82	61,79
40	15,04	17,00	34,41	71,91	74,37	37,02	27,02	30,73	61,73
50	14,82	17,25	34,27	71,19	73,97	37,05	26,95	30,78	61,44
60	14,82	17,17	34,28	70,91	73,76	36,79	26,86	30,53	60,98
70	14,76	17,02	34,12	70,81	73,69	36,68	26,84	30,36	61,27
80	14,87	16,80	33,81	71,12	73,47	36,46	26,65	30,31	61,46
90	14,82	16,54	33,80	71,01	73,22	36,20	26,23	30,06	60,79
120	14,77	15,80	33,86	71,32	73,14	36,11	25,85	29,93	60,78
150	14,52	15,60	33,82	71,33	73,03	36,08	26,16	29,83	60,70
180	14,81	15,55	33,79	71,30	72,70	35,96	26,02	30,01	60,99
210	14,27	15,70	33,59	71,20	72,79	36,26	26,09	30,25	60,95
240	14,52	15,45	33,76	71,38	72,77	35,92	25,95	30,38	61,33
270	14,62	15,71	33,69	71,18	72,95	36,12	25,75	30,44	61,23
330	14,63	15,36	33,83	71,30	72,90	36,07	25,88	30,20	61,31
390	14,68	15,57	33,56	71,08	72,92	35,87	25,80	30,49	61,25
450	14,87	15,69	33,73	71,43	72,82	35,98	26,07	30,47	61,27
510	14,88	15,31	33,80	71,45	72,67	36,04	26,02	30,30	60,81
570	14,85	15,70	33,90	71,22	72,61	36,19	25,98	30,56	61,34
630	15,01	15,65	33,79	71,37	72,84	36,14	26,16	30,50	61,18
690	14,89	15,57	33,91	71,49	72,91	36,10	25,72	30,61	61,35
750	14,67	15,71	33,65	71,05	72,82	36,19	26,02	30,33	60,97
810	15,02	15,70	33,62	71,38	72,90	36,15	26,01	30,59	60,95
870	14,85	15,73	33,69	71,29	73,01	36,12	26,00	30,61	61,18
930	14,97	15,30	33,64	71,28	72,77	36,17	25,77	30,60	61,10

Continuação da variação volumétrica interna para 90°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
2.370	15,04	15,02	33,25	71,35	72,84	35,51	25,87	30,44	61,11
3.810	14,05	15,18	33,39	71,22	72,85	36,81	25,91	30,28	61,67

Tabela E.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 90°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	143	300	199	3.732.089	3.732.089,1	1	100
5	142	300	198		3.605.684,9	0,966130	96,61304
10	142	299	197		3.559.016,6	0,953626	95,36258
15	142	298	197		3.514.293,7	0,941642	94,16425
20	141	298	196		3.437.204,4	0,920987	92,09867
25	141	298	196		3.451.379,9	0,924785	92,47850
30	141	298	196		3.456.189,9	0,926074	92,60738
40	140	296	195		3.337.641,3	0,894309	89,43091
50	140	295	194		3.317.303,5	0,888860	88,88597
60	139	294	192		3.232.938,8	0,866254	86,62544
70	140	293	192		3.289.566,4	0,881428	88,14276
80	139	291	191		3.197.098,5	0,856651	85,66512
90	139	291	191		3.252.075,7	0,871382	87,13821
120	139	290	191		3.288.931,2	0,881257	88,12574
150	139	289	190		3.262.933,9	0,874292	87,42915
180	139	289	190		3.275.034,5	0,877534	87,75338
210	139	289	190		3.269.920,8	0,876164	87,61636
240	139	288	190		3.254.803,0	0,872113	87,21129
270	139	288	190		3.237.645,7	0,867516	86,75156
330	139	288	190		3.257.228,9	0,872763	87,27629
390	139	288	190		3.258.380,0	0,873071	87,30713
450	139	288	190		3.223.359,9	0,863688	86,36878
510	139	288	190		3.258.289,8	0,873047	87,30471
570	139	288	190		3.225.215,0	0,864185	86,41849
630	139	288	190		3.217.447,6	0,862104	86,21036
690	139	288	190		3.226.868,1	0,864628	86,46278
750	139	288	190		3.239.300,3	0,867959	86,79590
810	139	288	190		3.221.810,3	0,863273	86,32726
870	139	288	190		3.218.841,2	0,862477	86,24770
930	139	288	190		3.264.174,2	0,874624	87,46239

Continuação da variação volumétrica externa para 90°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
2.370	139	288	189	3.288.546,3	0,881154	88,11543
3.810	139	289	189	3.290.437,8	0,881661	88,16611

APÊNDICE F

Resultados dos testes experimentais obtidos através da secagem em estufa do compensador industrial 07, realizada a temperatura constante de 100°C. Dados da cinética de secagem, variação da temperatura do produto, parâmetros da variação volumétrica interna e externa.

Tabela F.1 – Dados da cinética de secagem para 100°C.

Mo	Me	m (t)	M	M*	t (min)	%
0,169366	0,0000543102	7.291	0,169366	1	0	100
		7.269	0,165838	0,979160	5	97,91600
		7.257	0,163913	0,967793	10	96,77927
		7.240	0,161187	0,951689	15	95,16891
		7.220	0,157979	0,932744	20	93,27436
		7.199	0,154611	0,912851	25	91,28508
		7.178	0,151243	0,892958	30	89,29581
		7.120	0,141941	0,838016	40	83,80162
		7.065	0,133119	0,785916	50	78,59162
		7.014	0,124940	0,737605	60	73,76053
		6.953	0,115156	0,679822	70	67,98216
		6.910	0,108260	0,639089	80	63,90888
		6.836	0,096391	0,568991	90	56,89906
		6.700	0,074579	0,440161	120	44,01614
		6.592	0,057257	0,337856	150	33,78559
		6.505	0,043304	0,255443	180	25,54431
		6.436	0,032237	0,190081	210	19,00812
		6.391	0,025020	0,147454	240	14,74539
		6.360	0,020048	0,118088	270	11,80884
		6.313	0,012510	0,073567	330	7,356656
		6.286	0,008180	0,047990	390	4,799018
		6.273	0,006095	0,035676	450	3,567562
		6.262	0,004330	0,025256	510	2,525561
		6.257	0,003528	0,020519	570	2,051925

Continuação da cinética de secagem para 100°C.

m (t)	M	M*	t (min)	%
6.255	0,003208	0,018625	630	1,862470
6.251	0,002566	0,014836	690	1,483561
6.249	0,002245	0,012941	750	1,294106
6.237	0,000321	0,001574	2.190	0,157378
6.235	0	-0,00032	3.630	-0,03208

Tabela F.2 – Dados da variação da temperatura para secagem a 100°C.

t	To	Te	T (t)	T*	%
0	27,5	95,1	27,5	0	0
5			35,5	0,118343	11,83432
10			35,8	0,122781	12,27811
15			37,5	0,147929	14,79290
20			38,5	0,162722	16,27219
25			39,2	0,173077	17,30769
30			40,0	0,184911	18,49112
40			42,6	0,223373	22,33728
50			43,7	0,239645	23,96450
60			45,9	0,272189	27,21893
70			47,4	0,294379	29,43787
80			49,0	0,318047	31,80473
90			49,7	0,328402	32,84024
120			58,3	0,455621	45,56213
150			62,3	0,514793	51,47929
180			71,8	0,655325	65,53254
210			83,0	0,821006	82,10059
240			76,5	0,724852	72,48521
270			74,2	0,690828	69,08284
330			87,1	0,881657	88,16568
390			92,7	0,964497	96,44970
450			93,0	0,968935	96,89349
510			91,6	0,948225	94,82249
570			93,8	0,980769	98,07692
630			94,3	0,988166	98,81657
690			94,6	0,992604	99,26036
750			95,2	1,001479	100,1479
2.190			95,1	1	100
3.630			97,7	1,038462	103,8462

Tabela F.3 – Dados da variação volumétrica interna para secagem a 100°C.

t (min)	D (mm)	CF1 (mm)	LF1 (mm)	CF2 (mm)	LF2 (mm)	CF3 (mm)	LF3 (mm)	CF4 (mm)	LF4 (mm)
0	14,49	15,35	31,70	73,85	75,67	36,16	26,86	30,29	63,78
5	14,65	15,51	32,43	74,30	75,97	36,18	27,10	30,63	63,73
10	14,82	15,55	32,42	74,38	76,08	36,20	27,01	30,69	63,55
15	14,86	16,04	32,29	74,50	76,15	36,32	27,22	30,78	63,41
20	14,94	16,05	32,37	74,63	76,14	36,26	27,23	31,65	63,29
25	15,07	16,24	32,31	74,75	76,06	36,30	27,38	31,84	63,36
30	15,07	16,37	32,25	74,77	75,90	36,19	27,34	31,88	63,29
40	15,44	16,60	32,12	74,85	75,38	36,25	27,20	32,00	63,24
50	15,67	16,85	31,97	74,69	74,98	36,08	27,02	31,88	62,79
60	15,44	16,59	31,84	74,04	74,33	35,89	27,01	31,72	63,02
70	15,29	16,24	33,22	73,39	73,89	35,80	26,75	31,57	62,97
80	15,13	15,98	33,21	72,89	73,76	35,69	26,55	31,36	62,62
90	14,87	15,61	33,20	72,18	73,02	35,07	26,34	30,50	62,91
120	14,54	15,24	33,04	71,65	72,39	35,34	26,15	30,07	62,75
150	14,55	15,31	33,04	71,30	72,17	35,36	26,25	30,01	62,61
180	14,61	15,27	32,78	71,33	72,25	35,43	26,27	29,98	62,32
210	14,62	15,30	32,50	71,19	72,27	35,37	26,14	29,97	62,43
240	14,62	15,26	33,08	71,31	72,27	35,16	25,96	30,12	62,60
270	14,62	15,20	33,08	71,31	72,21	35,39	26,27	30,16	62,21
330	14,63	15,21	33,05	71,19	72,06	35,38	26,32	30,10	62,39
390	14,60	15,26	33,11	71,17	72,01	35,40	26,15	29,87	62,51
450	14,72	15,14	33,14	71,23	71,98	35,30	26,02	30,12	62,42
510	14,62	15,32	33,03	71,26	72,16	35,30	26,01	30,17	62,48
570	14,57	15,23	33,13	71,25	72,04	35,38	26,16	30,08	62,46
630	14,65	15,24	33,02	71,20	72,20	35,25	26,23	30,16	62,35
690	14,71	15,15	33,05	71,20	71,99	35,33	26,24	30,06	62,30
750	14,47	15,29	32,78	71,25	71,98	35,39	26,21	30,12	62,56
2.190	14,82	13,51	32,50	71,43	72,03	35,19	25,78	28,69	62,43
3.630	14,77	13,53	32,61	71,33	72,01	35,07	25,69	28,74	62,40

Tabela F.4 – Dados da variação volumétrica externa para secagem a 100°C.

t (min)	A (mm)	C (mm)	L (mm)	V ₀ (mm ³)	V (mm ³)	V/V ₀ (-)	V/V ₀ (%)
0	142	301	201	3.869.290	3.869.290	1	100
5	142	301	200		3.773.822	0,975327	97,53267
10	142	300	200		3.736.345	0,965641	96,56409
15	142	300	199		3.669.324	0,948320	94,83198
20	142	299	199		3.622.885	0,936318	93,63179
25	142	299	198		3.580.709	0,925418	92,54176
30	142	298	198		3.552.554	0,918141	91,81410
40	141	297	197		3.443.181	0,889874	88,98740
50	141	296	196		3.410.176	0,881344	88,13442
60	142	294	195		3.466.593	0,895925	89,59248
70	141	293	194		3.383.528	0,874457	87,44571
80	141	292	194		3.410.147	0,881337	88,13366
90	140	292	193		3.437.672	0,888450	88,84503
120	139	291	192		3.414.887	0,882562	88,25616
150	139	291	192		3.423.548	0,884800	88,47999
180	138	291	192		3.375.865	0,872477	87,24766
210	138	291	192		3.390.859	0,876352	87,63518
240	138	291	193		3.394.013	0,877167	87,71668
270	138	291	193		3.388.969	0,875863	87,58633
330	139	291	192		3.433.342	0,887331	88,73313
390	138	292	193		3.424.526	0,885053	88,50527
450	138	291	192		3.388.487	0,875739	87,57387
510	138	291	193		3.391.537	0,876527	87,65269
570	138	291	192		3.377.266	0,872839	87,28386
630	138	291	192		3.376.359	0,872604	87,26042
690	138	291	192		3.386.441	0,875210	87,52099
750	138	291	192		3.385.790	0,875042	87,50417
2.190	138	291	192		3.549.953	0,917469	91,74688
3.630	138	291	193		3.572.107	0,923194	92,31943