



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Mecânica

FRANCISCO FIRMO DE SOUSA MOURA

Análise térmica de um secador para tijolos de cerâmica vermelha

CAMPINAS

2022

FRANCISCO FIRMO DE SOUSA MOURA

Análise térmica de um secador para tijolos de cerâmica vermelha

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluídos.

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO
FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO
FRANCISCO FIRMO DE SOUSA MOURA, E ORI-
ENTADO PELO PROF. WALDIR ANTÔNIO BIZZO

CAMPINAS

2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M865a Moura, Francisco Firmo de Sousa, 1964-
Análise térmica de um secador para tijolos de cerâmica vermelha /
Francisco Firmo de Sousa Moura. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Waldir Antônio Bizzo.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de
Engenharia Mecânica.

1. Cerâmica. 2. Secagem. 3. Tijolos. 4. Simulação. I. Bizzo, Waldir Antônio,
1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Thermal analysis of a dryer for ceramic bricks

Palavras-chave em inglês:

Ceramics

Drying

Bricks

Simulation

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Waldir Antônio Bizzo [Orientador]

Antonio Gilson Barbosa de Lima

Kamal Abdel Radi Ismail

Waldyr Luiz Ribeiro Gallo

Milene Costa Codolo

Data de defesa: 22-06-2022

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0000.0003.0736.0837

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/3954611880201994>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO

Análise térmica de um secador para tijolos de cerâmica vermelha

Autor: Francisco Firmo de Sousa Moura

Orientador: Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Waldir Antonio Bizzo, Presidente
FEM/ UNICAMP

Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail
FEM/ UNICAMP

Prof. Dr. Waldyr Luiz Ribeiro Gallo
FEM/ UNICAMP

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima
DEM/UFCEG

Profa. Dra. Milene Costa Codolo
DEQ/UNIFESP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 22 de junho de 2022.

AGRADECIMENTO

A DEUS, por me dar saúde e força para desenvolver este trabalho.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo, pela orientação, dedicação e ensinamentos dirigidos a este trabalho.

Aos meus pais, Firmo José de Moura e Maria de Sousa Moura, a minha esposa Irene Rodrigues e as minhas filhas: Vytoria, Roberta, Maria Cecilia, pelo apoio e compreensão.

A Universidade Federal do Piauí (UFPI) e a FEM-UNICAMP por terem viabilizado a realização deste DINTER.

Aos professores do programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica por todos os ensinamentos durante a realização deste trabalho.

Aos meus colegas professores do Departamento de Estruturas da UFPI, pelo apoio nos momentos necessários.

Aos meus colegas de Doutorado pela orientação imediata durante o desenvolvimento deste trabalho.

A CAL- Cerâmica Atalaia LTDA, por permitir e liberar suas instalações fabril para a construção e realização de experimentos.

A todos que, diretamente ou indiretamente, me ajudaram com suas contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

O método de secagem de material cerâmico (tijolos, telhas, lajotas) é, sem sombra de dúvida, um dos gargalos no processo produtivo, principalmente na indústria cerâmica de pequeno porte, cujo poder financeiro é menos favorável. Esta dificuldade financeira faz com que as referidas cerâmicas usem o processo de secagem natural, característico por ser mais demorado, menos eficiente e por requerer mais mão de obra, quando comparado com o processo de secagem forçada. Neste estudo foi desenvolvido e feita a análise térmica de um secador de tijolo, o que possibilitou a análise do anterior e posterior a sua implantação. As análises foram feitas através das mensurações de parâmetros como: tempo de secagem, percentual de umidade, quantidade da mão de obra utilizada no processo de secagem do tijolo. Para o estudo do processo de secagem do material cerâmico, foram feitos experimentos de secagem para as seguintes situações: secagem natural no interior do galpão, secagem no secador, secagem em estufa; os dados experimentais obtidos também foram utilizados para análises matemática e numérica da secagem e aquecimento, ocorridos no tijolo. No que se refere a parte econômica, este estudo mostra o custo da implantação do secador e a economia gerada em função da sua implantação. Os resultados mostram que no processo de secagem natural o tempo de secagem foi de nove dias, enquanto que na secagem utilizando o secador o referido tempo foi de cinco dias, o secador conseguiu secar em 40 minutos o equivalente a quatro dias de secagem no processo natural, possibilitando a redução de mão de obra utilizada no processo de secagem. As equações matemáticas utilizadas para descrever a secagem e o aquecimento do tijolo se ajustaram muito bem aos dados experimentais mostrando um acerto na utilização das mesmas, o modelo computacional utilizado descreveu muito bem a secagem e aquecimento do tijolo mostrando uma boa concordância aos dados experimentais.

Palavras-chave: Cerâmica, secagem, secador, tijolo, experimental, simulação.

ABSTRACT

The drying method of ceramic material (bricks, tiles, slabs) is, without a doubt, one of the bottlenecks in the production process, especially in the small ceramic industry, whose financial power is less favorable. This financial difficulty makes these ceramics use the natural drying process, characteristic for being more time consuming, less efficient and requiring more labor, when compared to the forced drying process. In this study, the thermal analysis of a brick dryer was developed and carried out, which made it possible to analyze the previous and subsequent implementation. The analyzes were made through the measurements of parameters such as: drying time, percentage of moisture, amount of labor used in the drying process of the brick. To study the drying process of the ceramic material, drying experiments were carried out for the following situations: natural drying inside the shed, drying in the dryer, drying in the oven; the experimental data obtained were also used for mathematical and numerical analysis of the drying and heating, which took place in the brick. Regarding the economic part, this study shows the cost of implementing the dryer and the savings generated as a result of its implementation. The results show that in the natural drying process the drying time was nine days, while in the drying using the dryer this time was five days, the dryer was able to dry in 40 minutes the equivalent of four days of drying in the natural process. , allowing the reduction of labor used in the drying process. The mathematical equations used to describe the drying and heating of the brick adjusted very well to the experimental data, showing a correct use of them, the computational model used described very well the drying and heating of the brick, showing a good agreement with the experimental data.

Keywords: Ceramics, drying, dryer, brick, experimental, simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fases do processo de secagem	37
Figura 2.2 - Retrações ocorridas no processo de secagem	38
Figura 2.3 - Curva de Bigot: perda de água e retração	38
Figura 3.1- Preparação da argila	39
Figura 3.2 - Fluxograma de produção	40
Figura 3.3 - Processo de secagem	40
Figura 3.4– Processo de queima	41
Figura 3.5 - Estocagem de material assado	41
Figura 3.6 - Primeiro empilhamento	42
Figura 3.7 - Segundo empilhamento	43
Figura 3.8 - Terceiro empilhamento	43
Figura 4.1 - Construção do protótipo do secador	45
Figura 4.2 - Instalação industrial com o secador	46
Figura 4.3 Estrutura do secador	46
Figura 4.4 - Ventilador centrífugo	47
Figura 4.5 - Exaustor centrífugo radial	47
Figura 4.6 - Vista lateral em corte do secador	48
Figura 5.1- Dimensões de análise da amostra	49
Figura 5.2 - Secagem em pontos fixos	50
Figura 5.3 - Secagem na estufa	52
Figura 5.4 - Secagem com a vagoneta em movimento	55
Figura 5.5 - Dimensões de estudo da amostra	61
Figura 5.6 - Esquema representativo do processo de secagem de um sólido com geometria arbitrária	63
Figura 5.7 – Geometria e dimensões características do tijolo estudado nesta pesquisa	65
Figura 6.1– Perda de umidade	73
Figura 6.2 – Variações de temperatura na queima	75
Figura 6.3 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23,95$	76
Figura 6.4 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 22,43$	76

Figura 6.5 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 21,22$	77
Figura 6.6 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 19,26$	77
Figura 6.7– Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 18,51$	77
Figura 6.8 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23,95$	78
Figura 6.9 Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 22,43$	78
Figura 6.10– Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 21,22$	78
Figura 6.11 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 19,26$	79
Figura 6.12 Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 18,51\%$	79
Figura 6.13– Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 23,95\%$	79
Figura 6.14 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 22,43\%$	80
Figura 6.15– Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 21,22\%$	80
Figura 6.16– Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 19,26\%$	80
Figura 6.17 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 18,51\%$	81
Figura 6.18 – Comparação das variações dos teores de umidade, em função do tempo, para diferentes temperaturas e umidades do ar de secagem (secador	81
Figura 6.19 – Comparação das variações das temperaturas medidas no vértice do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem.....	82
Figura 6.20– Comparação das variações dos volumes do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem	83
Figura 6.21– Comparação das variações das áreas do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem	84
Figura 6.22– Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 10,42\%$, (Estufa)	85
Figura 6.23– Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 8,04\%$, (Estufa)	85

Figura 6.24– Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 5,02\%$, (Estufa)	86
Figura 6.25 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 3,71\%$, (Estufa)	86
Figura 6.26 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 2,76\%$, (Estufa)	86
Figura 6.27 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 10,42\%$ (Estufa)	87
Figura 6.28 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 8,04\%$ (Estufa)	87
Figura 6.29 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 5,02\%$ (Estufa)	88
Figura 6.30– Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 3,71\%$ (Estufa)	88
Figura 6.31– Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 2,76\%$ (Estufa)	88
Figura 6.32– Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 10,42\%$ (Estufa).....	89
Figura 6.33 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 8,04\%$ (Estufa)	89
Figura 6.34 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 5,02\%$ (Estufa).....	90
Figura 6.35– Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 3,71\%$ (Estufa)	90
Figura 6.36 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 2,76\%$ (Estufa)	90
Figura 6.37 – Comparação das variações dos teores de umidade, em função do tempo, para diferentes temperaturas e umidades do ar de secagem (Estufa	91
Figura 6.38 – Comparação das variações das temperaturas, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem (Estufa)	92
Figura 6.39 – Comparação das variações dos volumes do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem (Estufa).....	92
Figura 6.40 – Variação de temperatura e umidade, em função da umidade em base seca, dentro do secador	94
Figura 6.41 – Variação de temperatura e umidade, em função do tempo, dentro do secador.....	94
Figura 6.42 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T= 85\text{ }^{\circ}\text{C}$	96

Figura 6.43 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$	96
Figura 6.44 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.....	97
Figura 6.45 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo perpendicular ao fluxo de ar...	97
Figura 6.46 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar	98
Figura 6.47– Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo perpendicular ao fluxo de ar	98
Figura 6.48– Variação da umidade do tijolo, em função do tempo, para a temperatura de secagem variando de $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar e para o furo perpendicular ao fluxo de ar	99
Figura 6.49 – Variação da temperatura, em função do tempo, para temperatura de secagem variando $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$, furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar, furo perpendicular ao fluxo de ar.	99
Figura 6.50– Comparativo das perdas de umidades	101
Figura 6.51– Comparativo das variações de temperaturas	101
Figura 6.52– Comparativo das variações de áreas	103
Figura 6.53– Comparativo das variações de volumes	103
Figura 6.54 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para $T=56^{\circ}\text{C}$	107
Figura 6.55 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para $T=63^{\circ}\text{C}$	107
Figura 6.56 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para $T=70^{\circ}\text{C}$	108
Figura 6.57 – Teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para $T=77^{\circ}\text{C}$	108
Figura 6.58 – Teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para $T=85^{\circ}\text{C}$	108
Figura 6.59 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com $T=56^{\circ}\text{C}$	110
Figura 6.60 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com $T=63^{\circ}\text{C}$	110
Figura 6.61 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com $T=70^{\circ}\text{C}$	110
Figura 6.62 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com $T=77^{\circ}\text{C}$	111

Figura 6.63 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=85°C.....	111
Figura 6.64 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T=56°C.....	113
Figura 6.65 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T=63°C.....	113
Figura 6.66 - Teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T=70°C.	113
Figura 6.67 - Teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T=77°C.	114
Figura 6.68 – Teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T=85°C.	114
Figura 6.69 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=56°C.....	116
Figura 6.70 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=63°C	116
Figura 6.71 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=70°C	116
Figura 6.72 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=77°C.....	117
Figura 6.73 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T=85°C.....	117
Figura 6.74 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T= variável.	119
Figura 6.75 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (____), para T= variável.	119
Figura 6.76 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), para o aquecimento do tijolo, com T= variável.....	120
Figura 6.77 Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (____), com T= variável	120
Figura 6.78 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 56 °C.....	122
Figura 6.79 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 56 °C.....	123
Figura 6.80 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 63 °C.....	123
Figura 6.81 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 63 °C.....	123
Figura 6.82 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 70 °C.....	124

Figura 6.83 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 70 °C.....	124
Figura 6.84 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 77 °C.....	124
Figura 6.85 – Comparação entre as variações temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 77 °C.....	125
Figura 6.86 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 85 °C.....	125
Figura 6.87 – Comparação entre as variações temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 85 °C.....	125
Figura 6.88 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 56 °C.....	126
Figura 6.89 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 56 °C.....	127
Figura 6.90 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 63 °C.....	127
Figura 6.91 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 63 °C.....	127
Figura 6.92 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 70 °C.....	128
Figura 6.93 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 70 °C.....	128
Figura 6.94 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 77 °C.....	128
Figura 6.95 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 77 °C.....	129
Figura 6.96 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 85 °C.....	129
Figura 6.97 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 85 °C.....	129
Figura 6.98 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, furo do tijolo frontal.....	131
Figura 6.99 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, furo do tijolo frontal.....	131
Figura 6.100 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, furo do tijolo perpendicular.	131
Figura 6.101 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, furo do tijolo perpendicular.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Modelos empíricos e semi-empíricos	31
Tabela 6.1 - Comparativo da secagem das amostras	104
Tabela 6.2 - Comparativo do aquecimento das amostras	105
Tabela 6.3 – Parâmetros da equação (6.1) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade	107
Tabela 6.4 – Parâmetros da equação (6.2) ajustados aos dados experimentais.....	109
Tabela 6.5 – Parâmetros da equação (6.3) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade.....	112
Tabela 6.6 – Parâmetros da equação (6.4) ajustados aos dados experimentais.....	115
Tabela 6.7 – Parâmetros da equação (6.5) obtidos após ajuste aos dados experimentais, para umidade	118
Tabela 6.8 – Parâmetros da equação (6.6) ajustados aos dados experimentais.....	120
Tabela 6.9 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em estufa)	122
Tabela 6.10 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em secador – vagoneta estática – tijolo com furo frontal).....	126
Tabela 6.11 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em secador – vagoneta movimento – tijolo com furo frontal e perpendicular).....	130
Tabela 6.12 - Custo da estrutura de alvenaria	133
Tabela 6.13 - Custo do sistema de ventilação	134
Tabela 6.14 - Custo da estrutura mecânica.....	134
Tabela 6.15 - Custo total do secador	135
Tabela 6.16 - Custo da mão de obra	135
Tabela 6.17 - Custo total mensal do secador	138
Tabela 6.18 - Comparativo do custo mensal do secador e a economia mensal gerada pelo secador	138

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras Latinas

A	Área	(m ²)
Bi	Número de Biot	(-)
M	Teor de umidade do produto	(kg/kg)
M _o	Teor de umidade inicial do produto	(kg/kg)
Q	Calor	(W)
C _v	Calor específico do vapor	(J/kg)
h _{fg}	Calor latente de vaporização da água	(J/kg)
h _c	Coefficiente de transferência de calor	(W/m ² K)
M _(b,u)	Teor de umidade em base úmida	(kg)
m _s	Massa seca	(kg)
m _{H₂O}	Massa de água	(kg)
M _(b,s)	Teor de umidade em base seca	(kg)
V _{ti}	Volume do tijolo	(m ³)
M*	Teor de umidade adimensional	(-)
A _{ti}	Área do tijolo	(m ²)
V _∞	Velocidade	(m/s)
UR _∞	Umidade relativa do meio externo	(%)
c _p	Calor específico	(J/kgK)
D	Coefficiente de difusão de massa	(m ² /s)
k	Condutividade térmica	(W/m.K)
2l ₁	Largura do tijolo	(m)
2l ₂	Altura do tijolo	(m)
2l ₃	Comprimento do tijolo	(m)
L _x	Largura do furo do tijolo	(m)

Letras Gregas

Γ°	Coeficiente de transporte	(-)
λ	Coeficientes de transporte	(-)
θ^*	Temperatura adimensional	(-)
$\bar{\theta}_\infty$	Temperatura do meio externo	(°C)
$\bar{\theta}_0$	Temperatura inicial do sólido	(°C)
$\bar{\theta}$	Temperatura instantânea do sólido	(°C)
ρ_s	Massa específica do sólido seco	(kg/m ³)

Superescrito

*	Adimensional	(-)
---	--------------	-----

Subscrito

a	Ar	(-)
b.s	Base seca	(-)
b.u	Base úmida	(-)
c	Crítica	(-)
e	Equilíbrio	(-)
m	Massa	(-)
m _s	Massa seca	(-)
o	Inicial	(-)
H ₂ O	Água	(-)
s	Seco	(-)
v	Vapor	(-)
f	Final	(-)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
1.2. Objetivo	23
1.2.1 Objetivo geral	23
1.2.2 Objetivos específicos	23
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1. Cerâmica vermelha	24
2.1.1. Histórico	24
2.2 A importância da indústria da cerâmica vermelha no Brasil	26
2.3 A importância da indústria da cerâmica vermelha no Piauí	26
2.4 Métodos de secagem de produtos cerâmicos	26
2.4.1 Métodos de secagem de produtos cerâmicos no Brasil	27
2.4.2 Métodos de secagem de produtos cerâmicos no Estado do Piauí	28
2.4.3 Principais equipamentos utilizados no processo de secagem	28
2.5 Teoria e modelos matemáticos de secagem de produtos cerâmicos	29
2.5.1 Teoria da secagem	29
2.5.2 Modelos matemáticos de secagem	30
2.5.2.1 Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos	30
2.5.2.2 Modelos matemáticos baseados no método de análise distribuída	32
2.6 Secagem de produtos cerâmicos	34
3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO	39
3.1 Dimensões do sistema existente	39
3.2 Descrição do sistema existente	39
3.3 Dados operacionais do sistema existente	42
3.3.1 Tempo de secagem	42
3.3.2 Avaliação da qualidade dos tijolos	44
3.3.3 Número de pessoas envolvidas na operação	44
3.4 Descrição das modificações propostas	44
4. PROJETO DO SECADOR	45

4.1. Construção de um protótipo	45
4.2 Secador proposto	46
4.2.1 Aspectos construtivos e funcionamento do secador proposto	46
4.2.1.1 Estrutura de alvenaria	47
4.2.1.2 Sistema de ventilação	47
4.2.1.3 Estrutura mecânica	48
5. METODOLOGIA DE ANÁLISE	49
5.1. Metodologia experimental	49
5.1.1. Procedimentos de análises	49
5.1.1.1. Procedimentos para o experimento 1: Secagem do tijolo em pontos fixos no secador: Vagoneta parada, furos do tijolo paralelo à direção do fluxo de ar	50
5.1.1.2. Procedimentos para o experimento 2: Secagem do tijolo em estufa	52
5.1.1.3. Procedimentos para o experimento 3: Secagem do tijolo em pontos fixos no secador, vagoneta em movimento	55
5.1.2 Equipamentos e instrumentos utilizados nas medições experimentais	59
5.2. Metodologia matemática	60
5.2.1. Tratamento estatístico dos dados do experimento	60
5.3. Metodologia numérica	62
5.3.1. O método da capacitância global	62
5.3.2. Modelagem matemática fenomenológica avançada	65
5.3.2.1. O problema físico e a geometria	65
5.3.2.2. O modelo matemático	66
5.3.3. Tratamento estatístico dos dados	70
5.3.4. Estimação dos parâmetros de transporte	71
5.3.5 Propriedades termofísicas do produto e do ar de secagem	71
6. RESULTADOS E ANÁLISES PARA O SISTEMA PROPOSTO/SECADOR	73
6.1 Resultados experimentais	73
6.1.1 Perda de umidade, no processo de secagem natural no interior do galpão	73
6.1.2 Tempo de queima	74
6.1.3 Resultados e análises dos dados obtidos com a vagoneta estática, dentro do secador	75
6.1.3.1 Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo	76

6.1.3.2	Varição do volume e da área, em função da variação de umidade em base seca	78
6.1.3.3	Varição do volume e da área, em função do tempo de secagem	79
6.1.4	Resultados e análises dos dados obtidos, na secagem da amostra, utilizando estufa	84
6.1.4.1	Varição do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo.....	85
6.1.4.2	Varição do volume e da área, em função da variação de umidade em base sec.....	87
6.1.4.3	Varição do volume e da área, em função do tempo.....	89
6.1.5	Resultados e análises dos dados obtidos na secagem da amostra, com a vagoneta em movimento dentro do secador	93
6.1.5.1	Varição da temperatura e umidade relativa	93
6.1.5.2	Variações do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo	94
6.1.5.3	Variações do volume e da área, em função do tempo	96
6.1.5.4	Variações do volume e da área, em função da umidade em base seca.....	98
6.1.5.5	Comparativo das perdas de umidade	99
6.1.5.6	Comparativo das variações de temperatura	99
6.1.5.7	Comparativo das perdas de umidade	100
6.1.5.8	Comparativo das variações de temperatura	101
6.1.5.9	Comparativo das variações das áreas	102
6.1.5.10	Comparativo das variações dos volumes.....	103
6.1.6	Comparativo entre os experimentos realizado no secador e na estufa	104
6.1.6.1	Comparativo da secagem, para os experimentos realizados no secador e na estufa	104
6.1.6.2	Comparativo do aquecimento.....	105
6.2	Análise matemática dos dados experimentais	105
6.2.1	Análise matemática dos dados experimentais, para secagem e aquecimento, da amostra do tijolo no secador, com vagoneta estática e furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar	106
6.2.1.1	Secagem.....	106
6.2.1.2	Aquecimento.....	109
6.2.2	Análise matemática dos dados experimentais, para a secagem e aquecimento, na estufa	111
6.2.2.1	Secagem	111
6.2.2.2	Aquecimento	114
6.2.3	Tratamento matemático dos dados experimentais, para a secagem e aquecimento no secador, com vagoneta em movimento e furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar	117
6.2.3.1	Secagem	117
6.2.3.2	Aquecimento	119

6.3 Resultados numéricos	121
6.3.1 Resultados numéricos do experimento realizado na estufa	121
6.3.2 Resultados numéricos, do experimento realizado no secador, com a vagoneta estática ..	126
6.3.3 Resultados numéricos, do experimento realizado no secador, com a vagoneta em movimento	130
6.4 Custo do secador	133
6.4.1 Análise econômica do secador proposto	135
6.4.2 Comparativo entre o custo mensal do secador e a economia mensal gerada pelo secador	138
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	139
7.1. Conclusões	139
7.2. Sugestões para trabalhos futuros	140
REFERÊNCIAS	141
ANEXOS	146

1. INTRODUÇÃO

A indústria de cerâmica vermelha transforma a sua principal matéria-prima – a argila – em produtos cerâmicos, tais como: tijolos, telhas e lajotas. O nome cerâmica vermelha se dá principalmente pelo fato de que a maioria das argilas, após conformadas e assadas, adquire uma coloração avermelhada. A indústria de cerâmica vermelha divide-se em grandes indústrias, médias indústrias e pequenas indústrias.

As grandes indústrias cerâmicas são caracterizadas em função do seu nível de mecanização e automação, sendo que algumas utilizam até a robotização no seu processo produtivo. Este desenvolvimento tecnológico faz com que elas, quando comparadas às pequenas indústrias, consigam reduzir o seu custo de produção, visto que a automação aumenta a produtividade e diminui a quantidade de mão de obra. A associação destes dois fatores faz com que as grandes indústrias cerâmicas consigam um maior valor agregado para seus produtos e, este relativo baixo custo de produção, possibilita a inserção no mercado consumidor de produtos com menor custo agregado.

As pequenas indústrias cerâmicas caracterizam-se pelo baixo índice de mecanização e automação. São empresas que utilizam equipamentos de baixa produtividade, possuem fornos de pouca eficiência, na grande maioria não possuem secadores e, quando possuem, são secadores de baixa eficiência.

As pequenas cerâmicas são indústrias que devido as suas características funcionais, requerem grande quantidade de funcionários, pois quase todo o seu processo produtivo é feito manualmente. Além disso, a baixa produtividade relativa, somada com a grande quantidade de mão de obra, faz com que o custo de produção desse tipo de indústria seja elevado, ou seja, as pequenas cerâmicas têm dificuldade de agregar valores aos seus produtos, e quando se leva em consideração o custo de produção, saem em desvantagem quando comparadas com as grandes cerâmicas. Isto é, não são competitivas do ponto de vista mercadológico.

No Piauí, Estado no qual o estudo foi desenvolvido, existe indústria cerâmica que produz dois milhões de peças por mês, utilizando apenas sete funcionários na sua linha de produção, enquanto a indústria onde o secador foi instalado produz 600 mil peças por mês, com trinta funcionários trabalhando na sua linha de produção. Esta diferença, entre uma que produz muito com poucos funcionários e a outra que produz pouco com muitos funcionários, decorre exatamente da diferença de tecnologia usada pelas duas cerâmicas.

A Cerâmica Atalaia Ltda (CAL), localizada na cidade de Picos, na qual este estudo foi implantado, é considerada uma cerâmica de pequeno porte, com uma produção de 600 mil peças por mês. Seu sistema produtivo é praticamente todo manual. Para a referida produção são utilizados 30 funcionários, agindo diretamente no processo produtivo.

Do ponto de vista técnico e tecnológico, a manufatura de uma peça cerâmica é constituída de diferentes fases: coleta e tratamento da matéria-prima, homogeneização, moldagem, secagem e queima. Na homogeneização, água é adicionada a matéria-prima (argila), para conferir plasticidade e facilitar a moldagem da peça no formato desejado. Em seguida, a peça é submetida à secagem para retirada da água adicionada a peça, na fase de homogeneização.

A secagem é um processo termodinâmico que demanda uma quantidade considerável de energia, por isso torna-se de suma importância no processo de fabricação de cerâmica vermelha, principalmente nas pequenas cerâmicas. A peça cerâmica, ao sair da máquina extrusora, contém aproximadamente 20% de água.

A velocidade de secagem de uma peça cerâmica, tem relação com a velocidade da migração da água no interior da peça. Se esta velocidade de migração é lenta, a secagem da superfície da peça não pode ser rápida, não havendo relação direta entre a velocidade de secagem externa, com a velocidade de migração interna, o que implicará em danos à peça, aliado a isso, pode-se citar o tempo de secagem e redução da produtividade das empresas.

No processo de secagem convectiva, o ar exerce a função de transportar o calor e receber o vapor de água, formado durante o processo. Essa transferência de calor ocorre através da convecção do ar quente para a superfície das peças e por condução da superfície para o interior da mesma. Na secagem com convecção térmica forçada, a velocidade de secagem de uma peça cerâmica está relacionada a diversos fatores como: temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do fluxo do ar de secagem, forma e dimensões da peça, permeabilidade do sólido, tamanho do grão de argila e porosidade da peça.

Do exposto, a secagem constitui-se numa fase crítica do processo, na qual o material fica sujeito a tensões térmicas, mecânicas e hídricas, que podem provocar trincas e deformações na peça, reduzindo a sua qualidade para ser submetida à fase de queima.

O processo de secagem na Cerâmica Atalaia é o de secagem natural e ocorre da seguinte maneira: o material sai da extrusora, é transportado através de carrinhos e empilhado debaixo de galpões. Após dois dias este material é reempilhado. Passados mais três dias o material é reempilhado pela segunda vez. Tais reempilhamentos têm como objetivo acelerar o processo

de secagem. O manuseio desses reempilhamentos, no caso específico desta cerâmica, consome aproximadamente 17% de toda a mão de obra.

Assim sendo, a redução do tempo de secagem é uma das prioridades desta indústria cerâmica, por entender que seu processo de secagem limita a sua produção e conseqüentemente o seu crescimento. Desta forma, controlar o processo de secagem é crucial, de forma a garantir um produto de qualidade pós-secagem.

Este trabalho consistiu em projetar, instalar e analisar um secador de tijolos. O secador que foi projetado e do qual foi instalado o protótipo, tem como função eliminar os reempilhamentos existentes no processo produtivo atual.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver, implantar e analisar um secador que venha otimizar o processo de secagem do material cerâmico.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Desenvolver um secador, cujo processo construtivo seja bem mais barato que os secadores convencionais, e que o referido secador venha atender principalmente às cerâmicas de menor poder econômico.
- Verificar as vantagens da implantação do secador.
- Obter, através de experimentos, dados do processo de secagem do tijolo.
- Ajustar modelo matemático aos dados experimentais.
- Comparar os resultados numéricos aos experimentais do teor de umidade e temperatura.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Cerâmica vermelha

2.1.1. Histórico

O termo cerâmica vermelha surgiu da palavra grega *keramos* que significa argila. Toda uma região de Atenas, conhecida por *Kera-meikos*, tinha esse nome em função dos ceramistas que lá residiam. Da idade antiga à idade média, a história da cerâmica e da terracota confundem-se, em certo sentido, com a própria história da civilização. Os vasos, as taxas ou as ânforas são, em muitos casos, os únicos elementos a partir dos quais podemos reconstruir o grau de evolução, os hábitos, a religião e até as mudanças de povos já desaparecidos (LEHMKUHL, 2004).

Existem indícios de atividades ceramistas 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 para todo o Mediterrâneo, em virtude da sua forma artística e da sua utilidade para servir água, vinho e azeite (BELLINGIERE, 2003).

A necessidade de o homem criar espaços em busca de abrigo, remonta à pré-história. Utilizando recursos naturais, precisava defender-se dos predadores, das intempéries da natureza e de seus próprios semelhantes, o que fez com que passasse a utilizar produtos cerâmicos (ANDRADE, 2005).

Com a evolução do tempo, o homem descobriu diversos materiais e produtos para utilizar na construção, um deles foi o tijolo. As peças cerâmicas mais antigas conhecidas por arqueólogos foram encontradas no Japão, na área ocupada pela cultura Jomon, há cerca de oito mil anos (OLIVEIRA, 2005).

A fabricação da cerâmica como atividade industrial ocorreu devido ao crescimento das grandes construções dessa época. Praticamente toda a Europa herdou as práticas trazidas pelos povos antigos, tais como romanos, bizantinos, árabes, entre outros, que influenciaram fortemente no estilo das construções nesse continente. O surgimento das primeiras máquinas moldadoras para a fabricação de tijolos, movidas por tração animal, ocorreu por volta de 1850, sendo mais tarde substituídas por máquinas a vapor, possibilitando o aumento significativo da produção. Pode-se considerar esse fato como sendo o primeiro grande salto para a indústria da

cerâmica vermelha, pois possibilitou a fabricação de peças especiais e dos tijolos ocos ou de furos (STEIL, 2000).

No Brasil, há cerca de dois mil anos, já havia indícios, em diversas regiões, de populações que trabalhavam com argila. Os índios brasileiros faziam sua cerâmica modelando e, às vezes, usando moldes ou enrolando, mas desconheciam o torno, que na época era uma ferramenta para moldar a peça cerâmica. Além disso, não usavam fornos para queimar as peças, as mesmas eram queimadas no chão, utilizando a lenha, por este motivo os artefatos encontrados em sítios arqueológicos possuem a coloração escura. 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 (BELLINGIERE, 2003).

Até o século XIX, os sistemas de produção tiveram pouca modificação. A produção permaneceu manual, a secagem era feita ao sol e a queima era feita em fornos artesanais. Com o surgimento das primeiras máquinas a vapor, foi possível mecanizar as operações de extração de matérias primas, preparação e conformação, em consequência disto houve um aumento da produção. Além do surgimento das máquinas, outro fator que contribuiu para o grande aumento da produção de tijolos, foi a criação de novos fornos. A Itália foi a pioneira na aplicação e fabricação de tijolos da era moderna; outros países como Espanha, França e Alemanha se destacaram no mercado como produtores e como fabricantes de equipamentos (OLIVEIRA, 2005).

Hoje, no Brasil o setor de cerâmica vermelha é formado por um grande número de indústrias com diferentes níveis de desenvolvimento tecnológico e capacidade produtiva. Embora algumas grandes empresas despontem no setor, o mesmo é caracterizado por um grande número de pequenas e médias empresas distribuídas ao longo de todo o país. Quanto ao nível de tecnologia, algumas apresentam um elevado grau de aplicação tecnológico otimizando todo o processo produtivo, enquanto a grande maioria das indústrias ainda não conseguiu alcançar este nível.

Atualmente, no Brasil, o setor da indústria da cerâmica é bastante diversificado e pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha, materiais de revestimento, materiais refratários, louças sanitárias, isoladores elétricos de porcelana, louça de mesa, cerâmica artística, filtros cerâmicos. Existem todos estes segmentos, com maior ou menor grau de desenvolvimento e capacidade de produção (ABC, 2015).

2.2 A importância da indústria da cerâmica vermelha no Brasil

Segundo dados do Instituto Nacional de Pesquisa – INT (2017) e da Associação Nacional da Indústria Cerâmica – (ANICER), a indústria de cerâmica vermelha no Brasil tem um faturamento anual de R\$18 bilhões, com uma quantidade aproximada de 7.000 fábricas, distribuídas em todas as regiões do país, sendo que desse total, predominam as pequenas e médias empresas. Tal indústria; gera 293 mil empregos diretos, com uma média de 41,8 empregos por empresa, além de 1,25 milhões de empregos indiretos.

A produção média das indústrias de cerâmica vermelha é de 3,5 bilhões de peças por mês, com uma produtividade média de 18,3 milheiros/trabalhador ao mês, enquanto a produtividade média do trabalhador da indústria cerâmica Europeia é 200 milheiros/trabalhador ao mês. Essa diferença da produtividade entre o trabalhador brasileiro e o trabalhador europeu, vincula-se principalmente à diferença do nível de mecanização e automatização das referidas indústrias.

A região Sul do Brasil concentra a maior quantidade de indústrias cerâmicas, seguida pela região Sudeste. Entre os estados, os maiores produtores são: São Paulo, Minas Gerais e Rio Grande do Sul, que juntos respondem por 40% da produção nacional de cerâmica.

2.3 A importância da indústria da cerâmica vermelha no Piauí

Conforme INT (2017) e a ANICER, no Piauí existem 123 indústrias cerâmicas, distribuídas de Norte a Sul. Esta distribuição é bastante pulverizada ao longo de todo Estado, sendo que a maior concentração fica na capital Teresina.

A produção da indústria cerâmica do Piauí é de 77.000 milheiros/mês, o que dá uma média de 626 milheiros/empresa.mês, sendo que 87% destas empresas produzem entre 500 a 1.000 milheiros/mês.

2.4 Métodos de secagem de produtos cerâmicos

Segundo Wilson Acchar (2014), a secagem de produtos cerâmicos consiste na eliminação de água dos produtos conformados; nessa fase tem-se um conjunto de grãos rodeados de água, a qual forma um filme contínuo que preenche os espaços entre eles. É através da secagem que ocorre o esvaziamento dos poros e dos canais de água. Na indústria cerâmica esta operação de secagem deve ser feita no menor tempo possível, porém, deve-se ter o cuidado para que esta redução de tempo de secagem, não danifique as peças.

No processo de secagem, o ar exerce a função de transportar o calor, além de ser um elemento receptor do vapor de água, formado durante o processo. Essa transferência de calor ocorre através da convecção do ar quente para a superfície das peças e por condução da superfície para o interior da peça.

A secagem na indústria cerâmica constitui-se uma fase crítica, na qual o material fica sujeito a tensões mecânicas que podem provocar trincas; durante a secagem é retirada a água contida no material e é exatamente na saída desta água, em função das retrações ocorridas de forma desigual, que surgem as trincas.

2.4.1 Métodos de secagem de produtos cerâmicos no Brasil

O processo de secagem de produtos cerâmicos é universalizado, apenas com pequenas variações devido às condições climáticas, econômicas e tecnológicas da região ou país, mas, no geral, os princípios e a forma de secagem são os mesmos.

No mundo inteiro o processo de secagem de produtos cerâmicos ocorre de duas maneiras: secagem natural ou secagem forçada. Na secagem natural, o produto cerâmico é secado naturalmente sobre ação da temperatura ambiente e das condições ambientais do local. Neste modo não ocorre o controle das principais variáveis que interferem no processo de secagem. Na secagem forçada, as condições ambientais tais como: temperatura, umidade, velocidade de vento são modificadas ou ajustadas conforme a necessidade.

Nos países mais desenvolvidos predomina a secagem forçada, pelo fato de possuírem condições tecnológicas mais avançadas. Ao contrário dos países desenvolvidos, nos países menos desenvolvidos, predomina a secagem natural, isto se dá principalmente pelo baixo desenvolvimento tecnológico.

No geral, os métodos de secagem e os equipamentos utilizados nos países mais desenvolvidos também são utilizados em países menos desenvolvidos, o que diferencia é a proporção. Enquanto nos países desenvolvidos grande parte da indústria cerâmica utiliza a secagem forçada com equipamentos de última geração, contrariamente nos países menos desenvolvidos o número de indústrias utilizando dos mesmos recursos é bastante reduzido.

2.4.2 Métodos de secagem de produtos cerâmicos no Estado do Piauí

Assim como nos demais locais, no Piauí os produtos cerâmicos são secados pelo processo de secagem natural ou pelo processo de secagem forçada. No Estado, ao longo de quase todo o ano a temperatura é próxima dos 40° e a umidade relativa do ar abaixo dos 30%. Estas duas condições são favoráveis ao processo de secagem natural, o que faz com que muitas Indústrias cerâmicas utilizem esse método. No Estado do Piauí, a secagem forçada, é mais utilizada pelas grandes cerâmicas, analisando o Estado por regiões, observa-se que na região em torno da capital Teresina, predomina a secagem forçada.

2.4.3. Principais equipamentos utilizados no processo de secagem

Existe certa semelhança entre os equipamentos de secagem de produtos cerâmicos, ou seja, em todo o mundo utilizam-se quase os mesmos tipos de equipamentos. No entanto, nos países mais desenvolvidos um maior número de indústrias cerâmicas utiliza secadores tecnologicamente mais desenvolvidos, ao contrário dos países menos desenvolvidos, que utilizam esses secadores em menor quantidade, por questões já relatadas. Percebe-se então que a diferença entre a produção cerâmica nos países desenvolvidos e menos desenvolvidos reside na quantidade de secadores usados, que seria resultado da baixa qualidade tecnológica destes últimos.

No Brasil, os tipos de secadores mais utilizados são o secador estático e/ou secador contínuo. No secador estático, o material a ser secado é colocado por bateladas e fica estático ao longo do processo de secagem. Neste tipo, o ar quente é injetado dentro do secador e através de ventiladores este ar quente é redistribuído e soprado de encontro ao material a ser secado. Em alguns tipos de secadores estáticos, os ventiladores que distribuem o ar quente são fixos, porém, atualmente, a tendência é que, ao invés de usar ventiladores fixos, utilizem-se ventiladores auto viajantes. Nesse caso, o material continua estático e o ventilador auto viajante fica se movimentando. Este tipo de secador ainda é bastante utilizado pelas indústrias cerâmicas, principalmente pelas pequenas e médias indústrias.

No secador contínuo, a produção é contínua, ou seja, conforme vai entrando o material a ser secado, vai saindo o material seco. Nele, o material a ser secado se movimenta dentro do secador, enquanto que o ar quente vai de encontro ao material a ser secado. Esse tipo de secador, quando comparado ao secador estático, apresenta uma produtividade maior. São secadores

normalmente utilizados pelas grandes cerâmicas. Esse tipo de secador subdivide-se também em dois outros tipos:

- Secador contínuo do tipo túnel: tem o formato de um túnel. Dentre os secadores contínuos este é o mais usado pelas indústrias cerâmicas. Seu comprimento e capacidade produtiva é variável.
- Secador contínuo do tipo rápido: neste tipo o material a ser secado fica em movimento, no interior do secador por um tempo de aproximadamente 1h30min. após este tempo, o material está seco e pronto para ir para o processo de queima. O baixo tempo de secagem, quando comparado com os outros tipos de secadores faz com que este tipo de secagem seja uma tendência crescente, porém, o seu custo elevado ainda é um fator limitante. Como a secagem é rápida, alguns tipos de argila não se adequam a este tipo de secagem, pois a retração do material a ser secado ocorre rapidamente, podendo ocorrer trincas em função da rapidez do processo de secagem.

No Piauí, a maior quantidade de secadores, tanto do tipo estático como do tipo contínuo, está concentrada nas indústrias cerâmicas localizadas em torno da capital do Estado, enquanto que nas outras regiões, o número de secadores diminui significativamente. As grandes indústrias cerâmicas tendem a usar os secadores do tipo contínuo, porém, não é uma unanimidade, visto que ainda existem grandes cerâmicas que permanecem usando o processo de secagem natural, enquanto outras usam secadores estáticos.

2.5 Teoria e modelos matemáticos de secagem de produtos cerâmicos

2.5.1 Teoria da secagem

Segundo Holanda (2007), a secagem é uma operação de remoção parcial ou total do líquido, contido em um corpo, através de um processo térmico ou mecânico.

Em todo o mundo, pesquisadores têm estudado os processos de secagem. Alguns levam em consideração as condições externas, tais como temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do ar, fazendo uma correlação destes parâmetros à taxa de variação de umidade do produto. No entanto, outros pesquisadores levam em consideração as condições internas, dando ênfase ao movimento interno e o deslocamento interno do líquido dentro do corpo.

O transporte de umidade, pode ser realizado através de um destes mecanismos propostos na literatura (FORTES; OKOS, 1980; STRUMILLO; KUDRA, 1986; LIMA, 1995).

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

2.5.2 Modelos matemáticos de secagem

Segundo Pereira (2015), existem diversos processos de secagem que têm sido descritos e modelados matematicamente por muitos pesquisadores ao longo de muitas décadas. Para fazer uma correlação dos dados obtidos através de um experimento de secagem de um produto a um modelo matemático, diversos pesquisadores na área de secagem vêm desenvolvendo uma série de modelos que representam a cinética de secagem de vários tipos de produtos. Alguns destes tipos de modelamento matemático, também permitem analisar a distribuição da secagem no interior do corpo, para um tempo qualquer.

2.5.2.1 Modelos matemáticos empíricos e semi-empíricos

Conforme Silva (2007), os modelos empíricos descrevem bem a cinética da secagem, porém, não possibilitam visualizar a distribuição de umidade no interior do corpo, em um instante de tempo previamente especificado; outra limitação que possui os modelos empíricos, é o fato deles não serem adequados para descrever a cinética de secagem intermitente (BAINI; LANGRISH, 2007).

As equações empíricas relacionam diretamente o conteúdo de água contida no produto ao tempo de secagem, enquanto as equações semi-empíricas são semelhantes à Lei de Newton para o resfriamento, assumindo que a taxa de secagem é proporcional à diferença entre o conteúdo de água do produto e seu respectivo conteúdo de água de equilíbrio para as condições de secagem especificadas por Holanda (2007).

O método de análise concentrada considera que a distribuição de umidade e/ou temperatura, no interior do corpo sólido ocorre uniformemente para qualquer tempo. Sendo a distribuição de umidade e/ou temperatura uniforme, estas passam a ser expressas em função do tempo, $M = M(t)$ e $\theta = \theta(t)$, aqui considera M como sendo umidade e θ como sendo temperatura.

Para as condições onde os gradientes de umidade ou temperatura, no interior do corpo sólido, são pequenos, pode-se empregar o método da capacitância global, este método admite uma distribuição uniforme de massa e ou temperatura dentro do sólido em qualquer instante, de tal modo que, a temperatura ou teor de umidade do sólido seja dado exclusivamente em função do tempo, maiores detalhes sobre este método estão sendo apresentado no Capítulo 5 deste trabalho.

Os modelos matemáticos empíricos e os semi-empíricos, são bastantes utilizados para descrever os processos de secagem. A Tabela 2.1 mostra alguns destes modelos.

Tabela 2.1- Modelos empíricos e semi-empíricos

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

Fonte: Almeida (2003)

2.5.2.2 Modelos matemáticos baseados no método de análise distribuída

A difusão é um mecanismo de transporte em que a transferência de energia ou matéria ocorre pelo movimento molecular devido à existência de um gradiente de temperatura ou de concentração, estando o meio estado estacionário. Quando o processo de difusão for difusão térmica, aplica-se a Lei de Fourier. Caso o processo de difusão seja difusão mássica, aplica a Lei de Fick. Estas equações são decorrentes da equação geral de transporte Pereira (2015).

Partindo da equação de transporte:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda\vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.1)$$

Onde:

λ e Γ^Φ são coeficientes de transporte;

\vec{v} vetor velocidade do meio.

t tempo.

Φ variável dependente de interesse.

S^Φ termo fonte.

Na equação (2.1), o primeiro termo representa a variação de uma grandeza com relação ao tempo, o segundo termo, denominado termo advectivo, indica a variação da grandeza com a posição num meio movendo-se com uma velocidade, dentro do volume de controle, o terceiro termo representa a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão, chamado de termo difusivo, o quarto termo é denominado termo fonte e dá a taxa de geração da grandeza dentro do volume de controle (PEREIRA, 2015).

Fazendo $\vec{v} = 0$ e o termo de geração de grandeza Φ ($S=0$), feito isto a equação (2.1), torna uma equação de difusão; segundo Luikov (1968), a equação (2.2), pode ser utilizada para descrever o transporte de água em meios porosos.

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) \quad (2.2)$$

A equação de difusão mássica é obtida a partir da (2.2), fazendo $\lambda=1$, $\Phi = M$ e $\Gamma^\Phi/\lambda = D$, sendo M o teor de umidade do produto em base seca e D é o coeficiente de difusão mássica, portanto a equação de difusão de massa no regime transiente, fica conforme a equação (2.3).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M) \quad (2.3)$$

O coeficiente de difusão D, para algumas situações é considerado constante, porém, existem situações em que coeficiente de difusão é dependente da temperatura e/ou do teor de umidade do produto. Fenômenos como a compressão mecânica do produto, causam a redução da porosidade, dificultando a difusividade de umidade efetiva (SARAVACOS, 1995).

Para Almeida (2009), o mecanismo da difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Os dados disponíveis na literatura, no que se trata de coeficiente de difusão, apresentam elevada variação nos seus valores, isto ocorre em função da complexidade dos produtos, fatores como: métodos de estimação, tipo de material, processo de secagem, teor de umidade, estes fatores são responsáveis pela complexidade do método da difusão.

Considerar a difusão líquida como único mecanismo de transporte de umidade, tem sido causa de várias discussões, isto ocorre devido às divergências entre os valores obtidos experimentalmente e os valores obtidos teoricamente, conforme Mariz (1986) e Keey (1992). Considerar o coeficiente de difusão constante, juntamente com as condições de contorno inadequadas, além de não considerar a taxa de encolhimento do material, são fatores causadores de discussão, sobre a eficácia do método, segundo Lima (1999).

O movimento de difusão de massa é uma importante propriedade de transporte, usado no cálculo e modelagem de várias operações que envolvem movimento da umidade interna, como a desidratação e secagem. O movimento de difusão pode ser definido como a taxa de transferência de uma substância que se difunde através de um espaço com gradiente de concentração, por unidade de área. Pode-se entender esta propriedade como sendo a facilidade com que a água é removida do produto (PEREIRA, 2015).

Segundo Carmo (2004), além do mecanismo de transporte de água no interior do corpo sólido, que pode ser descrita pela teoria da difusão líquida, existem vários outros tipos de difusão, dos quais podemos citar alguns:

- Teoria da condensação/evaporação, considera que nesse mecanismo o vapor de água no interior do produto é condensado perto da superfície, com a taxa de condensação igual à de evaporação;
- Teoria capilar, que se refere ao fluxo de um líquido através dos interstícios e sobre a superfície de um sólido, devido à atração molecular entre o líquido e o sólido;
- Teoria de Luikov, considera que os fluxos de água devido à difusão tanto de vapor quanto de líquido, são devido a gradientes de temperatura, de concentração de umidade e de pressão no interior do sólido;
- Teoria de Krischer enfatiza que, durante a secagem, o fluxo de umidade pode acontecer no estado líquido, por capilaridade, ou no estado de vapor devido ao gradiente de concentração de vapor;
- Teoria de Philip e De Vries, considera que, em meios porosos, a água é movida através da difusão de vapor e por capilaridade.

2.6 Secagem de produtos cerâmicos

A secagem é um processo físico, por meio do qual ocorre uma redução da quantidade de umidade do corpo que se dá devido ao fornecimento de calor ao corpo. Sendo ela natural ou forçada, requer grandes quantidades de ar para cumprir quatro funções básicas: 1) o transporte do calor necessário à evaporação, 2) o arraste do vapor d'água produzido, 3) redução da camada de vapor saturado formado na superfície do corpo, 4) movimento de líquido e/ou vapor no interior do corpo (AFONSO; CORRÊA, 1999).

É importante conhecer as propriedades do ar para entender o fenômeno da secagem dos materiais cerâmicos. O ar atua como elemento condutor de calor e transportador de vapor de água produzido. Para a água evaporar, ela consome calor e assim passa do estado líquido para o estado de vapor, este consumo de energia faz com que a temperatura na superfície do corpo diminua, uma vez que o ar nas proximidades da peça fica saturado de vapor d'água, para esta situação ocorre o rompimento do processo de secagem, quando o ar aquecido circula pela peça,

fornecendo calor à mesma, para este caso ocorre uma remoção da umidade que a envolve dando continuidade ao processo de secagem (BATISTA, 2006).

O processo de secagem consome boa parte do combustível utilizado na fabricação dos produtos cerâmicos. Para reduzir este consumo se faz necessário interligar o sistema de queima ao sistema de secagem, de maneira que o calor gerado na queima, possa ser reaproveitado no processo de secagem (SANTOS, 2001).

No caso de secagem utilizando ar quente, ocorre transferência de temperatura do ar para o produto, em função da diferença de temperatura entre eles. Simultaneamente, ocorre a diferença de pressão parcial do vapor de água existente entre o ar e a água da superfície do produto, ocorrendo, portanto, a transferência de massa para o ar, na forma de vapor de água (PARK, 2007).

Existem dois períodos principais de secagem: o período de secagem a taxa constante e o período a taxa decrescente (LOPEZ *et al.*, 2013). O transporte de água em materiais porosos pode ser modelado com uma grande variedade de modelos, dentre eles os modelos fenomenológicos (ZANDEN *et al.*, 2012). A secagem de produtos cerâmicos é frequentemente acompanhada por retrações que influenciam nas propriedades físicas e mecânicas do produto (MIHOUBI *et al.*, 2013).

As peças cerâmicas são conformadas utilizando água no seu processo, a qual está distribuída quase que homogeneamente, entre as partículas de argila e outros componentes da massa cerâmica. A retirada da água através do processo de secagem faz com que as partículas se aproximem e, conseqüentemente, ocorre uma diminuição do tamanho da peça, que tem que ocorrer por igual ao longo de toda a peça. Caso isto não aconteça, poderá ocorrer trincas ou até mesmo a quebra da peça. A primeira água a sair da peça é aquela que se encontra na superfície, em seguida ocorre a migração da água do interior da peça para a superfície, ocorrendo a evaporação da mesma (SILVA, 2009).

No processo de secagem natural, alguns parâmetros são de fundamental importância, dentre eles estão a temperatura do ambiente, a umidade relativa do ar e a velocidade do ar. A temperatura do ar ambiente, do ar de secagem elevada e umidade relativas baixas, implicam numa secagem mais rápida; tal fato ocorre porque a evaporação da água contida na peça, para estas condições, ocorre de forma mais acentuada (BATISTA, 2006).

A maior parte da energia recebida pelo bloco de argila está relacionada ao calor latente para a evaporação da água (GOMEZ *et al.*, 2020). A teoria da difusão líquida é considerada a análise mais simples, pois negligencia outros efeitos (ARAÚJO *et al.*, 2019).

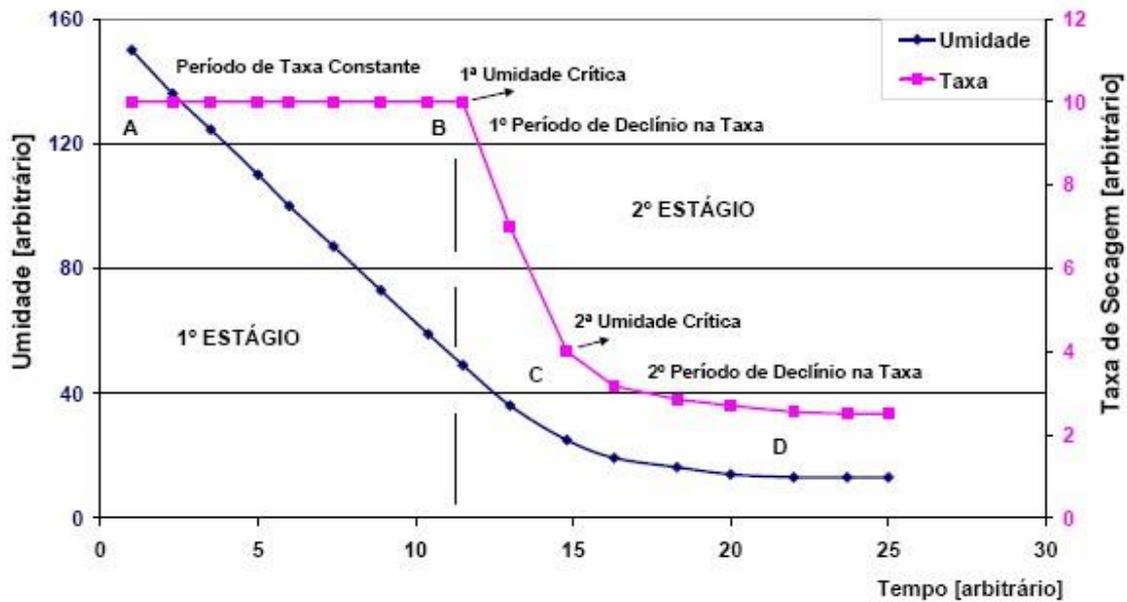
O processo de secagem de produtos cerâmicos, pode ser dividido em três fases, que são descritas através da curva de secagem e diagrama de Sherwood, para as condições exteriores constantes de: temperatura, velocidade do ar e umidade relativa, conforme a Figura 2.1, (LEHMKUHL, 2004).

Primeira Fase (A-B): nesta fase a diminuição do volume do corpo é proporcional, ao volume de água eliminada e a velocidade de secagem é constante. Aqui também a resistência de convecção controla o processo. Ocorrem variações sensíveis nas dimensões da peça, devido à aproximação dos grãos, pela saída da água coloidal. Nesta fase da secagem, a água migra até a superfície da peça formando uma película e posteriormente ocorre a evaporação. Este período é dito constante porque, à medida que a água evapora na superfície da peça, ocorre uma migração da água do interior para a superfície através do fenômeno de difusão. A velocidade com que a água evapora na superfície do corpo, é a mesma velocidade de chegada da água vinda do interior do corpo, desta maneira a superfície do corpo mantém-se com umidade constante. A temperatura na interface é constante e o calor que chega é consumido e usado integralmente para evaporar o líquido. Assim a velocidade de secagem é determinada pela velocidade de evaporação. O período de velocidade constante termina quando se atinge o ponto crítico, ou seja, quando a peça começa a mudar a cor.

Segunda Fase (B-C): nesta fase, ocorre o desaparecimento do filme de água na superfície da peça, fazendo com que a peça mude de cor. Neste período da secagem, a quantidade de água que se desloca por capilaridade ou difusão para a interface é cada vez menor em consequência da formação de vazios no interior da peça. A água evaporada decresce gradativamente, gerando um encolhimento não proporcional.

Terceira Fase (C-D): nesta fase, ocorre o fim da diminuição do volume e é caracterizada pela expulsão das últimas quantidades de umidade, de origem intersticial. A velocidade de secagem diminui até valores próximos de zero. Esta fase é controlada pela permeabilidade. A última fase da secagem, nem sempre é alcançada nos secadores sendo, portanto, finalizada, no processo de queima (LEHMKUHL, 2004).

Figura 2.1 - Fases do processo de secagem

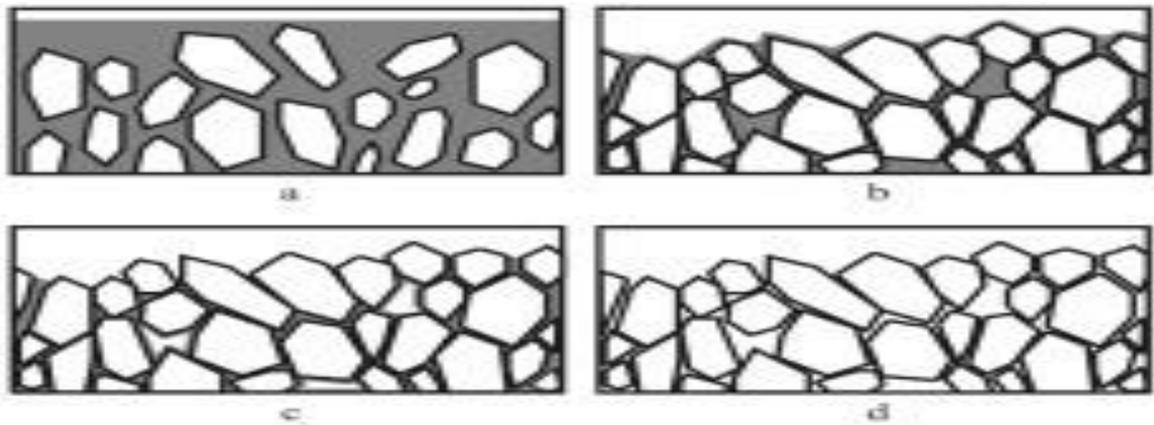


Fonte: Lehmkuhl (2004).

A retração ocorrida no processo de secagem de produtos cerâmicos, ocasiona o surgimento de tensões internas, que podem provocar trincas. Entretanto, as trincas ocorrem mais em função de retrações desiguais e são comuns principalmente no processo de secagem natural, quando a peça cerâmica é secada desigualmente e, conseqüentemente, as retrações ocorrem de forma diferente, fazendo com que parte da peça se contraia mais rapidamente do que a outra parte. Evidentemente, um processo adequado de secagem é aquele onde não ocorre diferença de retrações.

A Figura 2.2 mostra o comportamento de uma peça cerâmica submetida ao processo de secagem, dando ênfase à retração ocorrida no processo. Observa-se que inicialmente todas as partículas da massa estão envolvidas, por um determinado volume de água, à medida que o processo de secagem avança, ocorre a perda de água e as partículas começam a se aproximar, isto se dar da seguinte maneira: Na primeira fase da retração, a diminuição do volume da peça é proporcional a perda da água. No decorrer do processo continua ocorrendo perda de água e conseqüentemente aproximação das partículas. Na segunda fase, a perda de água passa a ser compensada pela formação dos poros, ocorrendo uma diminuição da velocidade de retração. Na fase final, ocorre um aumento do volume dos poros, com o volume total da peça mantendo-se constante, conforme proposto por Lehmkuhl (2004).

Figura 2.2 - Retrações ocorridas no processo de secagem

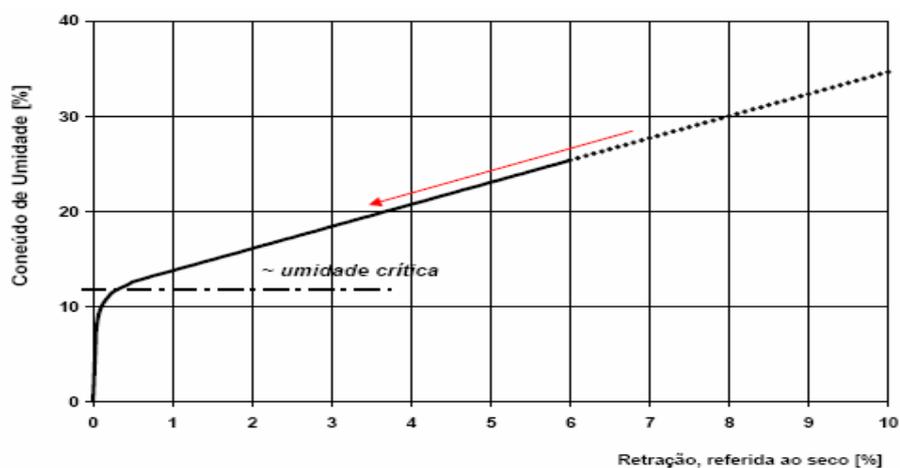


Fonte: Lehmkuhl (2004)

A Figura 2.3, também conhecida como curva de Bigot, mostra uma relação entre a perda de água de peça submetida ao processo de secagem, e a retração ocorrida na peça. A relação entre a perda de água e a retração, pode ser observada através da análise de três zonas.

- A parte tracejada da curva, que compreende a primeira zona, se caracteriza por um teor elevado de umidade;
- Na segunda zona, observa-se que o teor de água é intermediário;
- Na terceira zona, observa-se que o teor de água diminui bastante.

Figura 2.3 – Curva de Bigot: perda de água e retração.



Fonte: Facincani

3. METODOLOGIA DE INVESTIGAÇÃO

Neste item foram feitas análises do sistema existente, tomando como referência uma indústria cerâmica, da qual foram levantados os dados que serão descritos a seguir.

3.1 Dimensões do sistema existente

A Cerâmica Atalaia, analisada neste estudo, na qual foi construído o secador, fica localizada na zona rural da cidade de Picos, no Estado do Piauí, localizada a 310 km da capital Teresina. Ela é considerada de pequeno porte, possui 5 fornos abóbodados de 9m de diâmetro, 2 chaminés de 22m de altura, um galpão de 4.200m², 30 funcionários trabalhando diretamente no processo de fabricação, secagem, queima do material, venda e entrega, com uma produção média de 600 mil peças mês.

3.2 Descrição do sistema existente

A argila é extraída da jazida que fica localizada a 700m da cerâmica, é armazenada no pátio a céu aberto, processo chamado de sazonalização que tem como objetivo alterar as propriedades físico-químicas da argila, através da ação das intempéries provocadas pela chuva e sol. No caso específico desta cerâmica, o sazonalização ocorre por um período aproximado de 6 meses. Após este período a argila é pré-umidificada e fica descansando por 48 horas, após este tempo é encaminhada para o processo de fabricação. A Figura 3.1 mostra esse processo.

Figura 3.1 - Preparação da argila.



Fonte: Autor (2021).

Após o sazonalamento e a pré-umidificação, a argila entra no processo produtivo, passando pelas seguintes máquinas: caixão alimentador, misturador, laminador, extrusora, cortadora. A Figura 3.2, mostra o fluxograma de produção.

Figura 3.2 - Fluxograma de produção.



Fonte: Autor (2021).

Após os tijolos serem conformados e cortados, os mesmos são transportados até o local de secagem, onde são empilhados e secados no processo de secagem natural, como na Figura 3.3, com uma duração de nove dias. Ao longo dos nove dias, ocorrerão três manuseios, ou seja, três reempilhamentos. Tais manuseios são necessários para que o processo de secagem ocorra de forma satisfatória.

Figura 3.3 - Processo de secagem.



Fonte: Autor (2021).

Após a secagem, os tijolos são transportados para a queima em fornos do tipo abóboda, conforme a Figura 3.4, onde serão assados por um tempo de aproximadamente 49 horas, com uma produção por queima de 35 a 42 mil tijolos por fornada. Essa quantidade pode variar dependendo da quantidade de tijolos que é colocada no forno. O combustível utilizado é a lenha,

com um consumo médio de $1,3 \text{ m}^3$ de lenha por milheiro de tijolo assado. Essa quantidade pode variar para mais ou para menos dependendo da qualidade da lenha. Outra variável que influencia o consumo da lenha é o percentual de umidade do tijolo.

Figura 3.4 – Processo de queima.



Fonte: Autor (2021).

Após a queima, inicia-se o processo de resfriamento. Para o caso específico da Cerâmica Atalaia, o resfriamento ocorre após 72 horas, dividido da seguinte forma: após o fim da queima, o registro que possibilita o acesso à chaminé é fechado, voltando a ser aberto 24 horas depois. Após a abertura do registro, começa a retirada do calor, através da exaustão causada pela chaminé, nessa etapa a chaminé é o principal elemento de resfriamento. Transcorridas 24 horas de registro aberto, a porta do forno é aberta e os ventiladores são ligados, iniciando o resfriamento forçado através da injeção de ar para dentro do forno, esta etapa dura 24 horas. Passado esse tempo, inicia-se o descarregamento e, em seguida, os tijolos são estocados, conforme mostra a Figura 3.5, e depois comercializados.

Figura 3.5 - Estocagem de material assado.



Fonte: Autor (2021).

Para esta cerâmica, verificou-se que o tempo de secagem é bastante demorado, representando o maior gargalo do seu processo produtivo. Portanto, a redução do tempo de secagem é uma das prioridades desta indústria cerâmica, por entender que seu processo de secagem limita a sua produtividade e conseqüentemente o seu crescimento.

3.3 Dados operacionais do sistema existente

3.3.1 Tempo de secagem

No caso específico desta indústria cerâmica, como a secagem ocorre no interior dos galpões, através do processo de secagem natural, vários fatores influenciam na secagem, tais como: umidade relativa do ar, temperatura ambiente, velocidade do ar e características da argila.

Neste estudo, as medições foram feitas acompanhando e mantendo o ritmo produtivo da indústria no mês de julho, onde predomina a estação não chuvosa, com a umidade relativa do ar variando em torno dos 40% e a temperatura média do dia de 37°C. Para estas condições ambientais e para o processo de secagem adotado pela referida indústria cerâmica, observou-se que o tempo gasto de secagem, que compreendeu o tempo da saída do tijolo da máquina até a entrada do forno, foi de nove dias, divididos da seguinte maneira:

Primeiro empilhamento: este empilhamento ocorreu quando o material saiu da máquina, para o caso específico do tijolo, ele foi empilhado com sete fiadas de altura, conforme Figura 3.6, ao longo de quatro dias foram feitas medições da massa, objetivando medir a quantidade de umidade perdida ao longo deste tempo. Os dados são mostrados nas tabelas do Anexo A.

Figura 3.6 - Primeiro empilhamento.



Fonte: Autor (2021).

Segundo empilhamento: ocorreu cinco dias após o primeiro e tem como objetivo acelerar o processo de secagem. O tijolo foi manuseado, de maneira que as fiadas de baixo se movimentaram para cima e também foram acrescentadas mais duas fiadas, totalizando nove fiadas, nesse empilhamento os tijolos ficaram por mais três dias.

Figura 3.7 - Segundo empilhamento.



Fonte: Autor (2021).

Terceiro empilhamento: ocorreu após três dias do segundo empilhamento e sete dias após a fabricação do tijolo, tal como os outros empilhamentos, tem como objetivo acelerar o processo de secagem. O tijolo também é manuseado, de maneira que fiadas de baixo passem para cima e também foram acrescentados mais três fiadas, totalizando doze. Neste empilhamento os tijolos ficaram por mais dois dias. Após este tempo foram transportados para o forno, para a execução da etapa de queima Figura 3.8.

Figura 3.8 - Terceiro empilhamento.



Fonte: Autor (2021).

3.3.2 Avaliação da qualidade dos tijolos

A qualidade dos tijolos depende de vários fatores, tais como: tipo de argila, equipamentos e processos produtivo, processo de secagem e processo de queima. No caso em estudo, a perda da qualidade está ocorrendo principalmente no processo de secagem, pois esta cerâmica utiliza secagem natural, onde os tijolos são empilhados ao ar livre. Neste processo ocorrem retrações desiguais ao longo do tijolo, o que está ocasionando trincas de secagem.

Outro fator que está afetando a qualidade do tijolo é a quantidade de empilhamentos. Eles têm como objetivo agilizar a secagem do material, porém, os manuseios ocorridos para realizar o empilhamento, deforma ou arranha o tijolo, causando perda de qualidade.

3.3.3 Número de pessoas envolvidas na operação

Nessa Indústria, atualmente existem 30 funcionários para executar todos os processos de extração, preparação e transporte da argila, moldagem, secagem, queima, venda e entrega. No caso específico do processo de secagem, são utilizados 5 funcionários que trabalham quase que exclusivamente nele, fazendo o empilhamento e reempilhamento.

3.4 Descrição das modificações propostas

No processo atual da Cerâmica Atalaia, o tijolo é moldado e, em seguida, é conduzido para a secagem natural através do empilhamento no interior dos galpões. Este processo, que a princípio requer um investimento menor, visto que necessita apenas da construção do galpão, apesar de ser mais barato em função do não gasto com a construção do secador, em contrapartida apresenta uma série de dificuldades, dentre as quais podemos citar: longo tempo de secagem, maior necessidade de mão de obra em função da quantidade de manuseio, maior índice de rejeito em função das trincas, diminuição da qualidade em função dos empilhamentos, etc.

A construção e implantação do secador reduzirá o tempo de secagem, pois parte da umidade vai ser eliminada, suprimindo também os reempilhamentos e diminuindo a quantidade de mão de obra. A aparência do material também será melhorada, pois com a implantação do secador, as deformações ocorridas no ato do reempilhamento deixarão de existir.

4. PROJETO DO SECADOR

O projeto do secador, iniciou com a construção de um protótipo e a partir da construção deste protótipo foi possível obter as informações necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

4.1 Construção do protótipo do secador

Foi construído um protótipo, para a obtenção dos dados que foram utilizados nas análises técnicas, econômicas, experimental, matemática e numérica. O protótipo também serviu de parâmetros para a elaboração do projeto do secador proposto.

O protótipo tem 20m de comprimento, 0,65m de largura interna e 1,3m de altura, construído em alvenaria, com paredes de tijolos e com cobertura em telhas de amianto. A cada 5m foi feita uma janela lateral, por onde eram colocadas e retiradas as amostras para as medições, também a cada 5m foram instalados termopares para as medições de temperaturas internas do protótipo.

Para a geração do ar aquecido, foi construída uma fornalha a qual usava a lenha como combustível; o ar aquecido proveniente da fornalha era insuflado para dentro do secador, mediante a ação de um ventilador centrífugo acionado por um motor elétrico de 5 CV.

Figura 4.1 - Construção do protótipo do secador.



Fonte: Autor (2021).

4.2 Secador proposto

O secador proposto tem características técnicas e dimensionais do protótipo construído anteriormente. Com relação as dimensões o secador, tal como o protótipo tem as seguintes dimensões: 20m de comprimento, 0,65m de largura interna e 1,3m de altura, a Figura 4.2 mostra a posição do secador com relação aos fornos e aos demais itens da indústria.

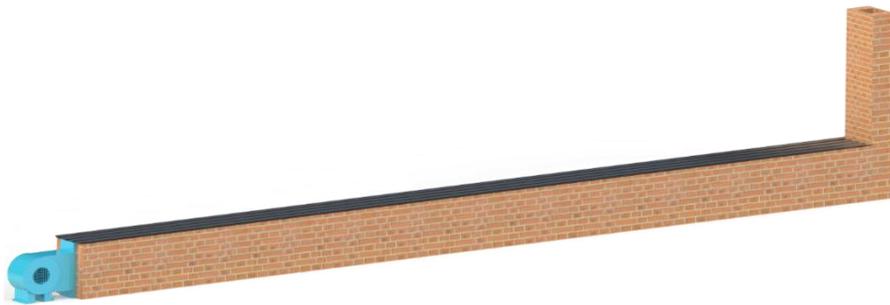
Figura 4.2 - Instalação industrial com o secador.



Fonte: Autor (2021).

4.2.1 Aspectos construtivos e funcionamento do secador proposto

Figura 4.3 – Estrutura do secador



Fonte: Autor (2021).

A partir do protótipo e considerando os dados experimentais obtidos nos vários experimentos realizados no mesmo, será construído o secador como na figura Figura 4.3. O secador consiste basicamente em três partes, que são: estrutura de alvenaria; sistema de ventilação; estrutura mecânica.

4.2.1.1 Estrutura de alvenaria.

A parte de alvenaria, consiste em duas paredes de tijolos, onde cada parede mede 20m de comprimento por 1,3m de altura, em uma das extremidades será construída uma torre de retirada de umidade, com relação a torre de retirada esta é formada por 2 paredes de 0,5m de largura por 3m de altura e 2 paredes de 0,65m de largura por 3m de altura, conforme Figura 4.4.

A cada 5m de parede do secador será colocado uma coluna de concreto, com relação a torre de retirada de umidade em cada canto será colocado uma coluna de concreto, objetivando dar uma melhor estabilidade.

A parte superior do secador é coberta com telhas de amianto de 2,1m de comprimento por 1m de largura, com 5mm de espessura, os tijolos serão assentados utilizando argila, isto porque a argila suporta melhor as temperaturas elevadas.

4.2.1.2 Sistema de ventilação

O ar de secagem utilizado neste sistema é o ar aquecido no processo de queima ou de resfriamento dos fornos, atualmente este ar é lançado na atmosfera através da exaustão realizadas pelas as chaminés, portanto, é um calor perdido.

O sistema de ventilação do secador é composto basicamente por dois equipamentos: sendo um ventilador centrífugo (Figura 4.4), que tem como função pegar o ar aquecido do sistema de queima ou resfriamento dos fornos e insuflar para dentro do secador, o segundo equipamento (Figura 4.5) é um exaustor axial, que tem como função extrair a umidade contida dentro do secador.

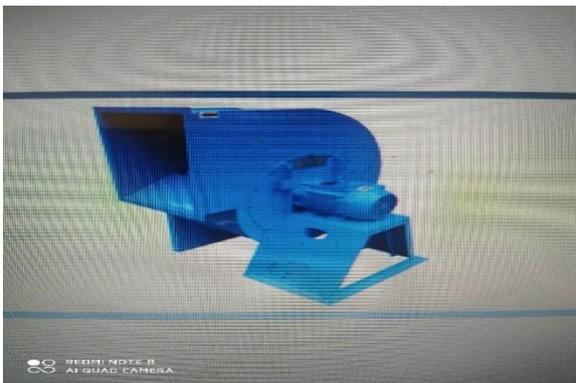


Figura 4.5 - Exaustor axial



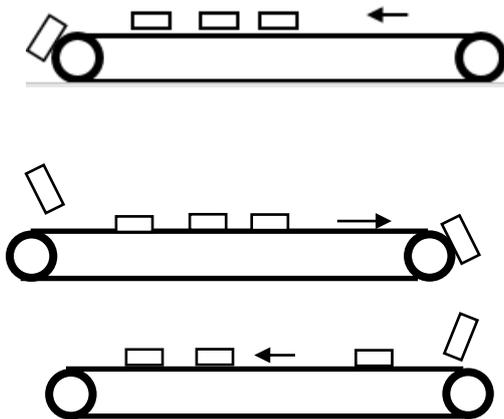
Figura 4.4 - Ventilador centrífugo

4.2.1.3 Estrutura mecânica

A estrutura mecânica é composta pela parte motriz e pela parte de transporte do material dentro do secador, a parte motriz é feita por um conjunto de eixos e engrenagens e por um motor de baixa rotação de 3 CV com redutor de velocidade; o sistema de transporte do tijolo dentro do secador é feito utilizando correntes de elos soldados, a escolha do transporte através de correntes se deu em função do menor custo.

O transporte do tijolo dentro do secador se dar através do movimento de ida e volta, conforme Figura 4.6. São usadas 4 esteiras transportadoras de 20m cada, totalizando 80m, a opção de fazer o tijolo se deslocar em um movimento de ida e volta se deu com o objetivo de fazer com que o mesmo permaneça o maior tempo possível dentro do secador, pois quanto maior o tempo de permanência do tijolo dentro do secador, maior será a taxa de secagem.

O sistema de movimentação do tijolo dentro do secador é sincronizado com a velocidade de produção da máquina que produz o tijolo, isto é necessário pois o tijolo ao sair da máquina entra diretamente no secador, portanto, é necessária uma compatibilização entre a velocidade da movimentação das esteiras do secador com a velocidade da esteira da máquina.



Fonte: Autor (2021).

Figura 4.6 - vista lateral em corte do secador.



5. METODOLOGIA DE ANÁLISE

O processo de secagem do tijolo cerâmico será descrito através das análises das metodologias: experimentais, matemática e numérica.

5.1. Metodologia Experimental

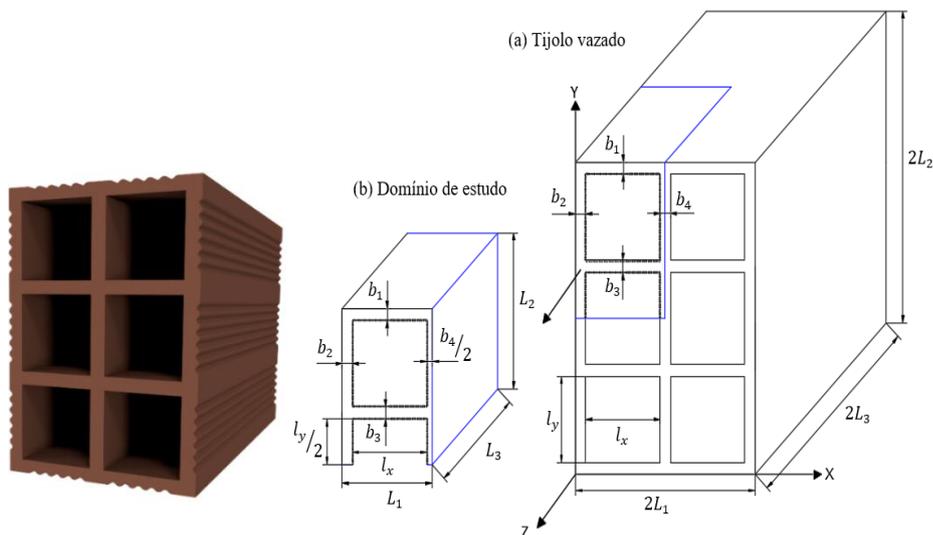
Foram desenvolvidos vários experimentos de secagem; os referidos experimentos foram realizados no secador na própria Indústria Cerâmica, também foram realizados experimentos no Laboratório de Ciências dos Materiais da Universidade Federal do Piauí.

Foi avaliada a cinética de secagem, aquecimento, variação dimensional, teores de umidade inicial, final e de equilíbrio de cada amostra em cada condição de secagem, também foi avaliado o efeito da temperatura, umidade relativa e velocidade do ar de secagem na remoção da água.

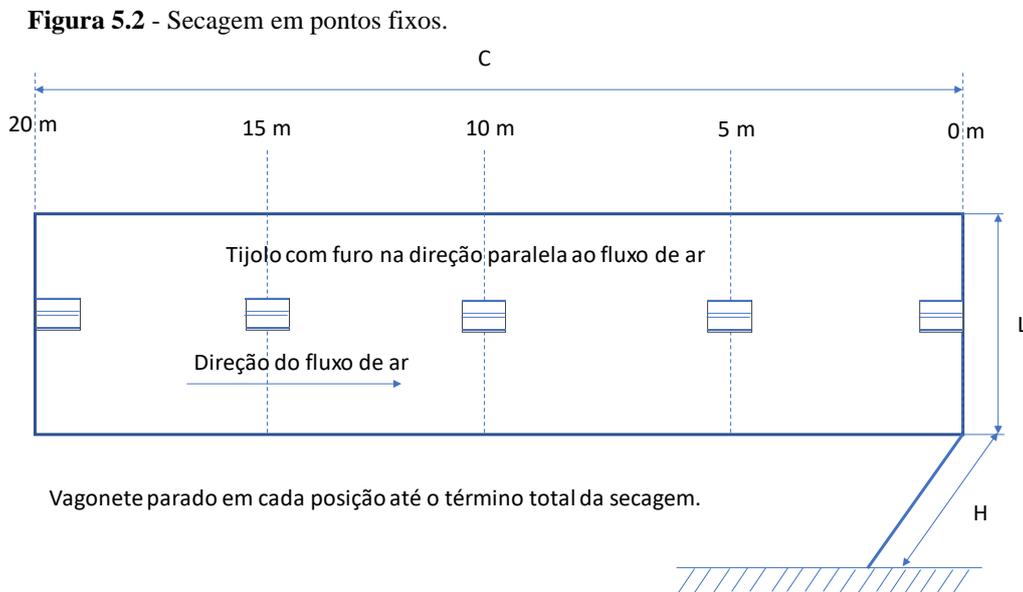
5.1.1. Procedimentos de análises

Para o processo de secagem da amostra de tijolo, foram realizados 3 experimentos, sendo 2 experimentos realizados no secador e 1 experimento realizado na estufa. Os procedimentos de cada um dos 3 experimentos, estão descritos a seguir tomando as medidas da Figura 5.1 como base.

Figura 5.1 - Dimensões de análise da amostra.



5.1.1.1. Procedimentos para o experimento 1: Secagem do tijolo em pontos fixos no secador: Vagonete parada, furos do tijolo paralelo à direção do fluxo de ar



Fonte: Autor (2021).

O conjunto da secagem é composto principalmente por um secador, sistema de ventilação e uma fornalha alimentada a lenha a qual é responsável pelo fornecimento do calor. O calor é transportado da fornalha e insuflado para dentro do secador através de um sistema de ventilação formado por duto e ventilador.

O secador no qual foram realizadas as medidas dos experimentos, tem um comprimento de 20m, sendo que ao longo deste comprimento foram escolhidos 5 pontos, nos quais foram realizadas as medições, conforme Figura 5.2.

A temperatura escolhida para o ponto inicial do secador foi de 85°C e a temperatura na ponta final foi de 56°C, sendo que a temperatura de 85°C foi escolhida objetivando manter a integridade do tijolo, já a temperatura de 56°C é uma consequência da temperatura inicial e das características do secador.

Foram escolhidos cinco pontos dentro do secador distanciando 5m um do outro, e com uma variação de temperatura entre os pontos de 85°C a 56°C, sendo que a maior temperatura foi no ponto 4 e menor no ponto 0.

Para este experimento de uma forma específica, a amostra ficou estática dentro do secador e todas as medidas foram realizadas com as mesmas paradas.

Para cada ponto escolhido dentro do secador, foram realizadas as medições do experimento. As medidas eram feitas de forma individualizada para cada ponto, ou seja, só ia para o ponto seguinte após a conclusão das medidas do ponto em análise.

Todos os ensaios, só foram concluídos após a amostra do tijolo atingir a umidade de equilíbrio, isto ocorreu após o mesmo repetir por 3 vezes seguidas a mesma massa.

Todas as medidas realizadas, foram feitas seguindo o procedimento abaixo descrito, ressaltamos que o procedimento foi igual para os 5 pontos.

Ensaio no secador, com as amostras paradas

Na parte inicial nos 30 primeiros minutos, as medidas foram feitas a cada 5 minutos, nos 30 minutos seguintes as medidas foram feitas a cada 10 minutos e a partir daí até o final do experimento as medidas foram feitas a cada 20 minutos.

Escolheu-se um intervalo menor de medição no início, pois é exatamente na parte inicial do experimento onde ocorre a maiores variações de umidade, temperatura e dimensionais, da amostra.

O procedimento abaixo descrito foi utilizado, para todos os pontos de medições deste experimento.

Ponto 0 m:

a) No $t=0$ min (Início do processo).

- a1) Medir a massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. As dimensões estão indicadas na figura 5.1;
- a2) Colocar o tijolo na vagonete e deixar fixo na posição 0 m;
- a3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- a4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

b) De $0 \text{ min} < t \leq 30 \text{ min}$

- b1) A cada 5 minutos, retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- b2) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;

b3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador;

b4) Realizar os procedimentos b1, b2 e b3 até 30 minutos de processo. Total de medições: 6.

c) De $30 \text{ min} < t \leq 60 \text{ min}$

c1) A cada 10 minutos, retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;

c2) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;

c3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador;

c4) Realizar os procedimentos c1, c2 e c3 até 60 minutos de processo. Total de medições: 3.

d) De $60 \text{ min} < t \leq t \text{ final}$

d1) A cada 20 minutos, retirar o tijolo do secador e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;

d2) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;

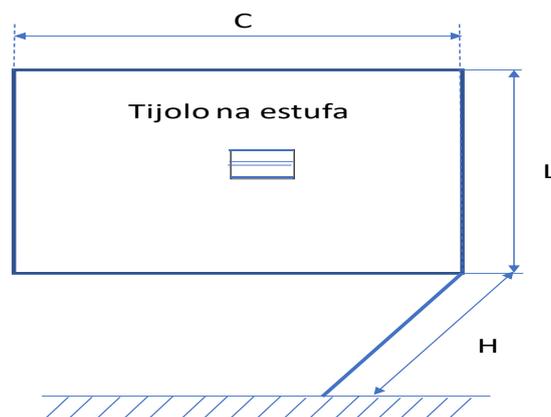
d3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador;

d4) Realizar os procedimentos d1, d2 e d3 até obter peso final (até se realizar 3 medidas sem variar a massa do tijolo). Total de medições: Depende do tempo total de processo.

Observação: o experimento 1, foi repetido, para os pontos: 5 m, 10 m, 15 m e 20 m:

5.1.1.2. Procedimentos para o experimento 2: Secagem do tijolo em estufa

Figura 5.3 - Secagem na estufa.



Fonte: Autor (2021).

Este experimento foi realizado no laboratório de Ciências dos Materiais, da Universidade Federal do Piauí - UFPI.

O tijolo ao ser fabricado, foi envolvido com um plástico e colocado dentro de um isopor vedado e transportado até o laboratório, que fica a 310 km do local de fabricação do referido tijolo.

As mesmas medidas: perdas de umidade, variação de temperatura do tijolo, variações dimensionais que foram feitas no secador, agora foram feitas utilizando uma estufa, no laboratório.

A sequência dos ensaios ocorreu da seguinte maneira: a primeira amostra foi ensaiada com a temperatura de 56°C; a segunda amostra foi ensaiada com a temperatura de 63°C; a terceira amostra foi ensaiada com a temperatura de 70°C; a quarta amostra foi ensaiada com a temperatura de 77°C; a quinta amostra foi ensaiada com a temperatura de 85°C.

As temperaturas usadas nos ensaios com a estufa, foram as mesmas temperaturas usadas nos ensaios no secador.

Tal como no experimento 1, todos os ensaios, foram concluídos após a amostra do tijolo atingir a umidade de equilíbrio, isto ocorreu após o mesmo repetir por 3 vezes seguidas a mesma massa.

O procedimento a seguir, foi utilizado para ensaiar as cinco amostras, ou seja, este mesmo procedimento foi repetido 5 vezes, porém, para cada ensaio utilizou-se uma temperatura diferente conforme descrito acima.

O que diferencia este experimento do experimento 1, é que neste experimento após a amostra atingir a umidade de equilíbrio, a mesma ficou por mais 24 horas na temperatura do experimento e após este tempo a amostra ficou mais 24 horas na temperatura de 105°C, objetivando com isto a secagem total da amostra e a obtenção da massa do material totalmente seca

O procedimento abaixo descrito foi utilizado, para todas as temperaturas usadas no experimento.

Ensaio na estufa.

a) Em t=0 min (Início do processo)

a1) Medir a massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. As dimensões estão indicadas na Figura 5.1;

a2) Colocar o tijolo na estufa e deixar fixa a temperatura de secagem, que deve ser igual àquela obtida no experimento 1;

a3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa.

b) De $0 \text{ min} < t \leq 30 \text{ min}$

b1) A cada 5 minutos, retirar o tijolo da estufa, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. Recolocar o tijolo na estufa na mesma posição de antes;

b2) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa;

b3) Realizar os procedimentos b1 e b2 até 30 minutos de processo. Total de medições: 6.

c) De $30 \text{ min} < t \leq 60 \text{ min}$

c1) A cada 10 minutos, retirar o tijolo da estufa, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. Recolocar o tijolo na estufa na mesma posição de antes;

c2) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa;

c3) Realizar os procedimentos c1 e c2 até 60 minutos de processo. Total de medições: 3.

d) De $60 \text{ min} < t \leq t \text{ final}$

d1) A cada 20 minutos, retirar o tijolo da estufa, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. Recolocar o tijolo na estufa na mesma posição de antes;

d2) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa;

d3) Realizar os procedimentos d1 e d2 até obter peso final (até se realizar 3 medidas sem variar a massa do tijolo). Total de medições: Depende do tempo total de processo.

e) De $t \text{ final} < t \leq t \text{ final} + 24 \text{ horas}$

e1) Após a etapa d3 ter sido atingida, recolocar o tijolo na estufa, e deixar o mesmo por 24 horas, na mesma temperatura de secagem, até atingir a massa de equilíbrio;

e2) Retirar o tijolo da estufa e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;

e3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa.

f) De $t_{\text{final}} + 24 \text{ horas} < t \leq t_{\text{final}} + 24 \text{ horas} + 24 \text{ horas}$

f1) Após a etapa 2 ter sido atingida, recolocar o tijolo na estufa, e deixar o mesmo por mais 24 horas, na temperatura de secagem de 105°C , até o tijolo atingir sua massa totalmente seco;

f2) Retirar o tijolo da estufa e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;

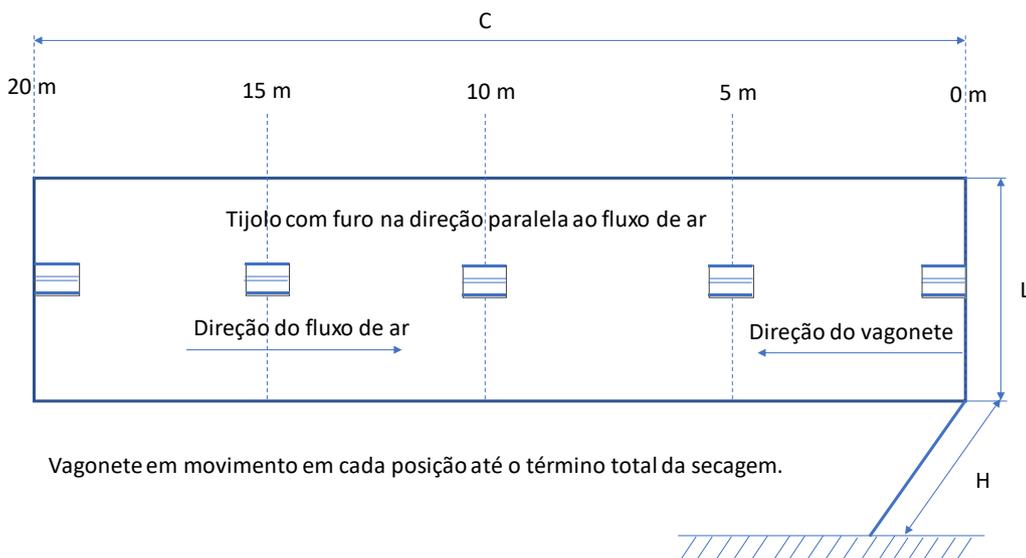
f3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo à estufa;

f4) Encerrar o experimento.

Observação: O experimento 2, foi repetido para as amostras dos tijolos, 2, 3, 4 e 5, o que equivale às amostras secas no secador, nos pontos 5 m, 10 m, 15 m e 20 m do experimento 1, foi repetido todo o procedimento de “a” até “f”.

5.1.1.3. Procedimentos para o experimento 3: Secagem do tijolo em pontos fixos no secador, vagoneta em movimento.

Figura 5.4 – Secagem com a vagoneta em movimento.



Fonte: Autor (2021).

Este experimento utilizou a mesma estrutura do experimento 1, ou seja, utilizou a estrutura do secador e fornalha, a diferença básica é que para este caso específico a amostra ficou em movimento dentro do secador.

Com relação ao tempo de ensaio, este durou 40 minutos, que foi um tempo bem menor quando comparado com o tempo dos experimentos 1 e 2 que duraram dias.

Os tijolos/amostras ao saírem da máquina, foram colocados em uma vagoneta a mesma se movimentou a uma velocidade 1 m/min, em um movimento de ir e vir.

Metade dos tijolos foram colocados na vagoneta, com o furo paralelo ao fluxo de ar de secagem, a outra metade dos tijolos foram colocados com os furos perpendiculares ao fluxo de ar de secagem.

Para cada 5m metros percorridos, eram retiradas as amostras e feitas as seguintes medidas: massa do tijolo, temperatura no vértice, dimensões do tijolo, velocidade do ar no interior do secador, temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador, após a coleta dos dados a amostra era recolocada na vagoneta e continuava o experimento.

Os dados obtidos no experimento, foram para os tempos: 0 minutos, 5 minutos, 10 minutos, 15 minutos, 20 minutos, 25 minutos, 30 minutos, 35 minutos e 40 minutos, e para as distâncias percorridas de: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m; 25m; 30m,35m e 40m.

No secador a cada 5m foram feitas janelas laterais, as amostras em movimento ao passarem em frente a estas janelas foram retiradas feitas as medidas e depois foram recolocadas dando continuidade ao experimento, conforme procedimento abaixo descrito.

Ensaio no secador, com as amostras em movimento.

Ponto 0 m:

a) Em $t=0$; $x=0m$ (Início do processo)

- a1) Medir a massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo. As dimensões estão indicadas na Figura 5.1;
- a2) Colocar o tijolo na vagoneta e iniciar o movimento da vagoneta na posição 0 m;
- a3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- a4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

b) Em $t=5$ min ($x= 5$ m)

- b1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- b2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- b3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- b4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

c) Em $t=10$ min ($x= 10$ m)

- c1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- c2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- c3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- c4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

d) Em $t=15$ min ($x= 15$ m)

- d1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- d2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- d3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- d4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

e) Em $t=20$ min ($x= 20$ m)

- e1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- e2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- e3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- e4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

f) Em $t=25$ min ($x= 15$ m na volta)

- f1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- f2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- f3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- f4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

g) Em $t=30$ min ($x= 10$ m na volta)

- g1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- g2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- g3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- g4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

h) Em $t=35$ min ($x= 5$ m na volta)

- h1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- h2) Recolocar o tijolo na vagoneta, no interior do secador;
- h3) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- h4) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

i) Em $t=40$ min ($x= 0$ m na volta)

- i1) Retirar o tijolo do secador, e fazer as medições de massa, temperatura no vértice e dimensões do tijolo;
- i2) Medir a temperatura, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador;
- i3) Medir a temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador;
- i4) Encerrar o experimento.

5.1.2 Equipamentos e instrumentos utilizados nas medições experimentais.

Neste item será descrito os equipamento e instrumentos e a forma como eles foram utilizados para efetuarem as medidas dos dados obtidos nos experimentos realizados no secador, na estufa e no interior do galpão.

- Termo anemômetro AKROM KR 835, com faixa de medição 0,4 a 30m/s, resolução 0,1 e exatidão 3%, este equipamento foi utilizado para medir a velocidade do ar de secagem no interior do secador, nos pontos pré-estabecidos no experimento;

- Termo higrômetro station TFA 3030.15 , foi utilizada para medir a umidade relativa do ar de secagem dentro do secador e na estufa, também foi utilizada para medir a umidade relativa do ar do meio externo;

- Painel com 5 indicadores de temperatura, alutal, conectados a 5 termopares K cromel, diâmetro 21,3mm, L 1000mm, em cada ponto do secador pré-estabelecido foi fixado um termopar;

- Balança de precisão BEL LG 3002 Bel LG 3202 ih, faixa de medição 0,01 a 3000g, foi utilizada para medir a massa do tijolo, conforme estabelecido no experimento;

- Estufa de secagem, digital, modelo BIO Sed 21L, temperatura de trabalho de 5°C a 250 °C, foi utilizada para secar o tijolo;

- Paquímetro digital, faixa de medição 0 a 25mm, foi utilizado para medir as dimensões do tijolo;

- Termômetro a laser Instrutherm TI-870, foi utilizado para medir a temperatura do vértice do tijolo.

5.2. Metodologia Matemática

5.2.1. Tratamento Estatístico dos Dados do Experimento

No processo de secagem do tijolo dentro do secador/protótipo, várias medições foram feitas sendo usadas como parâmetros, os quais posteriormente foram usados na análise matemática e na análise numérica do processo de secagem do tijolo.

Também foram medidos os seguintes parâmetros: Teor de umidade em base úmida ($M_{(b,u)}$), Massa de água (m_{H_2O}), Massa seca (m_s), Teor de umidade em base seca ($M_{(b,s)}$), Volume do tijolo (V_{ti}), Teor de umidade adimensional (M^*), Área do tijolo (A_{ti}), Temperatura adimensional (θ^*).

Massa de água (m_{H_2O})

A massa de água (m_{H_2O}), contida em cada tijolo do experimento, foi medida através da equação 5.1, onde m_0 é a massa inicial do tijolo e m_s é a massa seca do tijolo.

$$m_{H_2O} = m_0 - m_s \quad (5.1)$$

Teor de Umidade em Base Seca ($M_{(b,s)}$)

O teor de umidade em base seca, de cada tijolo do experimento, foi medido utilizando a equação 5.2, para determinar o teor de umidade em base seca. Foram utilizadas as seguintes variáveis: massa de água do tijolo (m_{H_2O}), massa seca do tijolo (m_s).

$$M_{(b,s)} = m_{H_2O} / m_s \quad (5.2)$$

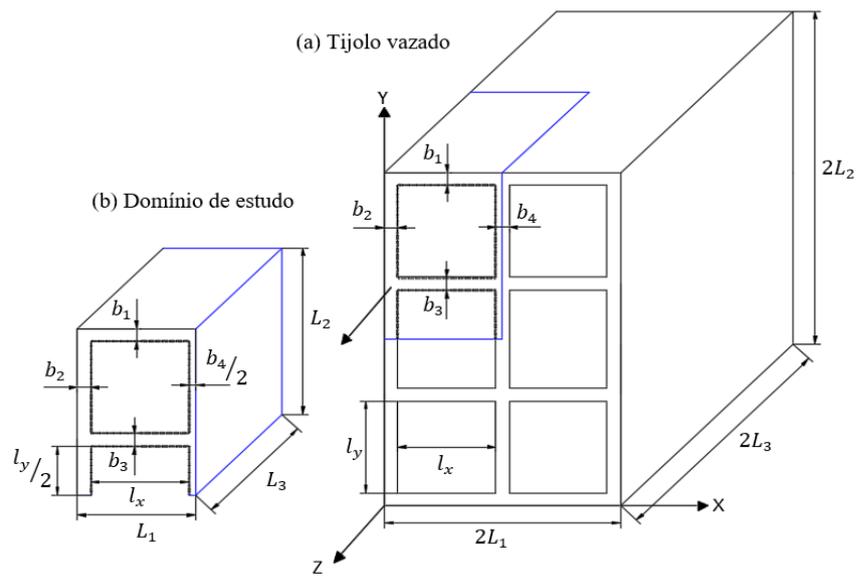
Teor de Umidade Adimensional (M^*)

O teor de umidade adimensional de cada amostra de tijolo, foi medido para os tempos estabelecidos no experimento, utilizando a equação 5.3, tomando como base, o valor do teor de umidade inicial (M_0), o valor do teor de umidade de equilíbrio (M_e), o valor do teor de umidade (M).

$$M^* = (M - M_e) / (M_0 - M_e) \quad (5.3)$$

Volume do Tijolo (V_{ti})

Figura 5.5 - Dimensões de estudo da amostra.



Fonte: Autor (2021).

Para cada medição, estabelecida no experimento, foi calculado o volume do tijolo, tomando como base a Figura 5.5, e as seguintes equações:

- Volume total do tijolo, incluindo os furos (V_t)

$$V_t = 2L_1 2L_2 2L_3 \quad (5.4)$$

- Volume total dos furos tijolo (V_f)

$$V_f = 6(l_x l_y 2L_3) \quad (5.5)$$

- Volume do tijolo (V_{ti})

$$V_{ti} = V_t - V_f \quad (5.6)$$

$$V_{ti} = 2L_1 2L_2 2L_3 - 6(l_{xy} 2L_3) \quad (5.7)$$

Área do Tijolo (A_{ti})

Para cada medição, estabelecida no experimento, foi calculada a área do tijolo, tomando como base a Figura 5.5 e a equação 5.8, onde A_e é a área das faces externas do tijolo e A_i é a área das faces internas do tijolo.

$$(A_{ti}) = A_e + A_i \quad (5.8)$$

Temperatura Adimensional (θ^*)

A temperatura adimensional (θ^*), medida para cada amostra de tijolo do experimento, foi feita utilizando a equação (5.9), onde (θ_e) é a temperatura de equilíbrio, (θ_0) temperatura inicial, (θ) temperatura do vértice do tijolo.

$$\theta^* = (\theta - \theta_e) / (\theta_0 - \theta_e) \quad (5.9)$$

5.3. Metodologia Numérica

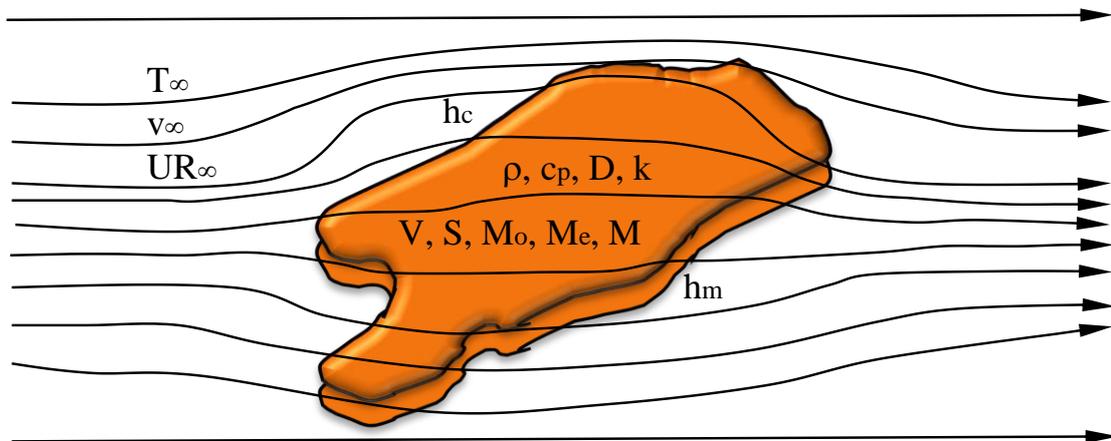
5.3.1. O Método da Capacitância Global

Para o entendimento do método da capacitância global (análise concentrada) considere um corpo sólido de forma arbitrária como ilustrado na Figura 5.6. O sólido pode receber (ou ceder) um fluxo de calor e/ou umidade por unidade de área em sua superfície e ter geração interna de massa e/ou energia por unidade de volume uniformemente distribuída. Admitindo que a umidade e/ou temperatura do sólido seja espacialmente uniforme em qualquer instante durante o processo transiente, isto é, que os gradientes de umidade e/ou temperatura no interior

do sólido sejam desprezíveis, todo o fluxo de massa e/ou calor recebido e massa e/ou calor gerado, difundirá instantaneamente através do mesmo.

Sendo assim, o método da capacitância global admite uma distribuição uniforme de massa e ou temperatura dentro do sólido em qualquer instante, de tal modo que, a temperatura ou teor de umidade do sólido seja dado exclusivamente em função do tempo.

Figura 5.6 - Esquema representativo do processo de secagem de um sólido com geometria arbitrária.



Na Figura 5.6, T_{∞} , v_{∞} e UR_{∞} representam a temperatura (K ou °C), velocidade (m/s) e umidade relativa (%) do meio externo, respectivamente, h_c é o coeficiente de transferência de calor convectivo (W/m^2K); h_m é o coeficiente de transferência de massa convectivo (m/s); V é o volume do sólido homogêneo (m^3); S é a área superficial do sólido homogêneo (m^2); ρ é a densidade do sólido homogêneo (kg/m^3); c_p é o calor específico (J/kgK); D é o coeficiente de difusão de massa (m^2/s); k é a condutividade térmica ($W/m.k$); M é o teor de umidade do produto em qualquer intervalo de tempo (kg de água/kg de produto seco); M_0 é o teor de umidade inicial do produto (kg de água/kg de produto seco) e M_e é o teor de umidade de equilíbrio (kg de água/kg de produto seco).

Aplicando um balanço de massa e energia num elemento infinitesimal na superfície do sólido, em qualquer sistema de coordenadas, assumindo propriedades termo-físicas constantes e variações dimensionais desprezíveis, tem-se as seguintes equações de conservação de massa e energia, respectivamente:

$$V \frac{d\bar{M}}{dt} = -M''S + M'''V \quad (5.10)$$

$$\rho V c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = -q''S + q'''V \quad (5.11)$$

Onde t é o tempo (s); M'' é o fluxo de massa por unidade de área (kg de água/kg de produto seco/s/m²); M''' é a geração de massa por unidade de volume (kg de água/kg de produto seco/s/m³); q'' é o fluxo de calor por unidade de área (W/m²); q''' é a geração de calor por unidade de volume (W/m³) e Θ é a temperatura do sólido homogêneo (K) ou (°C).

As quantidades, q'' , M'' , q''' e M''' podem ser positivas ou negativas, podendo também serem constantes ou dependentes do tempo. Particularmente com respeito à energia, a quantidade q'' pode ser convectiva, radiativa, evaporativa e/ou aquecimento de vapor. A presente formulação pode ser aplicada em regiões de transferência de calor e massa simultânea. O caso particular ocorre quando os dois fenômenos são completamente independentes. Os dois fenômenos são acoplados quando absorção (umidificação) ou dessorção (secagem) na região são acompanhadas de efeitos térmicos.

Diante do exposto, e sabendo que em muitas situações físicas e condições operacionais existe gradiente de umidade e temperatura dentro do sólido, sob que condições pode-se aplicar o método da capacitância global? É neste sentido que entra o número de Biot de transferência.

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

$$Bi = \frac{R_{\text{Cond}}}{R_{\text{Conv}}} = \frac{\frac{L_1}{\Gamma^\varphi S}}{\frac{1}{hS}} = \frac{hL_1}{\Gamma^\varphi} \quad (5.12)$$

onde Γ^{ϕ} pode ser a condutividade térmica do sólido ou o coeficiente de difusão de massa (difusividade de massa), h é o coeficiente de transferência de calor ou massa convectiva e L_1 é um comprimento característico de corpo, como por exemplo, a relação volume por área superficial do corpo.

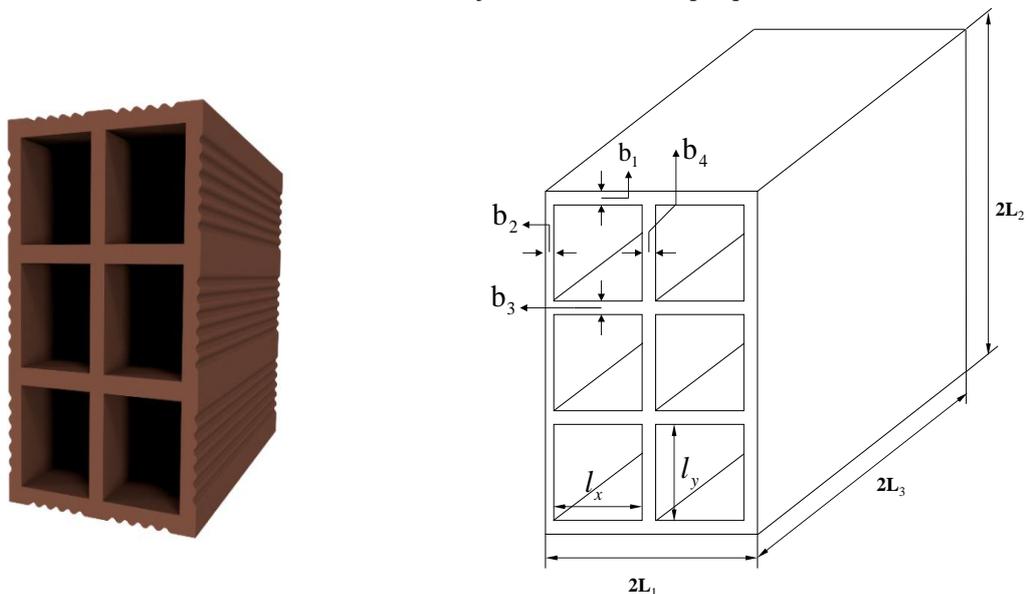
O número de Biot, tem um papel fundamental nos problemas de difusão que envolvem efeitos convectivos nas fronteiras. Para $Bi \ll 1$, os resultados experimentais sugerem supor uma razoável distribuição uniforme de M ao longo do corpo, em qualquer instante t , do processo transiente. Pode-se concluir que para a análise de um problema de difusão de massa e térmica, deve-se calcular o número de Biot e, uma vez sendo este inferior a 0,1, o erro associado ao uso do método da capacitância global é pequeno. Entretanto, este valor é dependente da forma como este parâmetro é definido.

5.3.2. Modelagem Matemática Fenomenológica Avançada

5.3.2.1. O Problema Físico e a Geometria

O problema físico a ser estudado é o processo de secagem (transferência de calor e massa) de tijolos cerâmicos industriais em estufa e secador convectivo, em diferentes condições operacionais e com tijolo em vagoneta estática ou em movimento. A Figura 5.7 ilustra a geometria tratada.

Figura 5.7 – Geometria e dimensões características do tijolo estudado nesta pesquisa.



5.3.2.2. O Modelo Matemático

Para modelar o processo de secagem de sólidos cerâmicos e argilosos com forma complexa, as seguintes considerações foram adotadas:

- (a) O sólido cerâmico é homogêneo e isotrópico;
- (b) A água migra do interior do tijolo na forma líquida e evapora na superfície;
- (c) O fenômeno de secagem ocorre por condução de calor e massa no interior do sólido e por convecção de calor e massa, evaporação e aquecimento do vapor produzido na superfície do mesmo.
- (d) As distribuições de umidade e temperatura no interior do sólido são uniformes durante todo o processo de secagem;
- (e) O sólido sofre variações dimensionais durante o processo de secagem e ambos, o volume e a área superficial do tijolo são iguais aos seus respectivos valores médios.
- (f) Os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos na superfície do tijolo são constantes;
- (g) As propriedades termo-físicas são constantes durante todo o processo de secagem;
- (h) Não há geração de massa ou energia durante o processo de secagem.

a) Modelo Geométrico e Dimensional

A partir das diversas medições das dimensões do tijolo, feitas durante o processo de secagem, desenvolveu-se equações matemáticas para calcular o volume total e a área superficial total do tijolo em cada instante do processo.

Assim, a partir destes dados determinou-se a média aritmética dos valores do volume e área superficial como segue:

$$\bar{V} = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{i=np} V_i \quad (5.13)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{np} \sum_{i=1}^{i=np} S_i \quad (5.14)$$

Onde V_i e S_i representam o volume e a área superficial do sólido úmido em cada instante do processo, respectivamente, e np , o número de pontos experimentais.

b) Equação Para Transferência de Massa

No caso de transferência de massa, M'' pode ser tratado nas formas de convecção de massa enquanto que, M''' pode ser dada, por exemplo, por geração de massa devido a reações químicas. Desde que \bar{M} é igual ao teor de umidade médio do material (em base seca), tem-se, por substituição direta na Equação (5.10):

$$V(t) \frac{d\bar{M}}{dt} = -h_m S(t)(\bar{M} - \bar{M}_e) + M'''V(t) \quad (5.15)$$

Fazendo $\bar{M}' = \bar{M} - \bar{M}_e$ tem-se que $d\bar{M}' = d\bar{M}$, sendo M_e o teor de umidade de equilíbrio. Assim, substituindo este resultado na Equação (5.15), usando a condição inicial $M(t=0)=M_0$, separando-se as variáveis, e aplicando a integral em ambos os lados da equação resultante, desde a condição inicial, pode-se escrever:

$$\int_{\bar{M}_0 - \bar{M}_e}^{\bar{M} - \bar{M}_e} \frac{dM'}{M' - \frac{V(t)M'''}{h_m S(t)}} = - \int_0^t \left(\frac{h_m S(t)}{V(t)} \right) dt \quad (5.16)$$

Aplicadas as considerações adotadas para o modelo pode-se escrever a Equação (5.16) como segue:

$$\int_{\bar{M}_0 - \bar{M}_e}^{\bar{M} - \bar{M}_e} \frac{dM'}{M'} = - \int_0^t \left(\frac{h_m \bar{S}}{V} \right) dt \quad (5.17)$$

Integrando-se a Equação (5.17) e aplicando o logaritmo na equação resultante, obtém-se o seguinte resultado:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e)}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e)} = \text{Exp} \left[\left(- \frac{h_m \bar{S}}{V} \right) t \right] \quad (5.18)$$

ou ainda,

$$\bar{M} = (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) \text{Exp} \left[\left(- \frac{h_m \bar{S}}{V} \right) t \right] + \bar{M}_e \quad (5.19)$$

Uma particularidade da Equação (19) se refere ao volume e área superficial do produto. Embora não se tenha levado em consideração as variações destes parâmetros geométricos em cada instante do processo, o efeito das variações dimensionais do sólido presente durante o processo de secagem, está sendo considerado em termos de seus valores médios, em vez de se usar seus valores no início (superestimativa) ou no final (subestimativa) do processo.

c) Equação Para Transferência de Calor e Massa Simultânea

Para a análise da transferência de calor, pode-se fazer analogia a transferência de massa e assumir que na superfície do sólido ocorre simultaneamente convecção térmica, evaporação e aquecimento do vapor produzido. Sendo assim, pode ser escrita da seguinte equação:

$$\rho_u V(t) c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = h_c S(t) (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + \rho_s V(t) \frac{d\bar{M}}{dt} [h_{fg} + c_v (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta})] + q'' V(t) \quad (5.20)$$

onde, c_v é o calor específico do vapor (J/kgK); h_{fg} é o calor latente de vaporização da água (J/kg); $\bar{\theta}_\infty$ é a temperatura do meio externo (K); $\bar{\theta}_0$ é a temperatura inicial do sólido (K); $\bar{\theta}$ é a temperatura instantânea do sólido (K); ρ_s é a massa específica do sólido seco (kg/m³); h_c é o coeficiente de transferência de calor (W/m²K).

Realizando a substituição das Equações (5.15) e (5.19) na Equação (5.20), pode-se escrever:

$$\rho_u \bar{V} c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = h_c \bar{S} (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + \rho_s \left[-h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \right) t \right] + M'' \bar{V} \right] [h_{fg} + c_v (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta})] + q'' \bar{V} \quad (5.21)$$

A Equação (20), é uma equação diferencial ordinária de primeira ordem, não-linear e não-homogênea, portanto, não pode ser resolvida de forma analítica. Assim, para simplificação desta equação desconsidera-se a energia necessária para aquecer o vapor d'água desde a temperatura na superfície do sólido até a temperatura do ar de secagem. Assim, tem-se como resultado:

$$\rho_u \bar{V} c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = h_c \bar{S} (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) + \rho_s h_{fg} \left\{ -h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \right) t \right] + M'' \bar{V} \right\} + q'' \bar{V} \quad (5.22)$$

Aplicado as considerações adotadas para o modelo, a Equação (5.22) reduz-se a:

$$\rho_u \bar{V} c_p \frac{d\bar{\theta}}{dt} = h_c \bar{S} (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}) - \rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e) \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \right) t \right] \quad (5.23)$$

ou ainda,

$$\frac{d\bar{\theta}}{dt} = \frac{h_c \bar{S} (\bar{\theta}_\infty - \bar{\theta})}{\rho_u \bar{V} c_p} - \frac{\rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e)}{\rho_u \bar{V} c_p} \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \right) t \right] \quad (5.24)$$

Admitindo $\bar{\theta}' = \bar{\theta}_\infty - \bar{\theta}$ então $\frac{d\bar{\theta}'}{dt} = -\frac{d\bar{\theta}}{dt}$. Assim, a Equação (5.24) pode ser reescrita da como segue:

$$\frac{d\bar{\theta}'}{dt} = -\frac{h_c \bar{S}}{\rho_u \bar{V} c_p} \bar{\theta}' + \frac{\rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e)}{\rho_u \bar{V} c_p} \text{Exp} \left[\left(-\frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \right) t \right] \quad (5.25)$$

A Equação (5.25) é uma equação diferencial ordinária linear não homogênea, que pode ser escrita como segue:

$$y' + ay = be^{-ct} \quad (5.26)$$

onde:

$$a = \frac{h_c \bar{S}}{\rho_u \bar{V} c_p} \quad (5.27)$$

$$b = \frac{\rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e)}{\rho_u \bar{V} c_p} \quad (5.28)$$

$$c = \frac{h_m \bar{S}}{\bar{V}} \quad (5.29)$$

A solução da EDO dada pela Equação (5.26) é da forma:

$$y(t) = d_1 e^{-at} + \frac{b}{a-c} e^{-ct} \quad (5.30)$$

Onde d_1 é a constante de integração, obtida a partir da aplicação da condição inicial na equação.

Usando a condição inicial $\bar{\Theta}(t = 0) = \bar{\Theta}_0$, na Equação (30) obtém-se como resultado:

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_\infty - \left[(\bar{\Theta}_\infty - \bar{\Theta}_0) - \left(\frac{b}{a-c} \right) \right] e^{-at} - \left(\frac{b}{a-c} \right) e^{-ct} \quad (5.31)$$

ou ainda,

$$\bar{\Theta} = \bar{\Theta}_\infty - \left\{ (\bar{\Theta}_\infty - \bar{\Theta}_0) - \left[\frac{\rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e)}{\rho_u \bar{V} c_p} \right] \right\} e^{-at} - \left[\frac{\rho_s h_{fg} h_m \bar{S} (\bar{M}_0 - \bar{M}_e)}{\rho_u \bar{V} c_p} \right] e^{-ct} \quad (5.32)$$

Uma particularidade nas Equações (19) e (32) se refere ao volume e área superficial do produto. Embora não se tenha levado em consideração as variações destes parâmetros geométricos em cada instante do processo, o efeito das variações dimensionais do sólido presente durante o processo de secagem, está sendo considerado em termos de seus valores médios, em vez de se usar seus valores no início (superestimativa) ou no final (subestimativa) destes parâmetros geométricos.

5.3.3. Tratamento Estatístico dos Dados

A partir dos dados do teor de umidade obtidos experimentalmente ao longo do processo de secagem, foi feito um ajuste de uma equação exponencial a 2 termos e 4 parâmetros, a estes dados experimentais. A equação tem a forma:

$$\frac{(\bar{M} - \bar{M}_e)}{(\bar{M}_0 - \bar{M}_e)} = A_1 \text{Exp}(k_1 t) + A_2 \text{Exp}(k_2 t) \quad (5.33)$$

onde t é dado em minutos. Neste procedimento usou-se o método numérico Simplex e quasi-Newton empregando o Software Statistica[®], com critério de convergência de 0,00099, em todas as condições de secagem.

Similarmente foi feito para a temperatura da superfície do tijolo. Neste caso, a equação proposta é dada a seguir:

$$(\theta_0 - \bar{\theta})/(\theta_0 - \theta_e) = B_1 + B_2 \times t + B_3 \times \text{Log}_2(t^m + B_4) \quad (5.34)$$

Onde t é dado em minutos. Neste caso, também se utilizou o método numérico Simplex e quasi-Newton empregando o Software Statistica[®], com critério de convergência de 0,00099, em todas as condições de secagem.

5.3.4. Estimação dos Parâmetros de Transporte

Com as soluções analíticas das equações de transferência de massa e calor, foram feitos ajustes dos resultados preditos encontrados com estas soluções e os resultados calculados a partir das Equações (5.33) e (5.34), para se estimar os parâmetros de processo, notadamente os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos, para as diferentes condições de secagem. Para isto, foram desenvolvidos dois programas computacionais no ambiente do software Mathematica[®], sendo um para obter-se h_m e outro para h_c . As estimativas destes parâmetros foram obtidas, baseando-se nos erros médios quadráticos, dados pelas seguintes equações:

$$\text{ERM} = \sum_{i=1}^{np} (\bar{M}_{\text{pred}} - \bar{M}_{\text{exp}})^2 \quad (5.35)$$

$$\text{ERT} = \sum_{i=1}^{np} \left[\frac{\bar{\theta}_{\text{pred}} - \bar{\theta}_{\text{exp}}}{\bar{\theta}_{\text{exp}}} \right]^2 \quad (5.36)$$

Onde np representa o número de pontos experimentais.

5.3.5 Propriedades Termofísicas do Produto e do Ar de Secagem

Para utilização do modelo matemático proposto, alguns parâmetros são necessários. Estes são dados a seguir.

a) Calor latente de vaporização da água (Pakowski et al., 1991):

$$h_{fg} = 352,58(374,14 - T)^{0,33052} \text{ (kJ/kg)} \quad (5.37)$$

Onde T é dado em °C.

b) Calor específico do tijolo (Araújo et al., 2020):

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

c) Densidade do sólido úmido e seco

A densidade do tijolo seco e úmido foram calculadas a partir dos dados experimentais de massa e dimensões, como segue:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (5.38)$$

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s} \quad (5.39)$$

Onde m_u , m_s , V_u e V_s representam a massa e o volume do tijolo, úmido e seco, respectivamente.

6. RESULTADOS E ANÁLISES PARA O SISTEMA PROPOSTO/SECADOR

Neste capítulo serão mostrados e analisados os resultados das secagens realizadas no interior do galpão no secador e na estufa, as referidas análises foram feitas, através de estudos experimentais, estudos matemáticos e numéricos.

Com relação a análise do secador, serão mostrados resultados financeiros em função da implantação do mesmo.

6.1 Resultados experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos através da realização de 4 experimentos, que foram: experimentos realizados no secador com a amostra estática, experimentos realizados na estufa, experimentos realizados no secador com a amostra em movimento dentro do secador e experimento realizado no interior do galpão no processo de secagem natural.

6.1.1 Perda de umidade, no processo de secagem natural no interior do galpão

A curva do Gráfico 6.1, apresenta descontinuidade, isto ocorre, com o objetivo de evidenciar as diferenças entre os empilhamentos dos tijolos, ou seja, cada seguimento da curva representa um empilhamento, que para este caso específico foram três empilhamentos.

Através das medições, verificou-se que os tijolos produzidos no dia três de julho foram conformados com um percentual médio de 18,45% de umidade, o que significa dizer que os tijolos saíram em média com 506,85 ml de água. Considerando que a produção deste dia foi de 45 mil tijolos, implica dizer que o volume total de água contida nos tijolos é de 22.808,25 litros. Esse volume/umidade será eliminado através do processo de secagem. A perda de umidade ocorrerá ao longo de nove dias e se dá como mostra a Figura 6.1, e Tabelas do Anexo A₀.

Figura 6.1- Perda de umidade.



Fonte: Autor (2021).

Observou-se, através das medições, que ao longo dos nove dias de secagem os tijolos perderam em média 330,86 ml, sendo que deste total, 175,57 ml foram perdidos nos dois primeiros dias, o que correspondeu a 53,06 % da perda total da umidade. Para o caso desta cerâmica, as trincas de secagem ocorrem nos dois primeiros dias de secagem, que é exatamente o tempo de maior perda de umidade, porém, sabe-se que a perda de umidade por si só não é a responsável pelas trincas. Para esta cerâmica, o principal agente causador de trinca é a secagem desigual, ou seja, um dos lados do tijolo, normalmente o lado mais exposto ao vento seca mais rápido, havendo contrações desiguais ao longo do tijolo, e conseqüentemente, ocorrência de trincas.

No primeiro empilhamento, que durou quatro dias, onde a pilha de tijolos era formada por sete fiadas, os tijolos perderam em média 230 ml, o que correspondeu a 69,51% da perda total da umidade. Apesar da perda de umidade ser bastante significativa, os tijolos continuam em média com 276,85ml de água. Esse volume remanescente impossibilita a realização da etapa da queima.

No segundo empilhamento, que durou três dias e teve nove fiadas na pilha, os tijolos perderam em média 83,15 ml, o que correspondeu a 25,18 % da perda total da umidade. Embora a perda de umidade tenha sido bastante significativa, os tijolos continuam em média com 193,7 ml de água, o que é bastante significativo. Novamente este volume impossibilita a realização do processo de queima.

O terceiro empilhamento durou dois dias. A pilha de tijolos era formada por doze fiadas. Neste período, os tijolos perderam em média 17,71ml, o que correspondeu a 5,35% da perda total da umidade. Foi uma perda pequena quando comparada com as perdas dos empilhamentos anteriores. Após este terceiro e último empilhamento, os tijolos continuam em média com 175,99ml de água, após o término do terceiro empilhamento, os tijolos foram conduzidos para os fornos, onde foram assados.

6.1.2 Tempo de queima

O tijolo entra no forno com 175,99ml de água remanescente. Esta água restante foi eliminada na queima, entretanto, sua eliminação implicou em um maior consumo de lenha, principalmente em função de um maior tempo de queima.

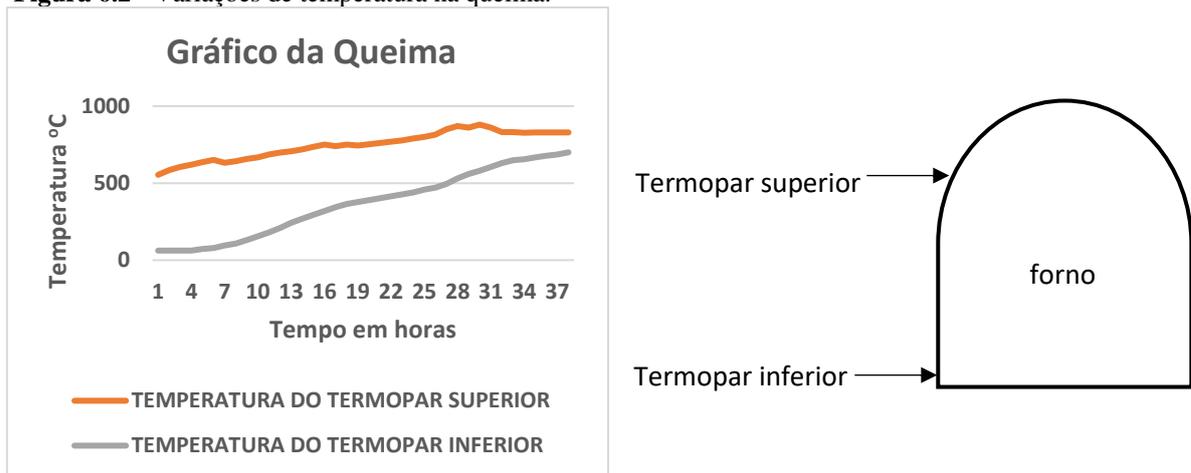
O tempo de queima foi de 49 horas, sendo que deste total 12 horas são de esquentar. O tempo total de queima pode variar para mais ou para menos, a depender de alguns parâmetros, como a umidade do tijolo, a qualidade da lenha, a umidade relativa do ar, a quantidade de tijolos

a serem assados e o clima - normalmente no período chuvoso o tempo de queima aumenta, podendo chegar a um acréscimo de até 10 horas.

As temperaturas de queima são medidas através de termopares conectados a um indicador de temperatura. Foram utilizados dois termopares por forno, onde um termopar foi colocado na parte superior do forno e o outro na parte inferior. A leitura foi feita a cada 60 minutos. A queima foi concluída ao atingir uma temperatura de 900°C na parte superior do forno e 700°C na parte inferior do forno.

As medições para o caso específico desta cerâmica começam após 12 horas de esquentar, ou seja, as variações de temperatura nas 12 primeiras horas não foram registradas. Esse período inicial é chamado de tempo de esquentar. Observa-se que a dificuldade maior foi fazer com que a temperatura da parte inferior do forno atinja 700°C. A Figura 6.2 possibilita a análise desse processo.

Figura 6.2 - Variações de temperatura na queima.



Fonte: Autor 2021.

6.1.3 Resultados e análises dos dados obtidos com a vagoneta estática, dentro do secador

A vagoneta ficou parada nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, respectivamente por um tempo que variou conforme mostram as Tabelas A1 a A5, do anexo A.

Para cada posição da vagoneta dentro do secador, foram realizadas as seguintes medidas: massa do tijolo, temperatura no vértice do tijolo, temperatura interna do secador, dimensões do tijolo, umidade relativa e velocidade do ar no interior do secador, temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

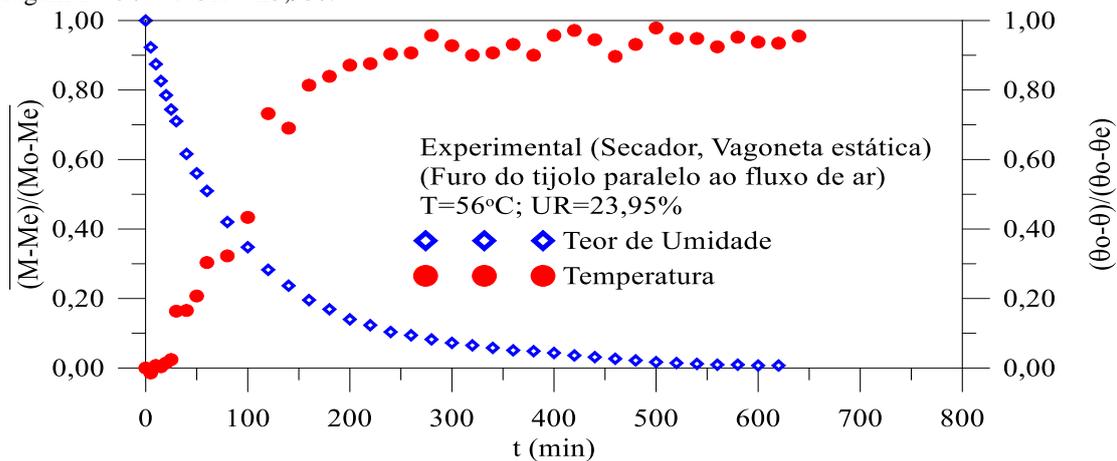
Com os dados obtidos através do experimento, foi possível determinar as seguintes variáveis: Teor de umidade em base úmida ($M_{(b,u)}$), Massa de água (m_{H_2O}), Massa seca (m_s),

Teor de umidade em base seca ($M_{(b,s)}$), Volume do tijolo ($V_{(ti)}$), Teor de umidade adimensional (M^*), Área do tijolo ($A_{(ti)}$), Temperatura adimensional (θ^*).

6.1.3.1 Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo

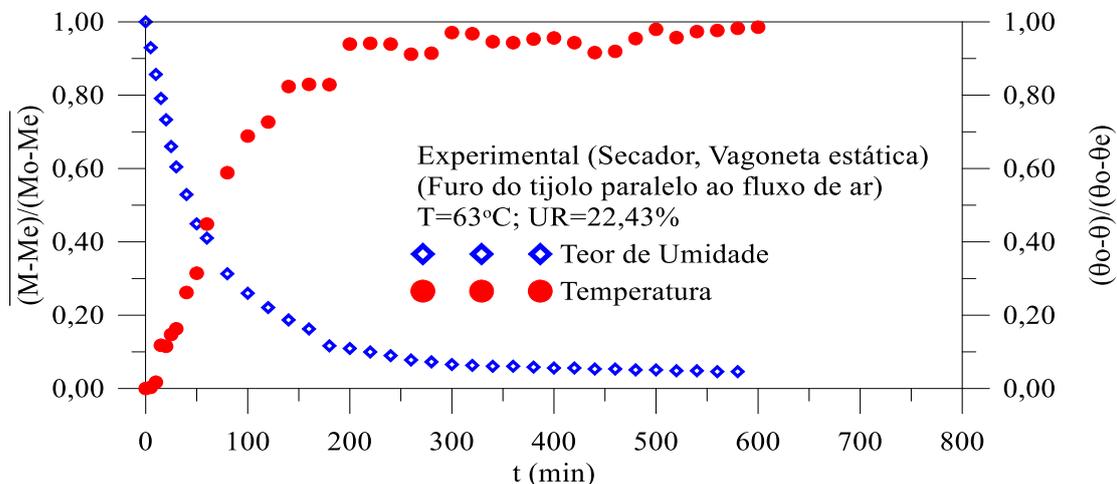
As Figuras 6.3 a 6.7 mostram as variações do teor de umidade e da temperatura em função do tempo. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura do secador, variando de 56°C a 85°C; umidade relativa, variando de 23,95% a 18,51%; tempo variando conforme mostram as Tabelas A1 a A5, do Anexo A; a posição da vagoneta, variando dos pontos: 0m a 20m; e o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Figura 6.3 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=56^\circ\text{C}$ e $UR=23,95\%$.



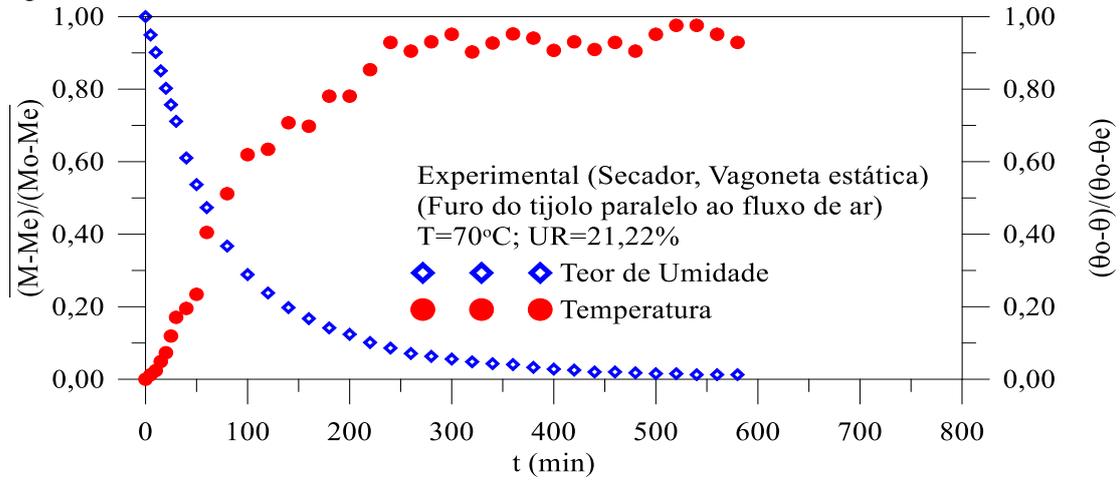
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.4 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=63^\circ\text{C}$ e $UR=22,43\%$.



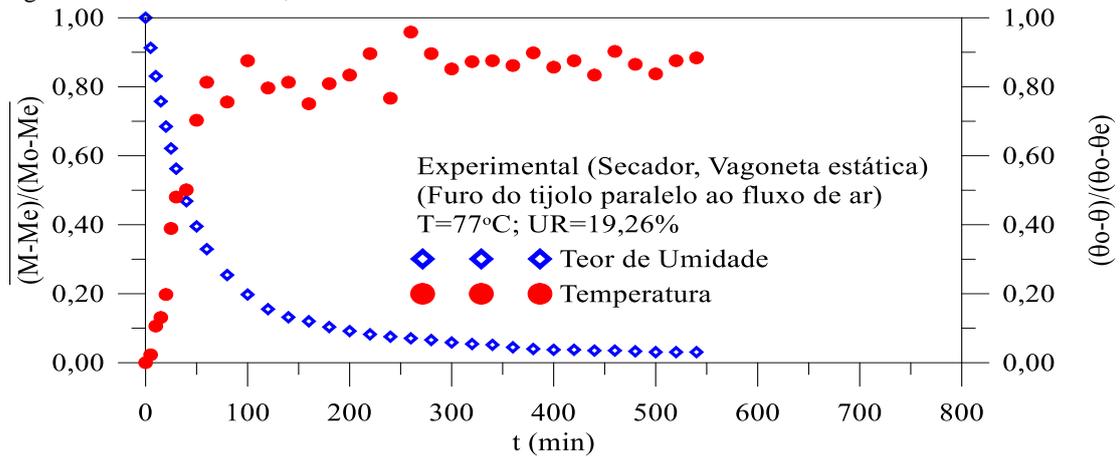
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.5 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=70^{\circ}\text{C}$ e $UR=21,22\%$



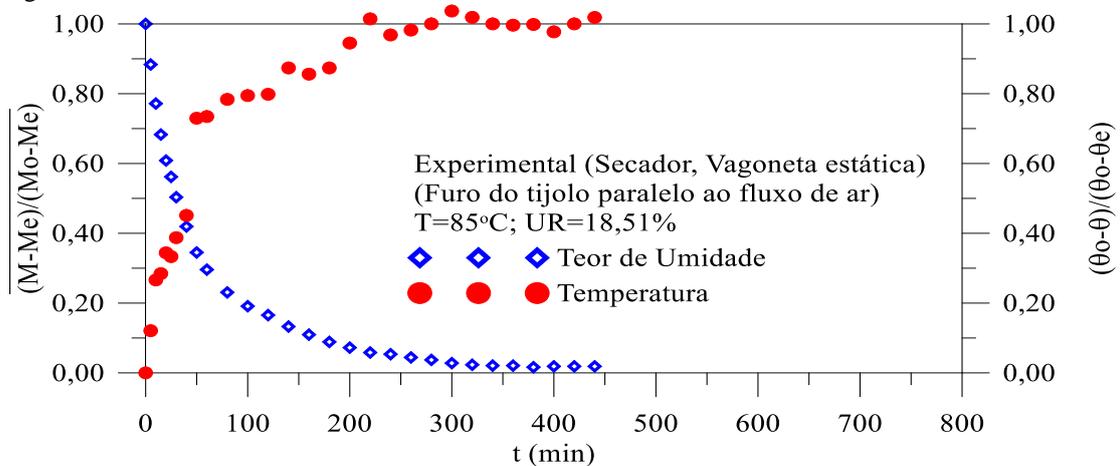
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.6 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=77^{\circ}\text{C}$ e $UR=19,26\%$.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.7 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=85^{\circ}\text{C}$ e $UR=18,51\%$

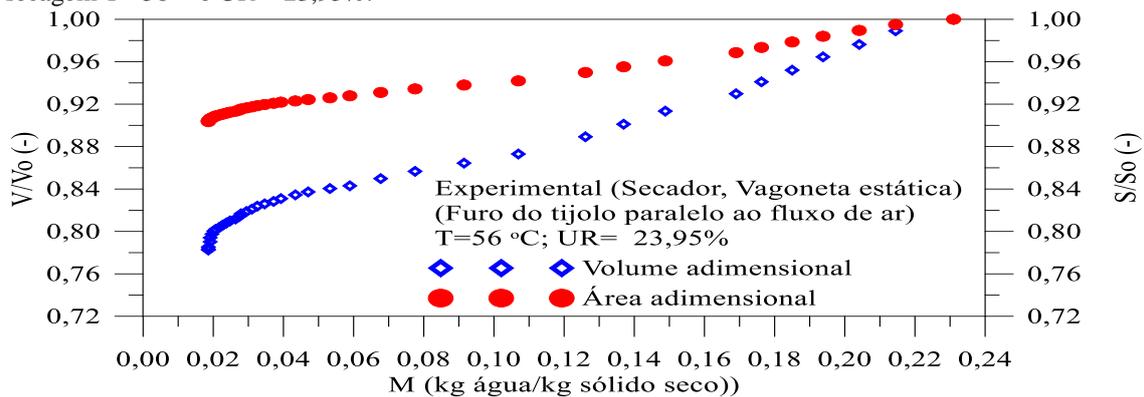


Fonte: Autor (2021).

6.1.3.2 Variação do volume e da área, em função do teor de umidade em base seca

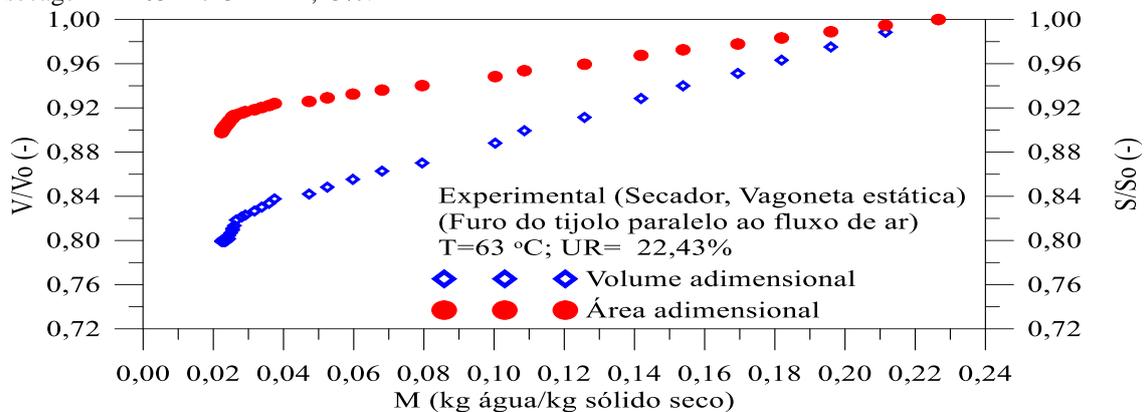
As Figuras 6.8 a 6.12 mostram as variações da área e do volume do tijolo, em função da umidade em base seca. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura do secador variando, de 56°C a 85°C; umidade relativa, variando de 23,95% a 18,51%, posição da vagoneta, variando de 0m a 20m; e o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Figura 6.8 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=56^{\circ}\text{C}$ e $UR=23,95\%$.



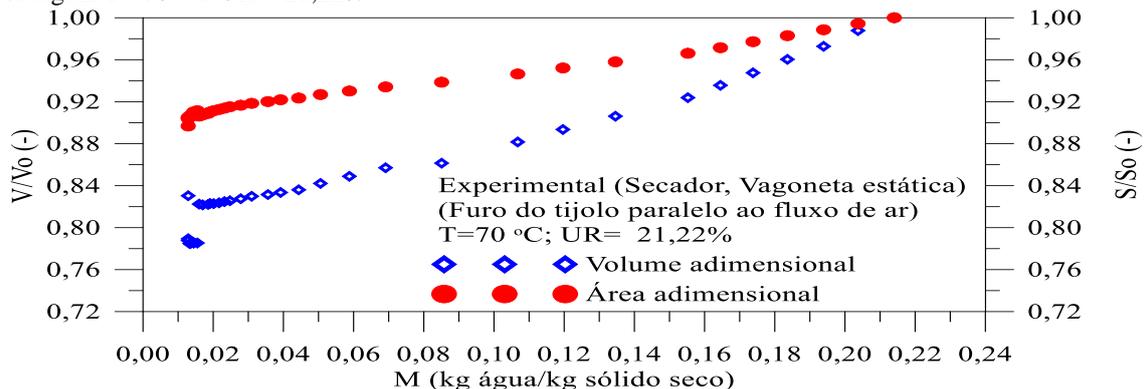
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.9 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=63^{\circ}\text{C}$ e $UR=22,43\%$.



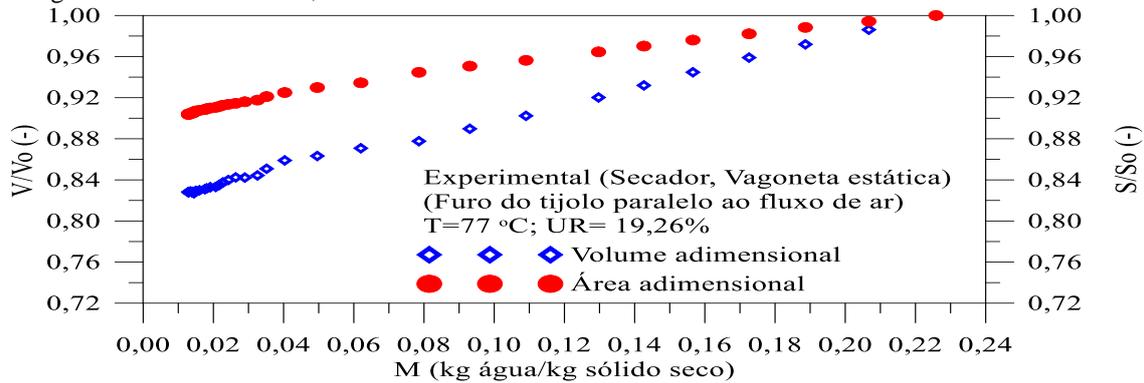
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.10 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=70^{\circ}\text{C}$ e $UR=21,22\%$.



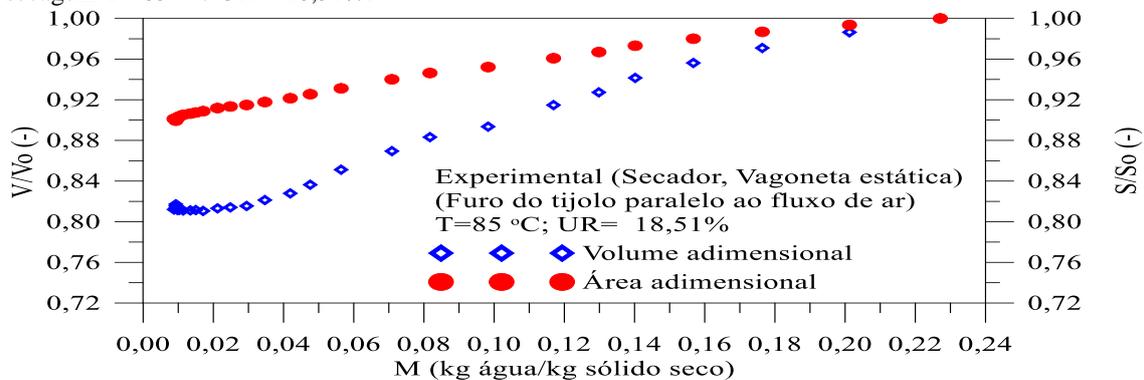
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.11 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=19,26\%$.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.12 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=18,51\%$.

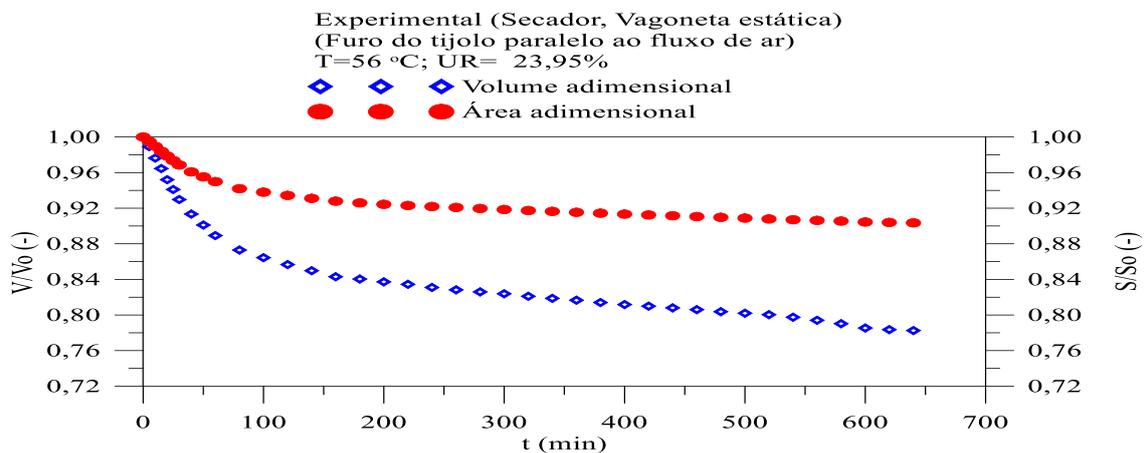


Fonte: Autor (2021).

6.1.3.3 Variação do volume e da área, em função do tempo de secagem

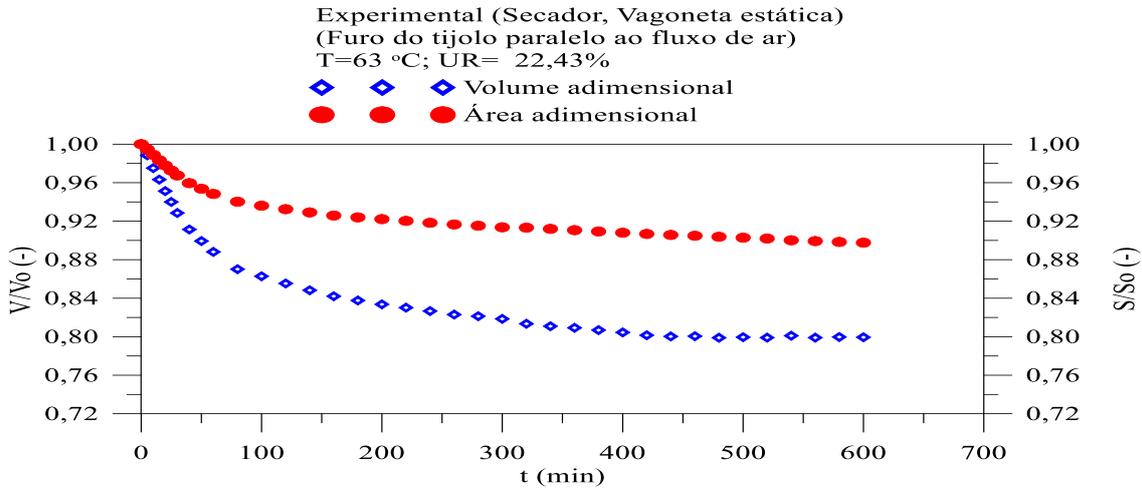
As Figuras 6.13 a 6.17 mostram as variações da área e do volume do tijolo, em função do tempo de secagem. Para obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura do secador, variando de $56\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $85\text{ }^{\circ}\text{C}$; umidade relativa, variando de $23,95\%$ a $18,51\%$, posição da vagoneta variando de 0m a 20m ; e o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Figura 6.13 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=23,95\%$.



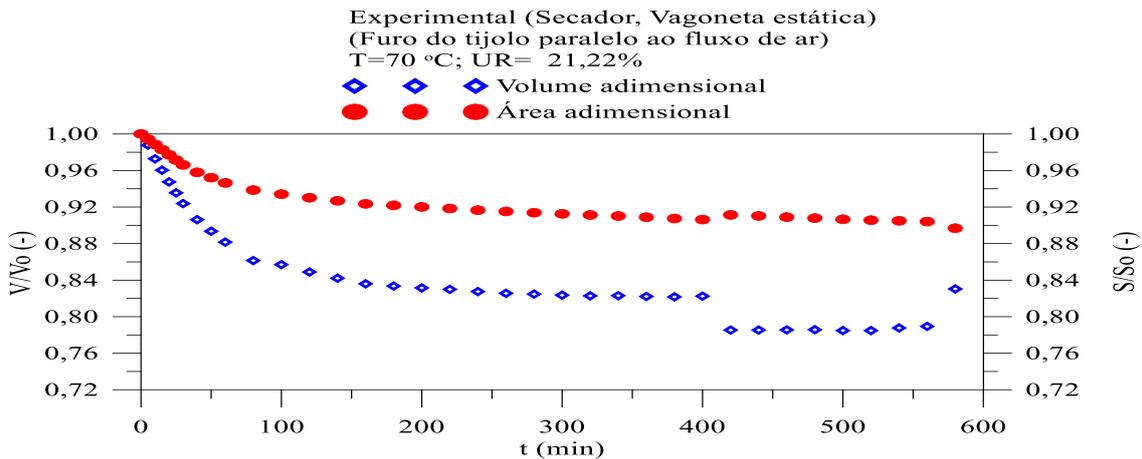
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.14 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 22,43\%$.



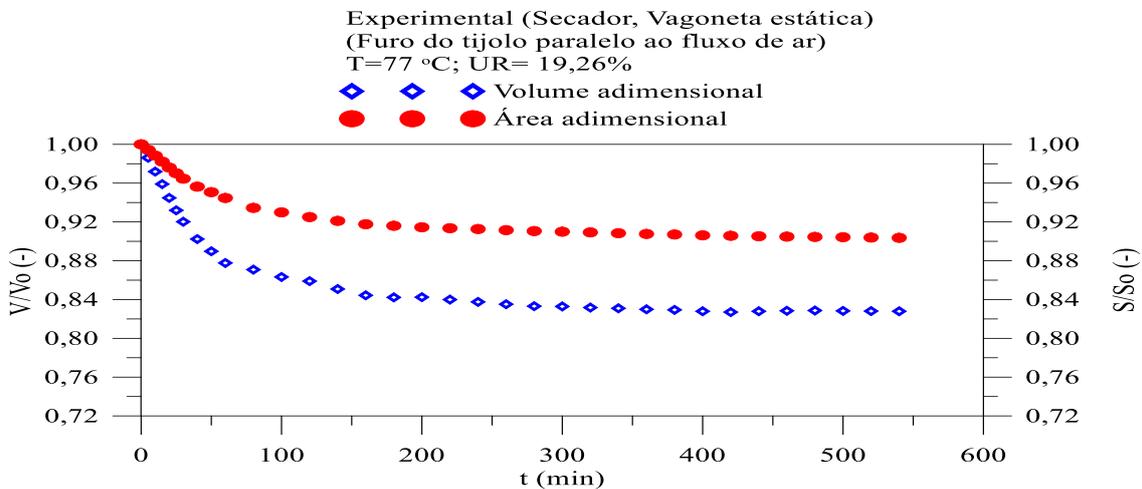
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.15 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 21,22\%$.



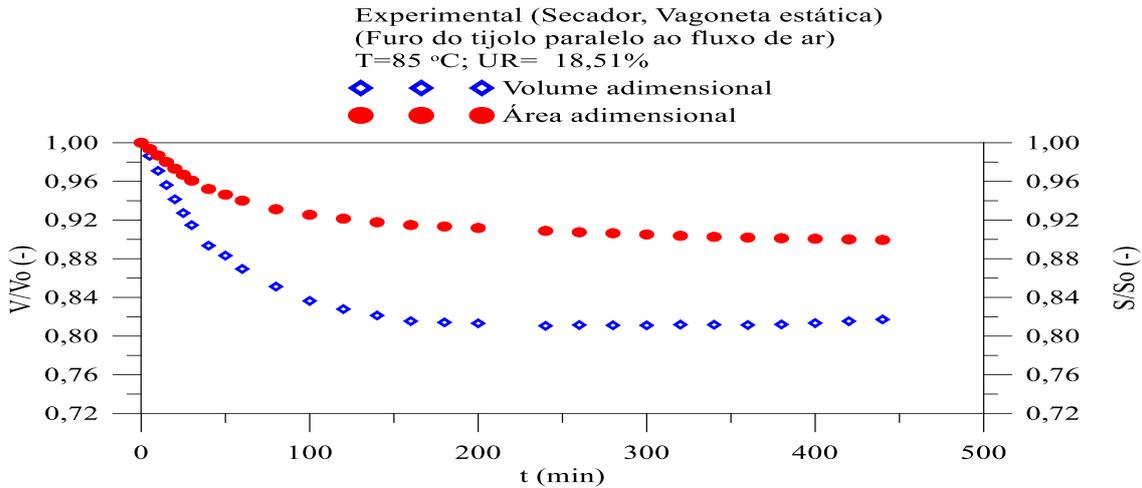
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.16 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 19,26\%$.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.17 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 85^\circ\text{C}$ e $UR = 18,51\%$.



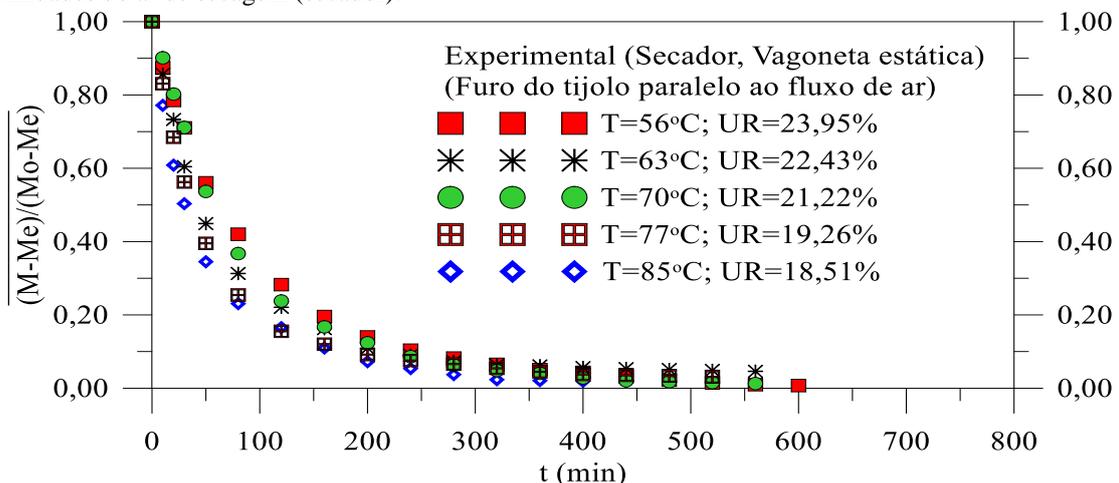
Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.18 mostra as variações de umidades ocorridas nas amostras dos tijolos, para as temperaturas: 56°C , 63°C , 70°C , 77°C , 85°C , e umidade do ar de secagem: 23,95%; 22,43%; 21,22%; 19,26%; 18,51%. As medidas foram feitas com a vagoneta parada dentro do secador, nos respectivos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m.

Através da Figura 6.18 e das Tabelas A1 a A5, do Anexo A, observa-se que quanto maior a temperatura, maior será a evaporação da água do tijolo, conseqüentemente, maior vai ser a perda de umidade.

Verifica-se na Figura 6.18, que o menor tempo de secagem ocorreu na amostra submetida à temperatura de secagem de 85°C e o maior tempo de secagem ocorreu na amostra submetida à temperatura de secagem de 56°C . Portanto, maior temperatura implica em menor tempo de secagem e menor temperatura implica em maior tempo de secagem.

Figura 6.18 – Comparação das variações dos teores de umidade, em função do tempo, para diferentes temperaturas e umidades do ar de secagem (secador).



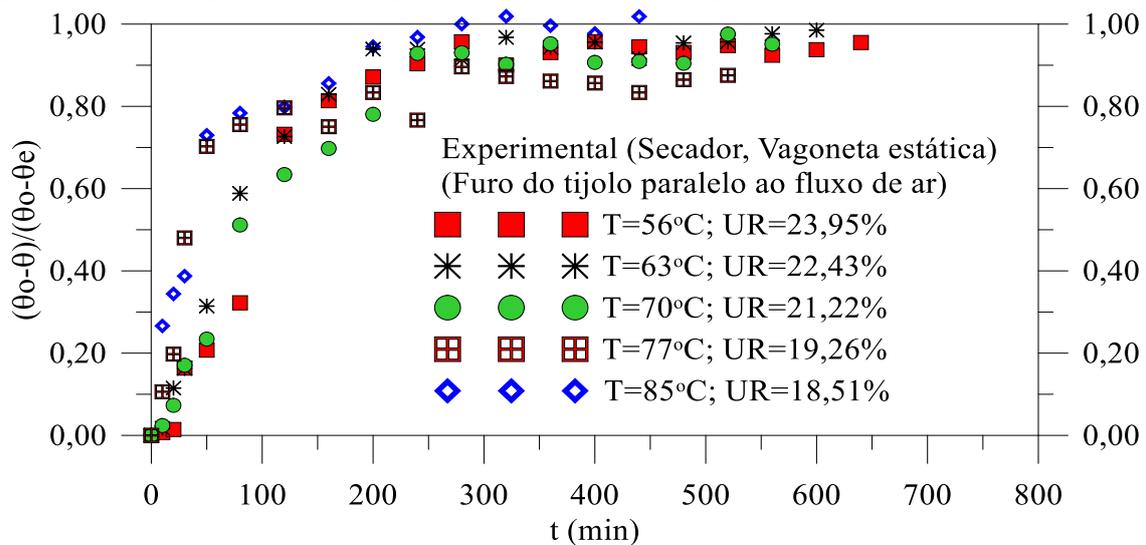
Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.19 mostra as variações de temperaturas ocorridas nas amostras dos tijolos para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem: 23,95%; 22,43%; 21,22%; 19,26%; 18,51%. As medidas foram feitas com a vagoneta estática dentro do secador, nos respectivos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m.

Através da Figura 6.19, verifica-se que quanto maior a temperatura, menor é o tempo para se conseguir a temperatura de estabilização, e isto ocorreu para a amostra submetida à temperatura de secagem de 85 °C, na posição 20m do secador.

O maior tempo para se chegar na temperatura de estabilização ocorreu na amostra submetida à temperatura de secagem de 56 °C. Portanto, menor temperatura implica em um maior tempo para se chegar à temperatura de estabilização, isto ocorreu na posição 0m do secador.

Figura 6.19 – Comparação das variações das temperaturas medidas no vértice do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem.



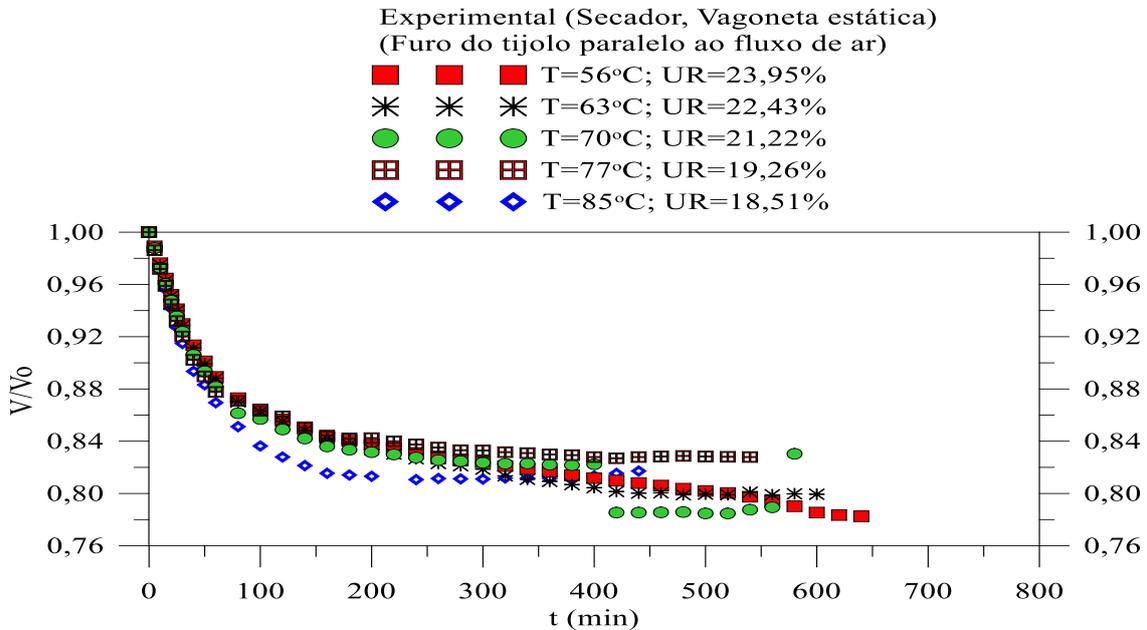
Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.20 mostra as variações dos volumes ocorridas nas amostras dos tijolos, para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem: 23,95%; 22,43%; 21,22%; 19,26%; 18,51%. As medidas foram feitas com a vagoneta parada dentro do secador, nos respectivos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m.

Para a Figura 6.20, verifica-se que quanto maior a temperatura, menor vai ser o tempo para a estabilização da variação de volume.

As variações de volume estão relacionadas com a perda de umidade da amostra, quanto maior a perda de umidade, maior será a retração do tijolo, conseqüentemente maiores serão as variações dos volumes.

Figura 6.20 – Comparação das variações dos volumes do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem.



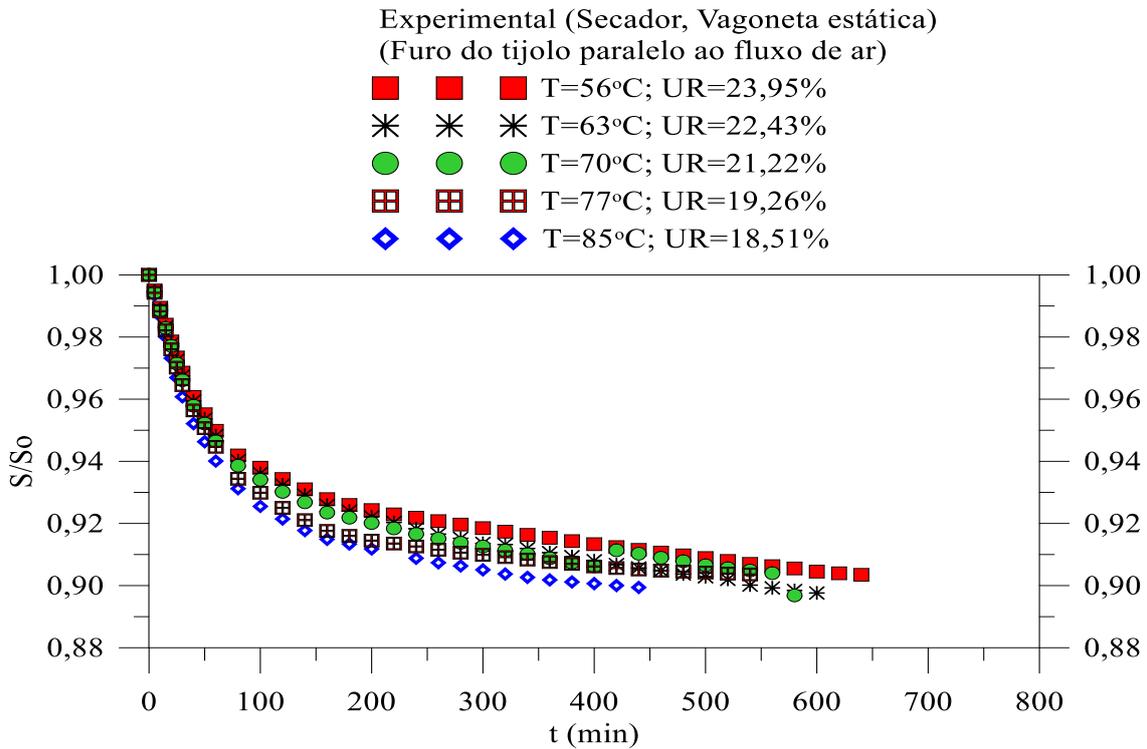
Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.21 mostra as variações de áreas ocorridas nas amostras dos tijolos para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem: 23,95%; 22,43%; 21,22%; 19,26%; 18,51%. As medidas foram feitas com a vagoneta parada dentro do secador, nos respectivos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m.

A variação da área da amostra do tijolo está relacionada com a perda de umidade, quanto maior a perda de umidade maior será a variação da área do tijolo; e a perda de umidade está relacionada com a temperatura.

Verifica-se através da Figura 6.21 que a curva mais acentuada é exatamente a curva do experimento realizado na temperatura de 85°C, no ponto 20m do secador, e a curva menos acentuada é a do experimento realizado à 56°C, no ponto 0m do secador. Os referidos pontos são exatamente os pontos extremos do secador. As demais curvas estão localizadas entre as duas curvas extremas. Isto já era esperado, pois as temperaturas relativas a estas curvas, estão entre 56°C e 85°C.

Figura 6.21 – Comparação das variações das áreas do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem.



Fonte: Autor (2021).

6.1.4 Resultados e análises dos dados obtidos, na secagem da amostra, utilizando estufa

Os tijolos ao saírem da máquina foram transportados para uma estufa onde foram ensaiados, objetivando com isto fazer um comparativo entre o processo de secagem do tijolo no secador e o processo de secagem na estufa.

As temperaturas utilizadas para a secagem do tijolo dentro da estufa são as mesmas temperaturas usadas para a secagem dentro do secador, que são respectivamente: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, que foram as temperaturas usadas nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, do secador.

Para cada temperatura de secagem do tijolo na estufa foram efetuadas as seguintes medidas: massa do tijolo, temperatura no vértice do tijolo, dimensões do tijolo, temperatura e umidade relativa do ar externo, conforme dados mostrados nas tabelas B1 a B5, do Anexo B.

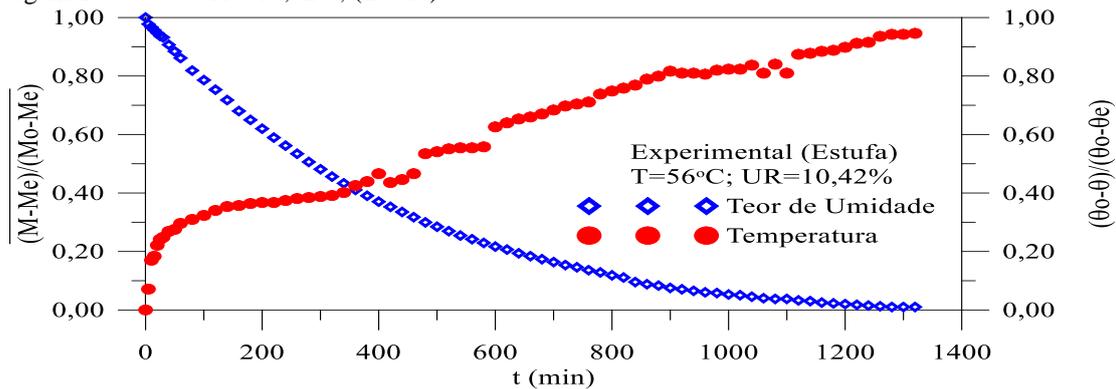
Com os dados obtidos através do experimento, foi possível determinar as seguintes variáveis da amostra do tijolo: Teor de umidade em base úmida ($M_{(b,u)}$), Massa de água (m_{H_2O}), Massa seca (m_s), Teor de umidade em base seca ($M_{(b,s)}$), Volume do tijolo (V_{ti}), Teor de umidade adimensional (M^*), Área do tijolo (A_{ti}), Temperatura adimensional (θ^*).

6.1.4.1 Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo

As Figuras 6.22 a 6.26 mostram as variações do teor de umidade e da temperatura em função do tempo. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura da estufa, variando de 56°C a 85°C; a umidade relativa, variando de 10,42% a 2,76%, o tempo, variando conforme Tabelas B1 a B5, do Anexo B.

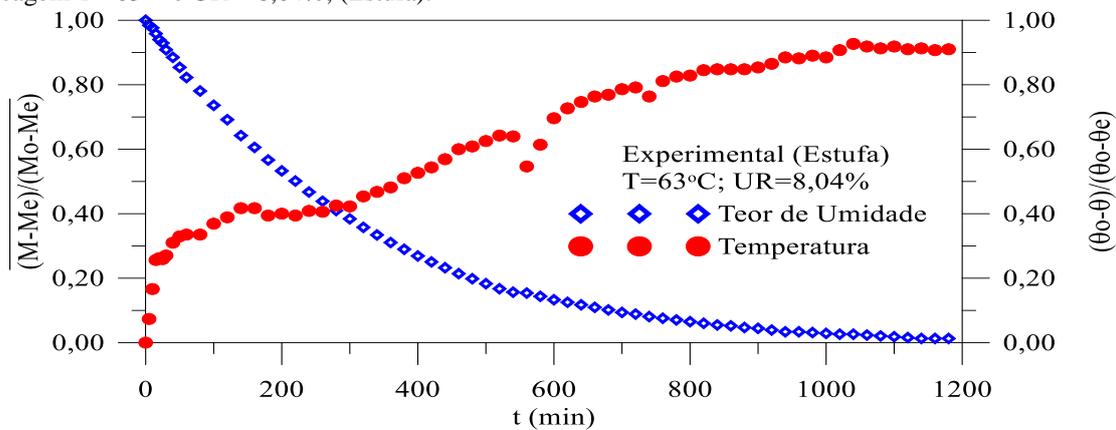
Observa-se, através dos referidos gráficos, que quanto maior a temperatura, menor é o tempo de secagem. Com relação às curvas de variações de temperatura, algumas apresentam quebras de continuidade, isto ocorreu porque os experimentos tinham durações superiores a um dia e isto fez com que eles fossem interrompidos e continuados no dia seguinte. Porém, no dia seguinte a temperatura do vértice do tijolo estava abaixo da temperatura do dia anterior, causando, portanto, as quebras nas curvas de variações de temperaturas.

Figura 6.22 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=56^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}=10,42\%$, (Estufa).



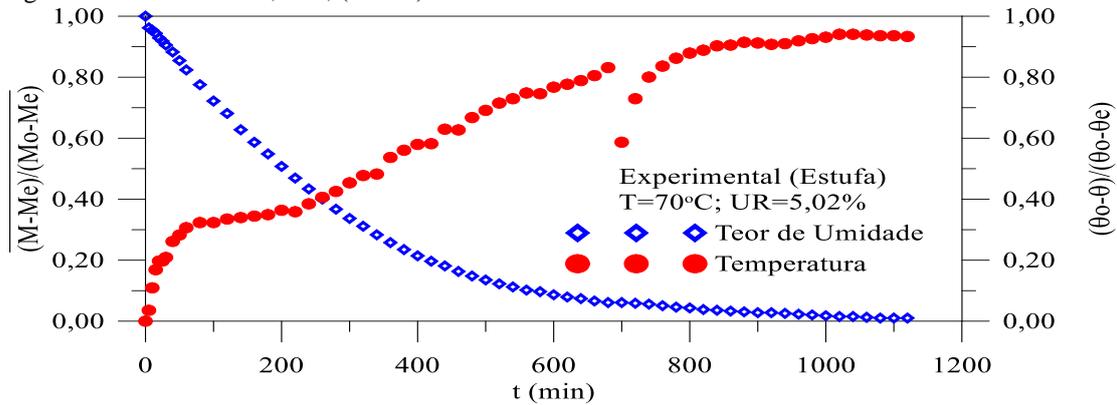
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.23 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=63^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}=8,04\%$, (Estufa).



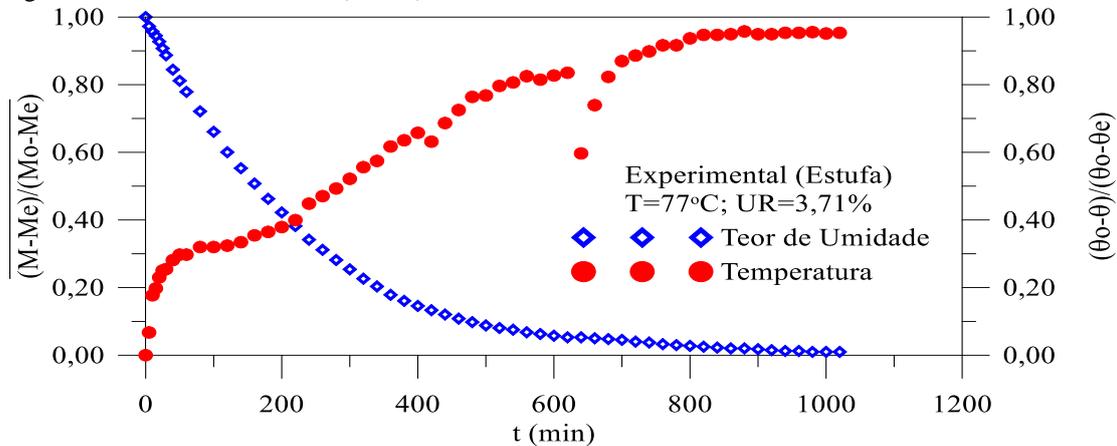
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.24 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=70^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}=5,02\%$, (Estufa).



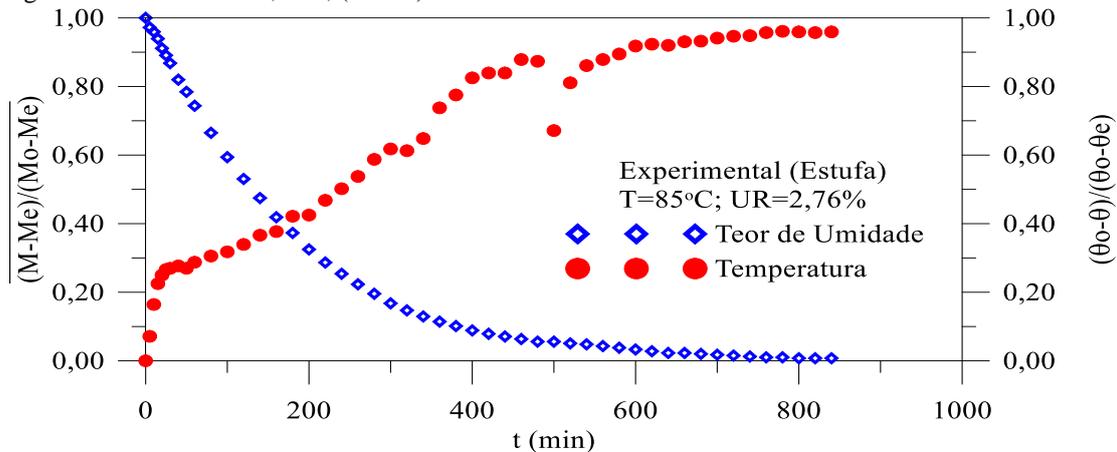
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.25 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=77^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}=3,71\%$, (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.26 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T=85^{\circ}\text{C}$ e $\text{UR}=2,76\%$, (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

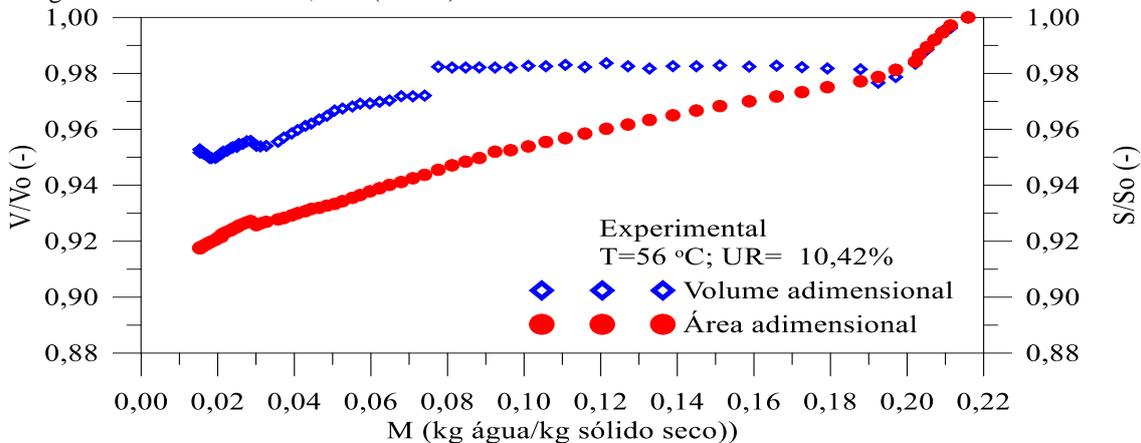
6.1.4.2 Variação do volume e da área, em função do teor de umidade em base seca

As Figuras 6.27 a 6.31 mostram as variações da área e do volume dos tijolos, em função da umidade em base seca. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura da estufa, variando de 56°C a 85°C; a umidade relativa, variando de 10,42% a 2,76%.

O tijolo, ao sair da máquina, tem aproximadamente 22% de água, que é a umidade em base seca. Para esta condição inicial $v/v_0=1$ pois $v=v_0$, da mesma forma $s/s_0=1$, pois $s=s_0$, quando o tijolo começa a secar, ocorre a diminuição da umidade em base seca.

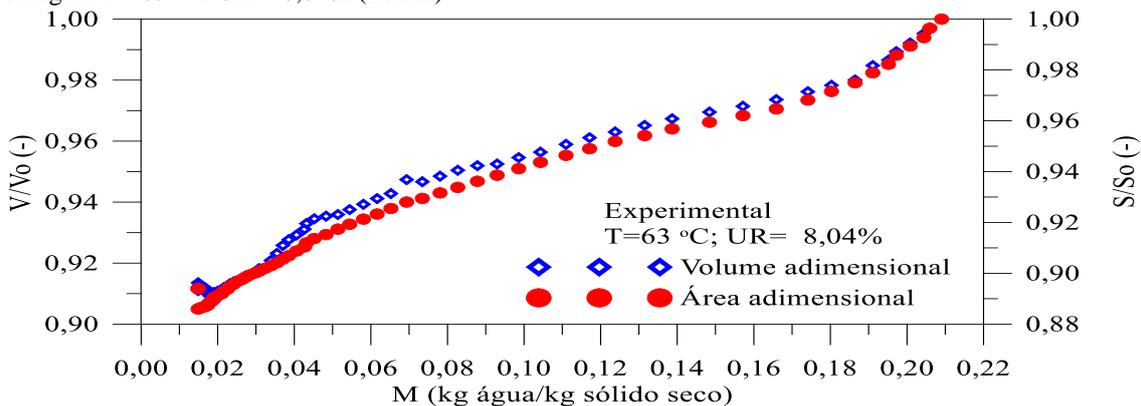
Através das Figuras 6.27 a 6.31 verifica-se que com a diminuição da umidade em base seca ocorre uma retração em função da evaporação da água contida no tijolo, conseqüentemente ocorrem reduções de volumes e áreas, as quais estão diretamente relacionadas com as temperaturas de secagem. Portanto, observa-se através dos gráficos que as curvas são mais acentuadas para as maiores temperaturas.

Figura 6.27 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=56\text{ }^\circ\text{C}$ e UR = 10,42% (Estufa).



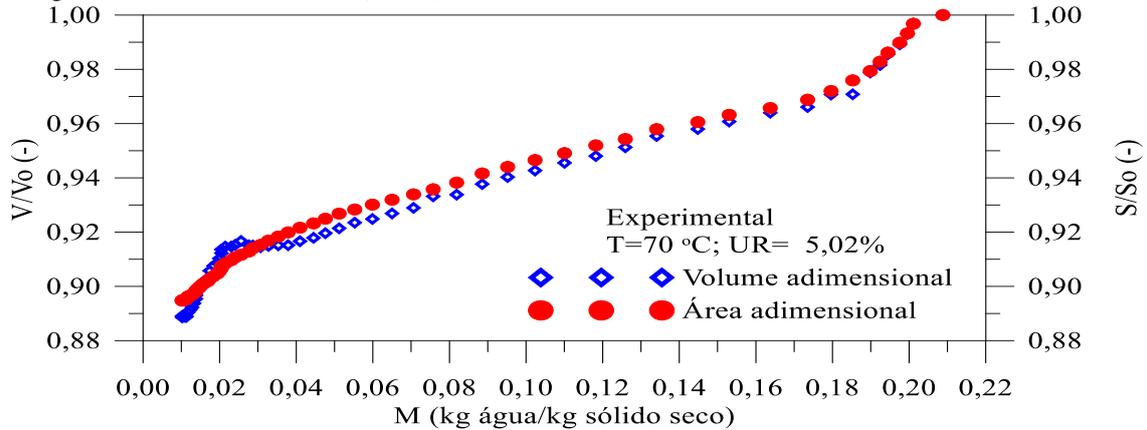
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.28 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=63\text{ }^\circ\text{C}$ e UR = 8,04% (Estufa).



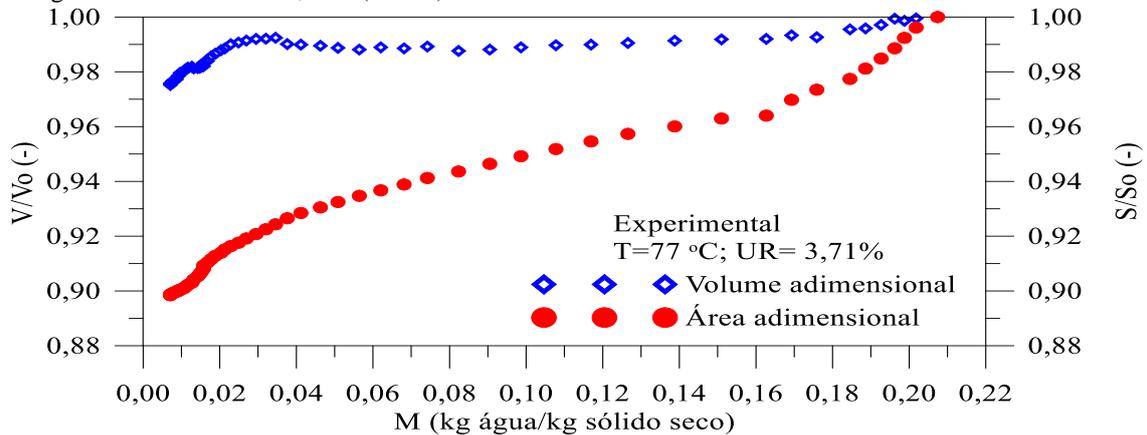
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.29 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=5,02\%$ (Estufa).



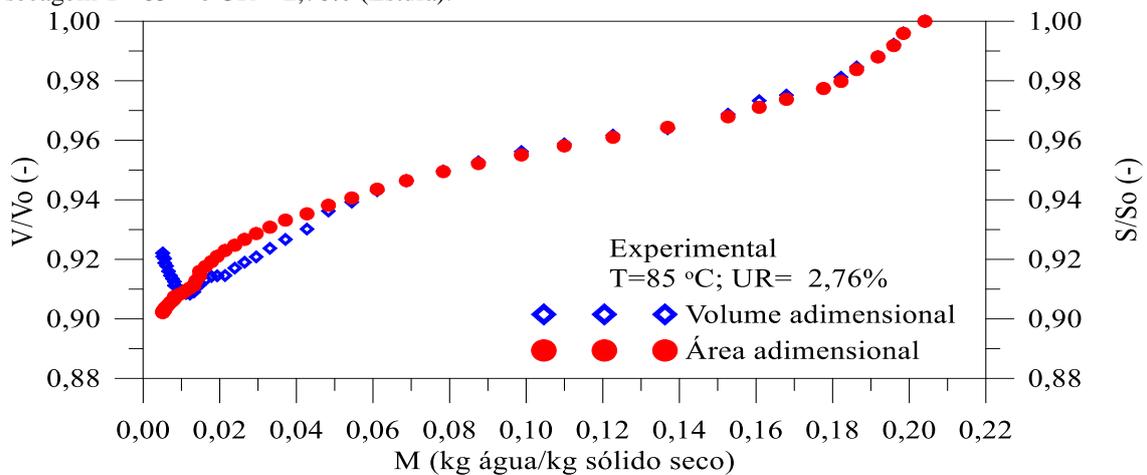
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.30 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=3,71\%$ (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.31 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem $T=85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR=2,76\%$ (Estufa).



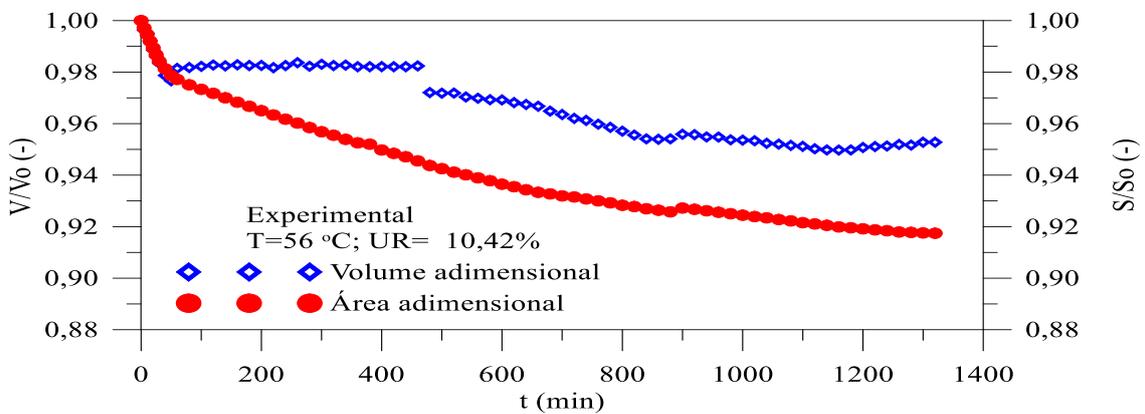
Fonte: Autor (2021).

6.1.4.3 Variação do volume e da área, em função do tempo

As Figuras 6.32 a 6.36 mostram as variações da área e do volume do tijolo, em função do tempo de secagem. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura da estufa, variando de 56°C a 85°C; a umidade relativa, variando de 10,42% a 2,76%, o tempo, variando conforme Tabelas B1 a B5, do Anexo B.

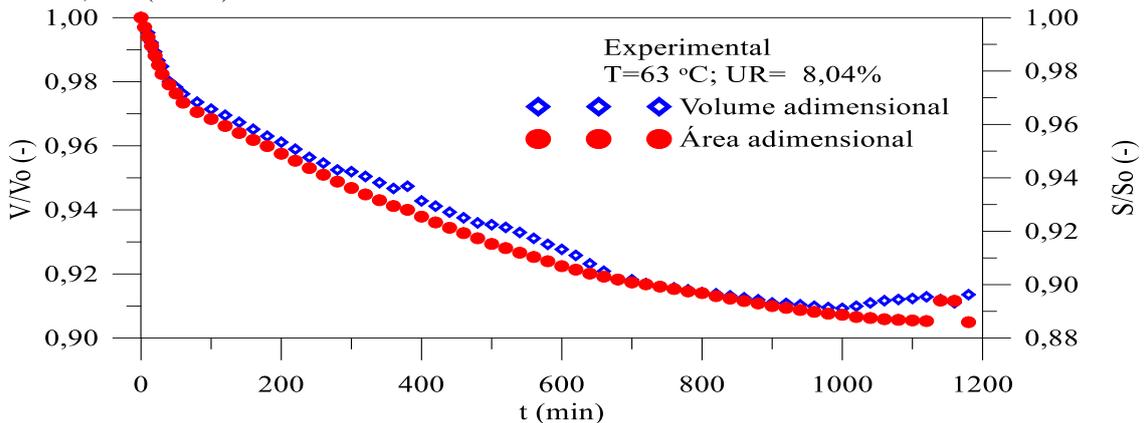
Através das Figuras 6.32 a 6.36 verifica-se que as curvas de volumes e áreas se acentuam com o aumento da temperatura, verifica-se também que quanto maior a temperatura do experimento, menor vai ser o tempo para o volume e a área se estabilizarem.

Figura 6.32 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 56\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 10,42\%$ (Estufa).



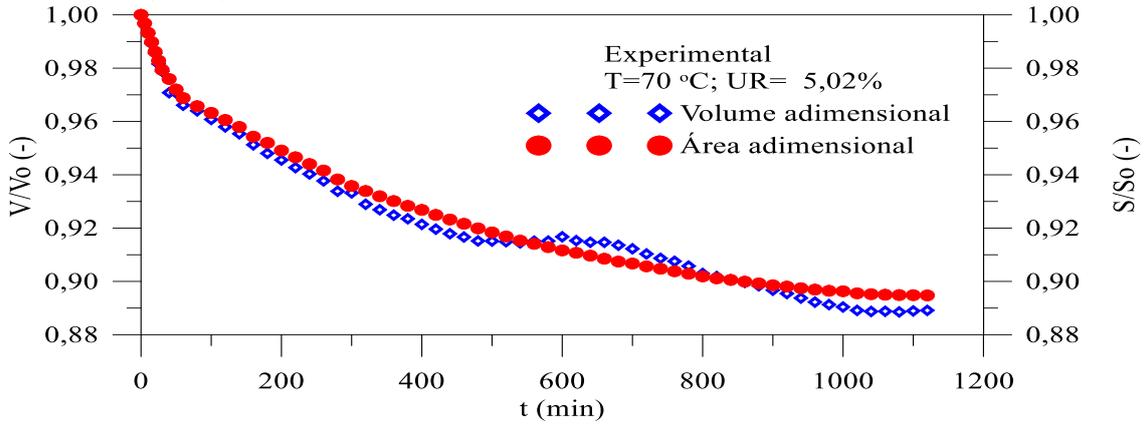
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.33 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T= 63\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 8,04\%$ (Estufa).



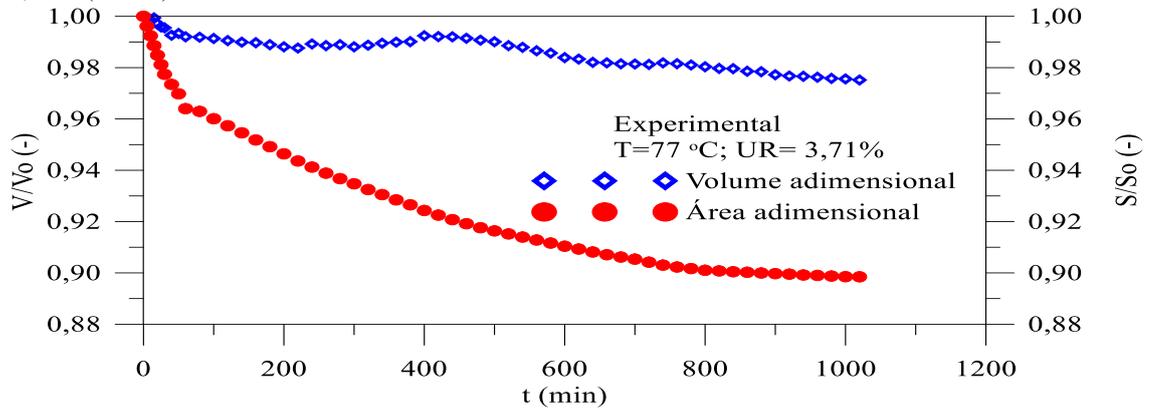
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.34 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 5,02\%$ (Estufa).



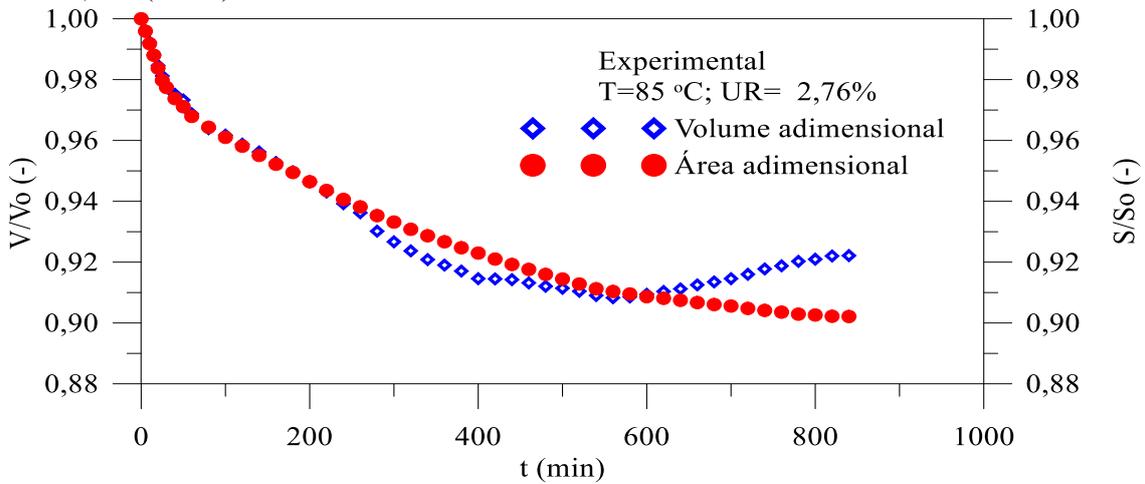
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.35 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 77\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 3,71\%$ (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.36 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR = 2,76\%$ (Estufa).

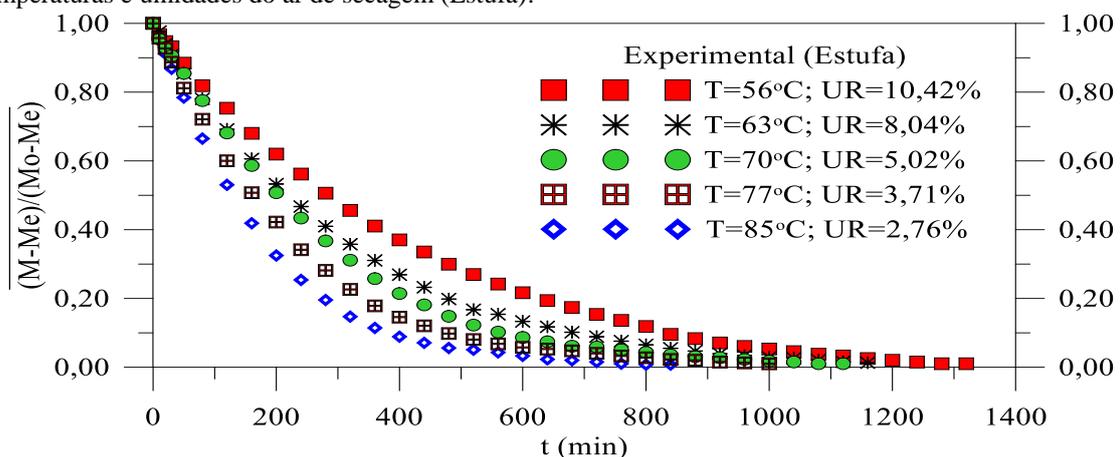


Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.37 mostra as variações do teor umidade ocorridas nas amostras dos tijolos para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem: 10,42%; 8,04%; 5,02%; 3,71%; 2,76%, as medidas foram feitas utilizando uma estufa.

As curvas da Figura 6.37 estão bem definidas e mostram a relação entre a temperatura do experimento, tempo de secagem, perda de umidade. É possível verificar que a curva mais acentuada foi a curva para a temperatura de 85°C, a referida curva também é a que conseguiu a estabilização da umidade em um menor intervalo de tempo, situação contrária ocorreu com a curva para a temperatura de 56°C. As outras temperaturas intermediárias geraram curvas intermediárias.

Figura 6.37 – Comparação das variações dos teores de umidade, em função do tempo, para diferentes temperaturas e umidades do ar de secagem (Estufa).

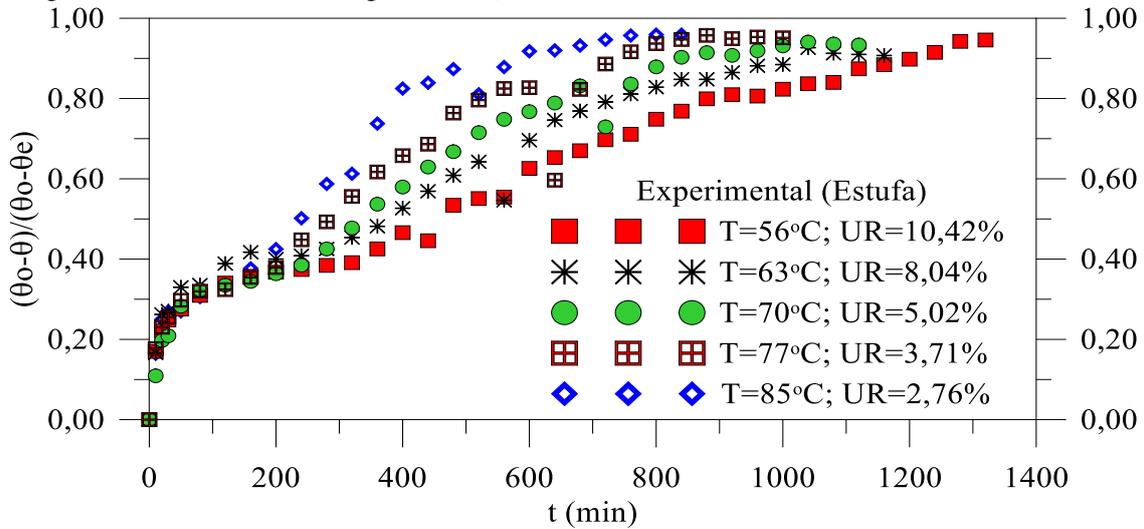


Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.38 mostra as variações de temperatura ocorridas nas amostras dos tijolos, para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem 10,42%; 8,05%; 5,02%; 3,71%; 2,76%, as medidas foram feitas no experimento realizado na estufa.

Através da Figura 6.38 observa-se que a curva que atinge a estabilidade da temperatura em um menor intervalo de tempo foi a curva para a temperatura de 85°C. O maior tempo para se chegar na temperatura de estabilização ocorreu na amostra submetida à temperatura de secagem de 56°C, portanto, menor temperatura implica em um maior tempo para se chegar à temperatura de estabilização.

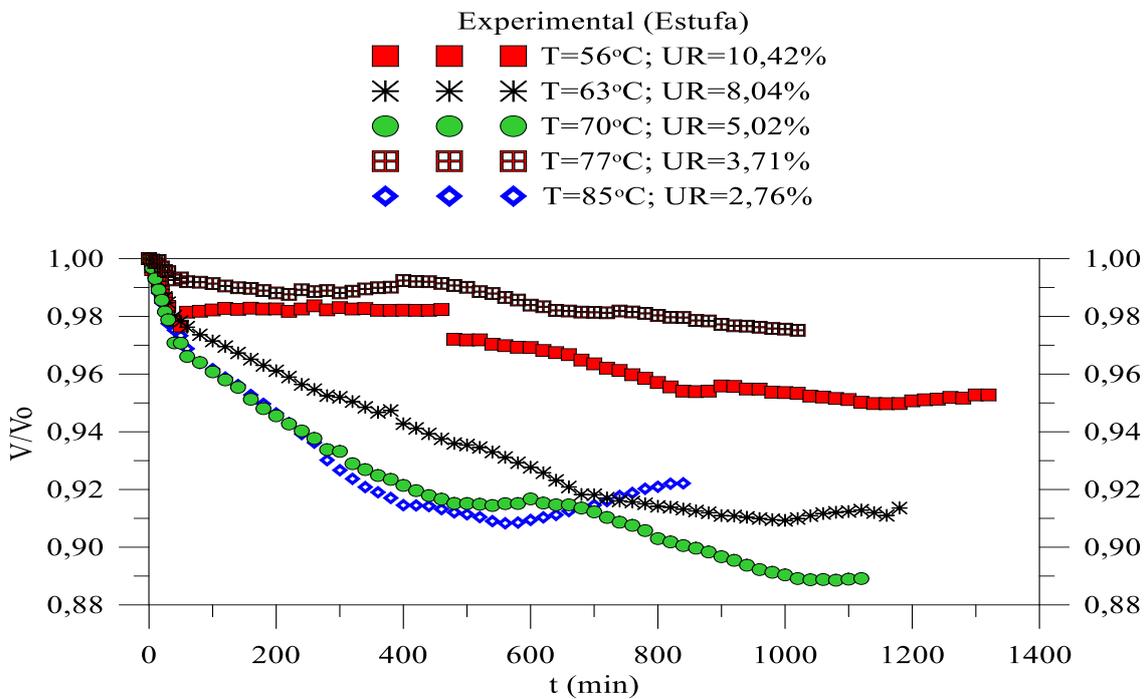
Figura 6.38 – Comparação das variações das temperaturas, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

A Figura 6.39 mostra as variações dos volumes ocorridos nas amostras dos tijolos para as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, e umidades do ar de secagem: 10,42%; 8,04%; 5,02%; 3,71%; 2,76%, as medidas foram feitas através do experimento realizado na estufa.

Figura 6.39 – Comparação das variações dos volumes do tijolo, em função do tempo, para diferentes temperaturas de secagem e umidades do ar de secagem (Estufa).



Fonte: Autor (2021).

6.1.5 Resultados e análises dos dados obtidos na secagem da amostra, com a vagoneta em movimento dentro do secador

Ao contrário do experimento 1, onde a amostra do tijolo ficou estática nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, para o caso específico deste experimento, as amostras ficaram em movimento dentro do secador e a cada 5min foram realizadas as medições.

Para este experimento, foi colocada uma amostra do tijolo com o furo paralelo ao fluxo de ar de secagem e a outra amostra do tijolo foi colocada com o furo perpendicular ao fluxo de ar de secagem.

A vagoneta com as amostras iniciou o seu movimento no ponto 0m do secador, deslocou até o ponto 20m, retornando em seguida para o ponto 0m. O tempo gasto de deslocamento da vagoneta no movimento de ida e volta foi de 40 min e o percurso foi de 40m.

Para cada posição da vagoneta dentro do secador, foram efetuadas as seguintes medidas: massa do tijolo, temperatura no vértice do tijolo, dimensões do tijolo, umidade relativa, velocidade do ar no interior do secador, temperatura e umidade relativa do ar externo ao secador.

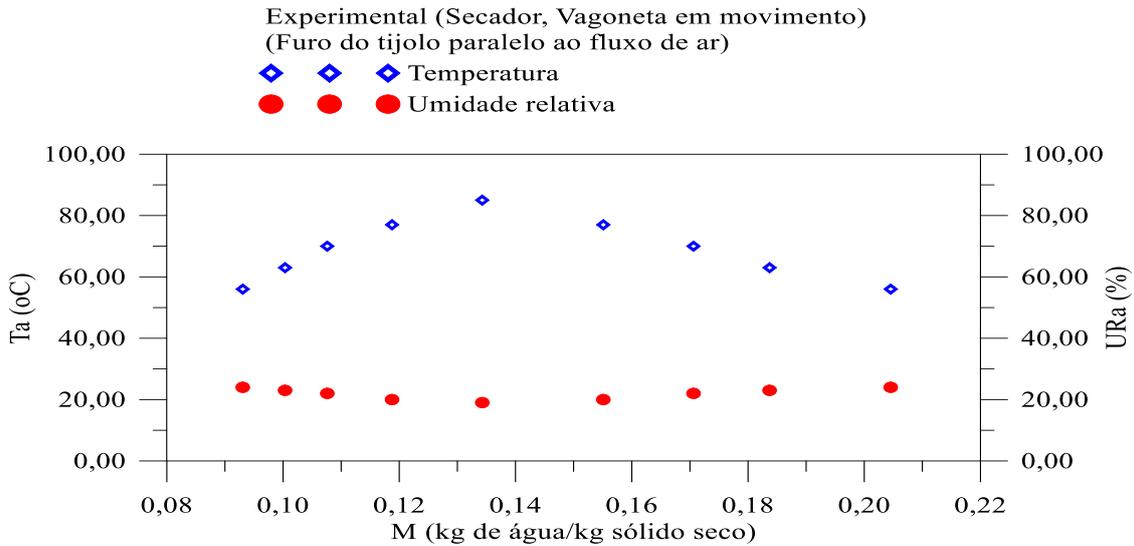
Tal como nos experimentos 1 e 2, onde a amostra ficava estática, para este experimento onde a amostra fica em movimento, foram determinadas as seguintes variáveis: Teor de umidade em base úmida ($M_{(b,u)}$), Massa de água (m_{H_2O}), Massa seca (m_s), Teor de umidade em base seca ($M_{(b,s)}$), Volume do tijolo (V_{ti}), Teor de umidade adimensional (M^*), Área do tijolo (A_{ti}), Temperatura adimensional (θ^*).

6.1.5.1 Variação da temperatura e umidade relativa

As Figuras 6.40 e 6.41 mostram as variações das temperaturas e umidades ocorridas dentro do secador para os pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, em função da umidade em base seca e do tempo, respectivamente.

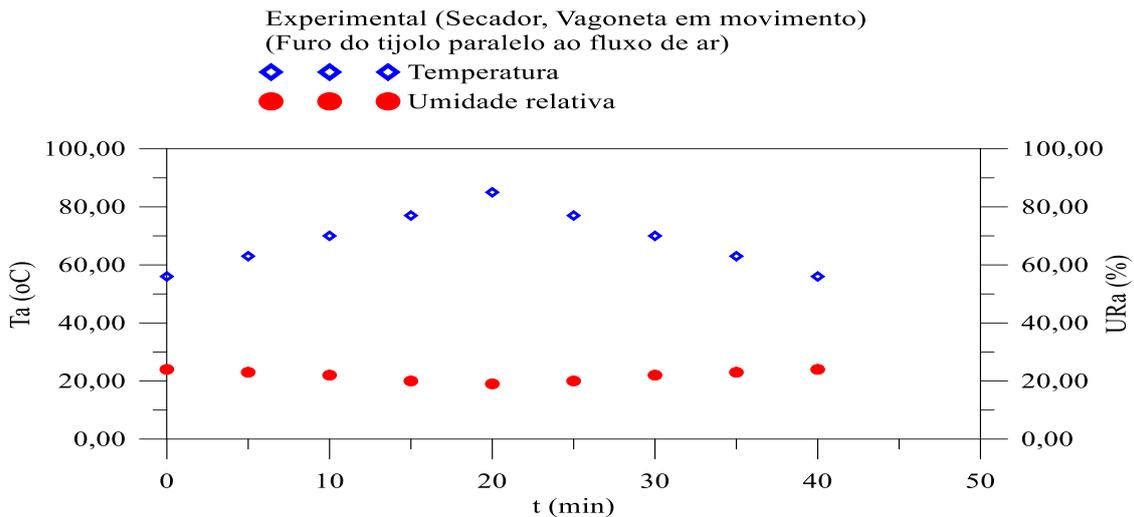
As Figuras mostram que quanto maior a temperatura no interior do secador, menor a taxa de umidade. Observa-se através das Figuras que os menores valores de temperatura ocorrem no ponto 0m do secador e o maior valor da temperatura ocorre no ponto 20m do secador. Isto já era esperado, pois a fonte geradora de calor está localizada na posição 20m, com relação à umidade esta tem o maior valor no ponto 0m do secador e o menor valor no ponto 20m.

Figura 6.40 – Variação de temperatura e umidade, em função da umidade em base seca, dentro do secador.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.41 – Variação de temperatura e umidade, em função do tempo, dentro do secador.



Fonte: Autor (2021).

6.1.5.2 Variações do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo

As Figuras 6.42 e 6.43 mostram as variações dos teores de umidade e das temperaturas em função do tempo. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura do secador, variando de 56°C a 85°C; a umidade relativa variável, tempo variando conforme Tabelas C1 a C2, do Anexo C.

A Figura 6.43 mostra o comportamento das variações de umidade e das temperaturas, para a amostra do tijolo com os furos paralelos ao fluxo de calor.

No caso específico da amostra do tijolo com furo paralelo ao fluxo de ar de secagem, entra em contato com toda área do tijolo, tanto as áreas externas como também as áreas internas, isto

faz com que a perda de umidade ocorra mais rapidamente, da mesma forma a temperatura da amostra também aumenta mais rapidamente.

A Figura 6.43 mostra que para um tempo de 40 min, nas condições de realização do experimento, as curvas de perda de umidade e aumento de temperatura convergem.

Através da Tabela C1 do Anexo C, observou-se que a amostra do tijolo para o tempo $t=40\text{min}$, perdeu 230 ml de água de um total de 422 ml, o que representa 54,50 % de redução da quantidade de água contida na amostra.

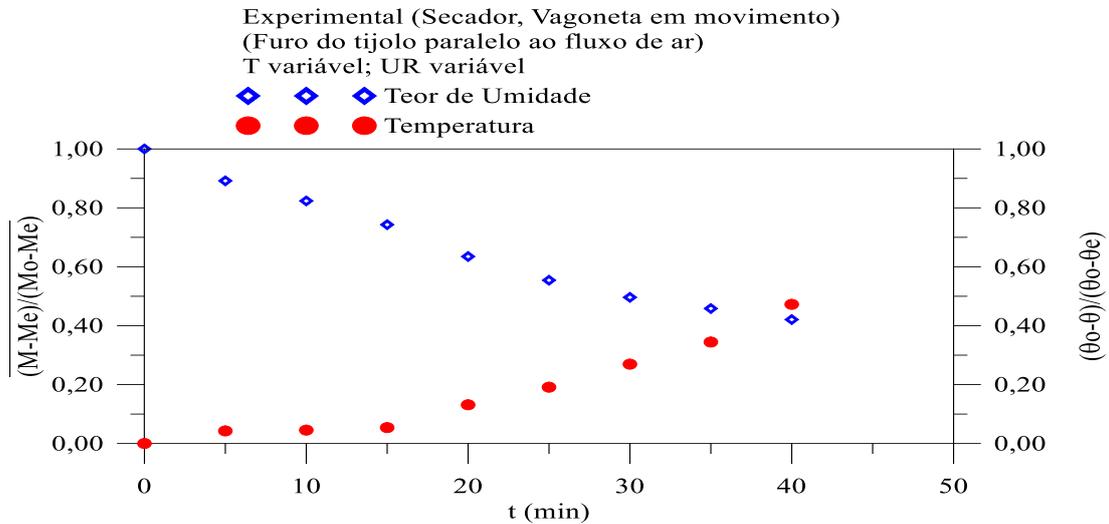
Com relação à temperatura do vértice do tijolo, a Tabela C1 do Anexo C, mostra que a temperatura do vértice variou de $32,50^{\circ}\text{C}$ para $43,60^{\circ}\text{C}$, havendo um acréscimo de $11,10^{\circ}\text{C}$, a referida variação ocorreu ao longo do tempo de 40min.

Para a amostra do tijolo com furo perpendicular ao fluxo de ar de secagem, a Figura 6.43 e Tabela C2, do Anexo C, mostra que a perda de umidade da amostra de tijolo, assim como a variação de temperatura em função do tempo, foram menores quando comparadas com amostra de furo paralelo ao ar de secagem. Isto já era esperado, pois na amostra de furo perpendicular, a circulação do ar de secagem dentro dos furos do tijolo é muito pequena, quando comparada com o tijolo de furo paralelo ao fluxo de ar.

A Tabela C2, do Anexo C, mostra que a amostra de tijolo de furo perpendicular perdeu 179ml de um total de 435ml, para o tempo de experimento de 40min, o que representou a redução de 41,14% da quantidade de água.

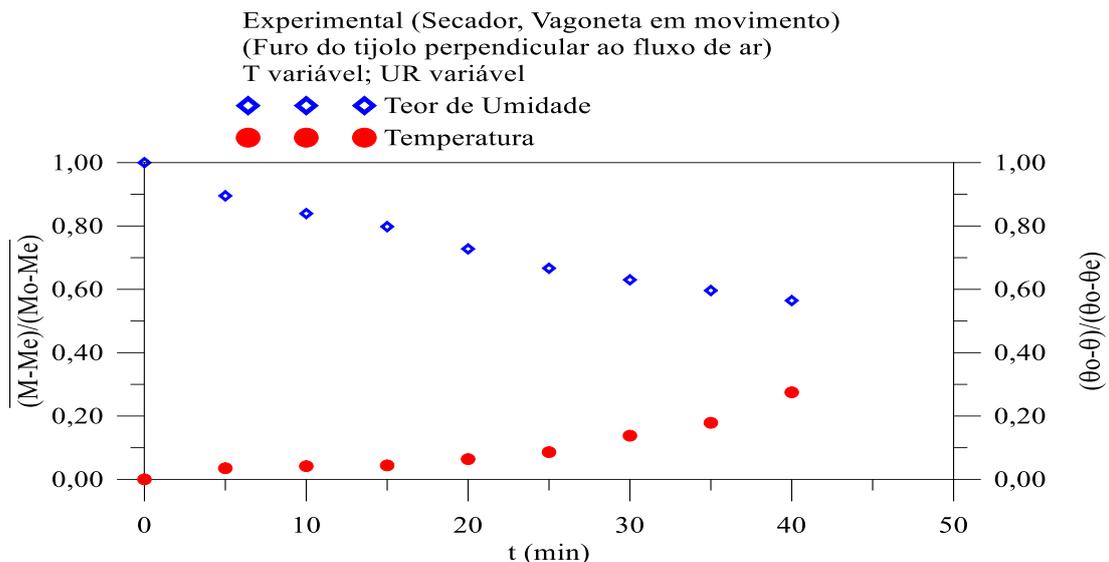
Para a amostra de furo perpendicular, a temperatura do vértice do tijolo variou de $31,60^{\circ}\text{C}$ para $38,30^{\circ}\text{C}$, havendo, portanto, um acréscimo de $6,70^{\circ}\text{C}$, a referida variação ocorreu ao longo do tempo de 40min, conforme Tabela C2 do Anexo C.

Figura 6.42 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T=56^{\circ}\text{C}$ a $T=85^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.43 – Variação do teor de umidade e da temperatura, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T=56^{\circ}\text{C}$ a $T=85^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autor (2021).

6.1.5.3 Variações do volume e da área, em função do tempo

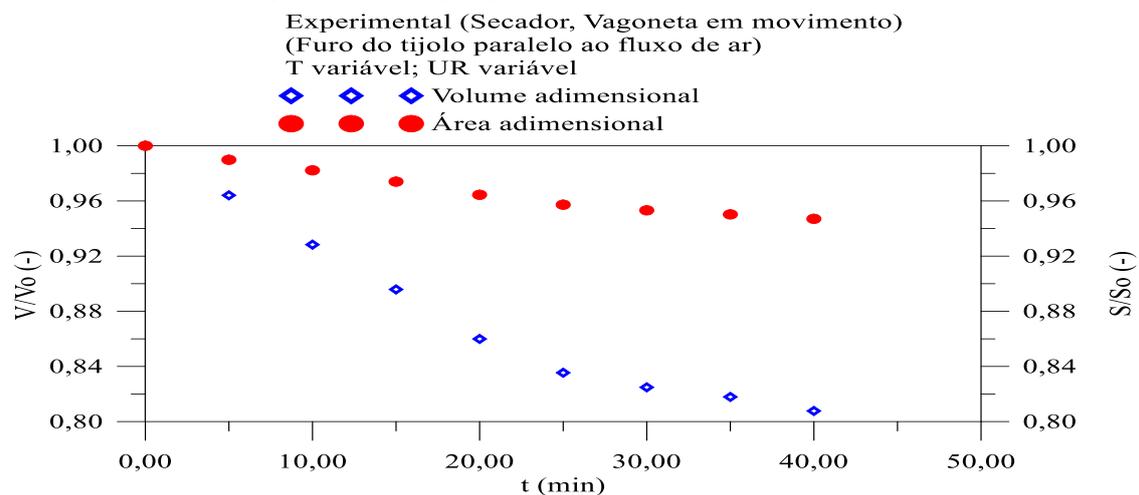
As Figuras 6.44 e 6.45 mostram as variações da razão entre volume medido e o volume inicial, da mesma maneira mostra as variações da razão entre a área medida e a área inicial, ambas em função do tempo. Para a obtenção das referidas figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura variando de 56°C a 85°C ; umidade relativa variável e o tempo, variando de 0min a 40min, conforme Tabelas C1 e C2 do Anexo C.

A Figura 6.44 mostra as variações dimensionais da amostra de tijolo com furo paralelo ao fluxo do ar. Observa-se que para $t=40\text{min}$, a razão entre volume medido e o volume inicial (v/v_0) é de aproximadamente 0,80, a razão entre a área medida e a área inicial (s/s_0), é de 0,94.

A Figura 6.45 mostra as variações dimensionais da amostra de tijolo com furo perpendicular ao fluxo do ar de secagem. Observa-se que para $t=40\text{min}$, a razão entre volume medido e o volume inicial (v/v_0) é de aproximadamente 0,86, e a razão entre a área medida e a área inicial (s/s_0) é de 0,96.

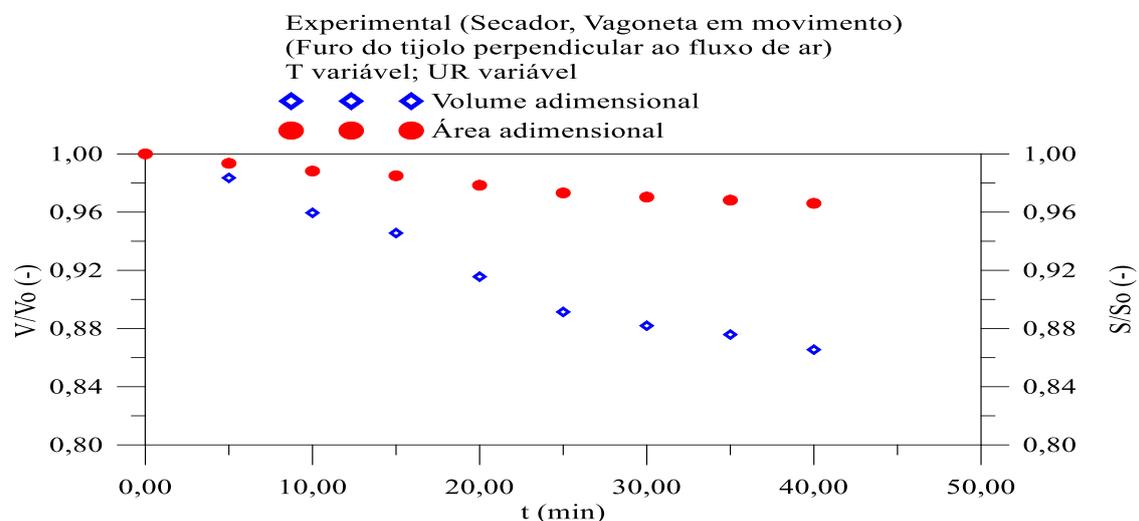
As variações dimensionais do tijolo estão diretamente relacionadas com a perda de água da amostra. Como o tijolo dos furos paralelos ao fluxo de ar de secagem perdeu mais água que o tijolo dos furos perpendiculares, podemos afirmar que as variações de volume e área, foram maiores para o tijolo de furo paralelo.

Figura 6.44 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T= 56\text{ }^\circ\text{C}$ a $T= 85\text{ }^\circ\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.45 – Variação do volume e da área, em função do tempo, para uma temperatura de secagem variando de $T= 56\text{ }^\circ\text{C}$ a $T= 85\text{ }^\circ\text{C}$, para o furo do tijolo perpendicular ao fluxo de ar.

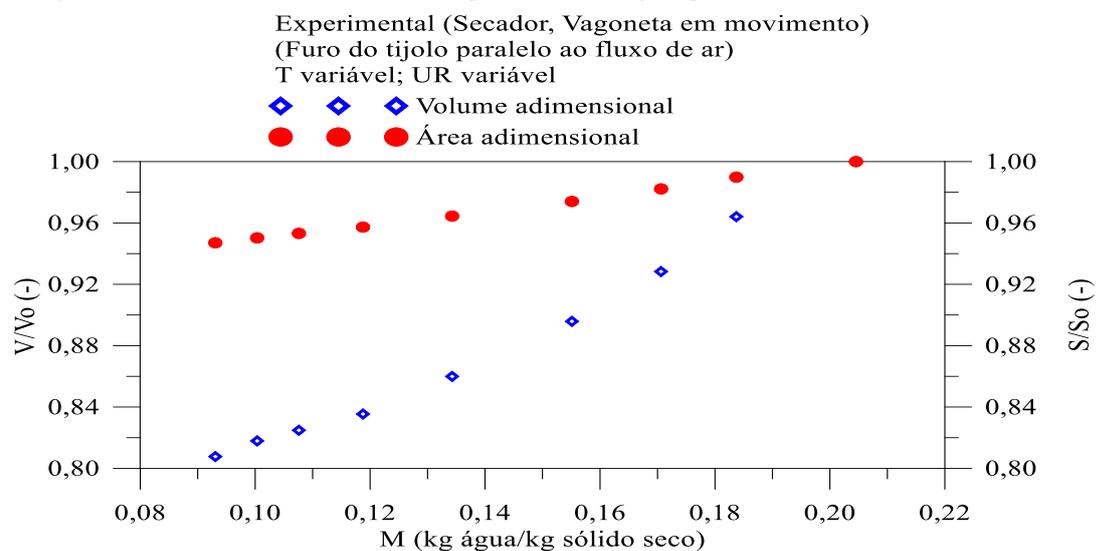


Fonte: Autor (2021).

6.1.5.4 Variações do volume e da área, em função da umidade em base seca

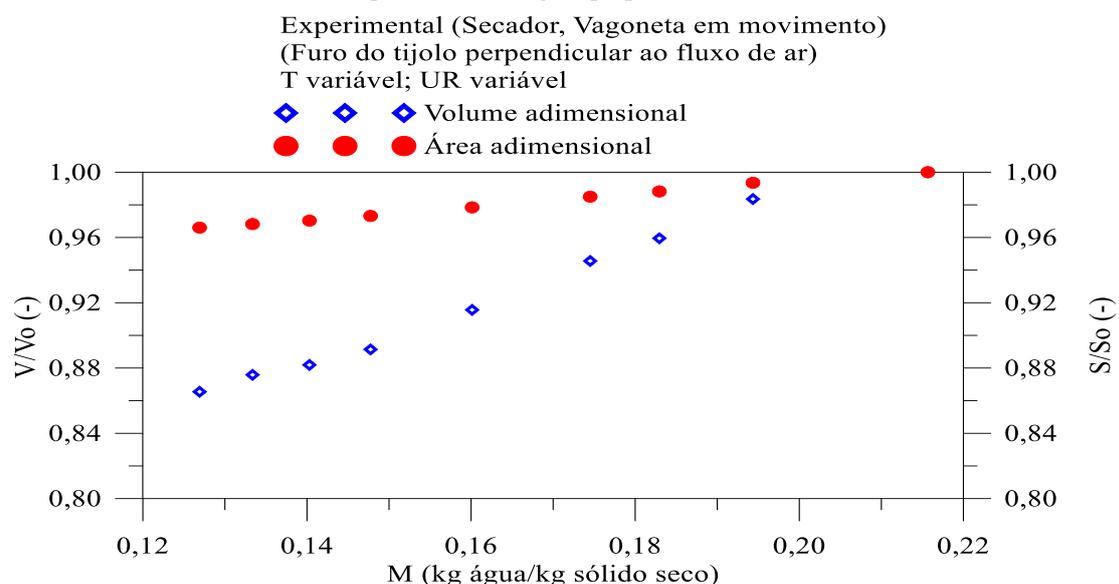
Observa-se através das Figuras 6.46 e 6.47 que as variações dimensionais dos volumes e áreas, em função da umidade em base seca, dependem da quantidade de água perdida na amostra. Como a amostra de furo paralelo ao fluxo de ar perde mais água que a amostra de furo perpendicular, conseqüentemente as figuras 6.46 e 6.47 mostram que as variações de volume e área são mais acentuadas para a amostra que perdeu mais água, que para o caso foi a amostra de furo paralelo.

Figura 6.46 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para uma temperatura de secagem variando de $T=56^{\circ}\text{C}$ a $T=85^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.47 – Variação do volume e da área, em função da umidade em base seca, para temperatura de secagem variando de $T=56^{\circ}\text{C}$ a $T=85^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo perpendicular ao fluxo de ar.

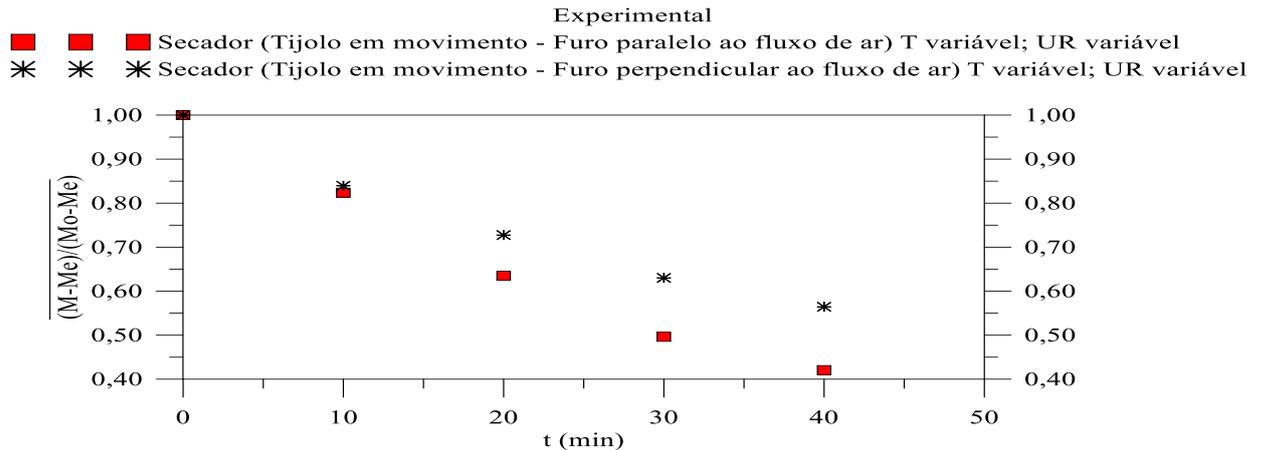


Fonte: Autor (2021).

6.1.5.5 Comparativo das perdas de umidade

A Figura 6.48 mostra o comparativo da variação da umidade entre o tijolo de furo paralelo e o tijolo de furo perpendicular. Observa-se que para o tempo variando de 0min a 40min e as temperaturas variando entre 56°C e 85°C, Tabelas C1 e C2 do Anexo C, verifica-se que a curva que representa o tijolo de furo paralelo apresenta uma maior perda de umidade, o que é possível afirmar que a posição do furo da amostra contribui na cinética de secagem.

Figura 6.48 – Variação da umidade do tijolo, em função do tempo, para a temperatura de secagem variando de $T= 56^{\circ}\text{C}$ a $T= 85^{\circ}\text{C}$, para o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar e para o furo perpendicular ao fluxo de ar.

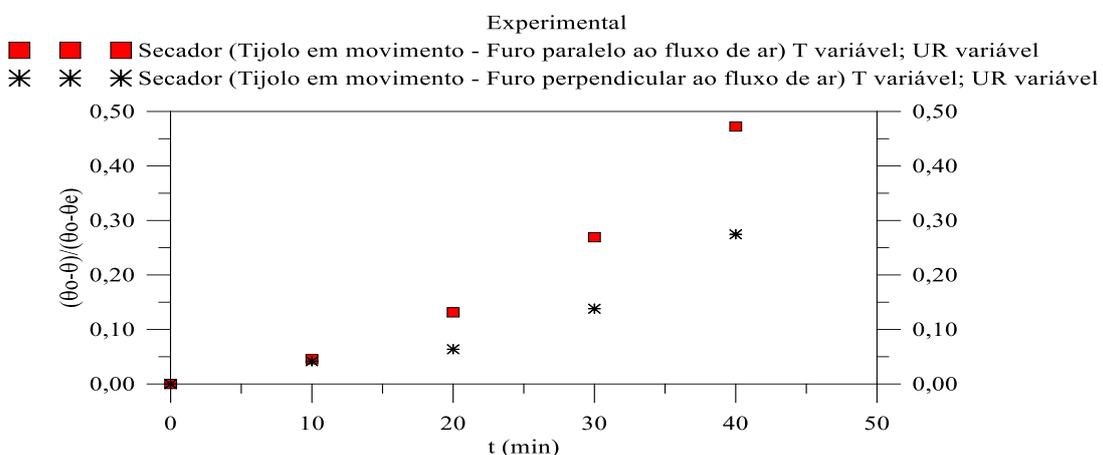


Fonte: Autor (2021).

6.1.5.6 Comparativo das variações de temperatura

Na análise da cinética de secagem das amostras e no que diz respeito às variações de temperatura, é possível observar através da Figura 6.49 e Tabelas C1 e C2 do Anexo C, que a amostra de furo paralelo apresenta uma maior variação de temperatura, o que significa dizer que ao longo dos quarenta minutos, a amostra dos furos paralelos absorveu maior quantidade de calor, quando comparado com a amostra de furos perpendiculares.

Figura 6.49 – Variação da temperatura, em função do tempo, para temperatura de secagem variando $T= 56^{\circ}\text{C}$ a $T= 85^{\circ}\text{C}$, furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar, e para o furo perpendicular ao fluxo de ar.



Fonte: Autor (2021).

6.1.5.7 Comparativo das perdas de umidade

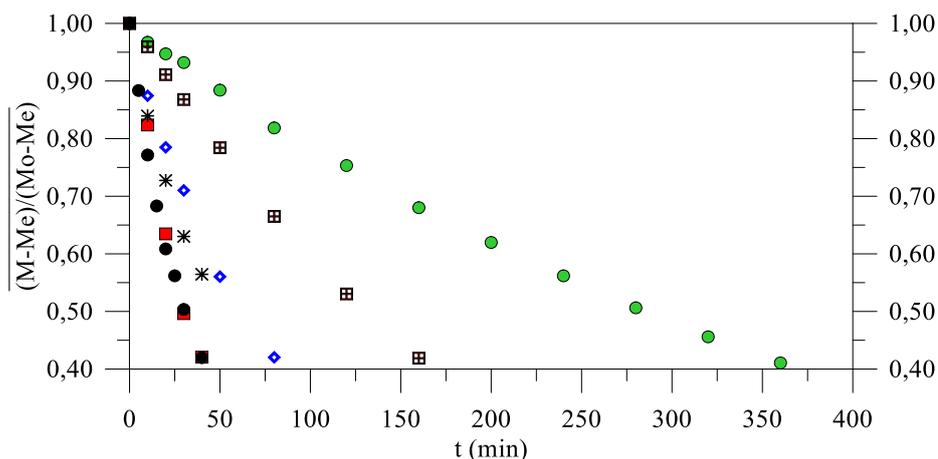
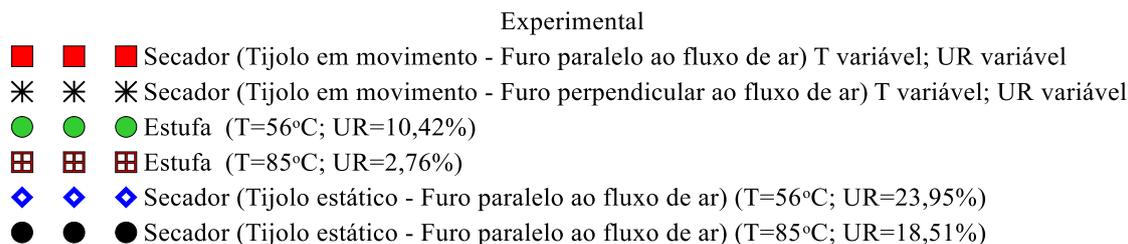
A Figura 6.50 mostra as perdas de umidade das amostras para as seguintes situações: situação 1 – secagem das amostras foram realizadas em estufa nas condições de temperaturas $T=56^{\circ}\text{C}$ e $T=85^{\circ}\text{C}$ e umidades relativas de $\text{UR}=10,42\%$ e $\text{UR}=2,76\%$; situação 2 – secagem das amostras foram realizadas no secador com a amostra estática nas condições de temperaturas $T=56^{\circ}\text{C}$ e $T=85^{\circ}\text{C}$ e umidade relativas de $\text{UR}=23,95\%$ e $\text{UR}=18,51\%$; situação 3 – a secagem das amostras foram realizadas no secador com a amostra em movimento nas condições de temperaturas $T=56^{\circ}\text{C}$ e $T=85^{\circ}\text{C}$ e umidades relativas variável.

É possível observar na Figura 6.50 e nas Tabelas A1, A5, B1, B5, C1, C2, dos Anexos A, B, C, que a menor perda de umidade para o intervalo de tempo de 0min a 40min, ocorreu na secagem da amostra em estufa. Entretanto, a maior perda de umidade para o intervalo de 0min a 40min ocorreu no secador com a amostra estática no ponto 20m e para uma temperatura de 85°C .

Para a amostra em movimento dentro do secador, com as temperaturas variando de $T=56^{\circ}\text{C}$ a $T=85^{\circ}\text{C}$ e o tempo de 40min, furo paralelo ao fluxo de ar, nestas condições a amostra de tijolo perdeu 230ml. Para a amostra estática no ponto 20m do secador, $T=85^{\circ}\text{C}$, tempo de 40min, a perda foi de 249ml. Com relação à amostra do tijolo secada na estufa para $T=85^{\circ}\text{C}$ e tempo de 40min, a perda foi de 71ml, conforme Figura 6.48 e Tabelas A5, B5, C1, dos Anexos A, B, C.

Quando comparamos o tijolo em movimento dentro do secador, com o tijolo seco no processo de secagem natural embaixo de galpões, observou-se que para a amostra do tijolo seco no secador para o Tempo de 40min, a perda foi 230ml, enquanto no processo de secagem natural a perda de 230ml demorou 4 dias, conforme Figura 3.9.

Figura 6.50 – Comparativo das perdas de umidades.



Fonte: Autor (2021).

6.1.5.8 Comparativo das variações de temperatura

Na análise da cinética de secagem das amostras e no que diz respeito às variações de temperatura, é possível observar através da Figura 6.51 e Tabelas A1, A5, B1, B5, C1, C2, dos Anexos A, B e C, que a amostra de furo paralelo apresenta uma maior variação de temperatura, o que significa dizer que ao longo dos quarenta minutos a amostra dos furos paralelos absorveu mais calor que a amostra de furos perpendiculares.

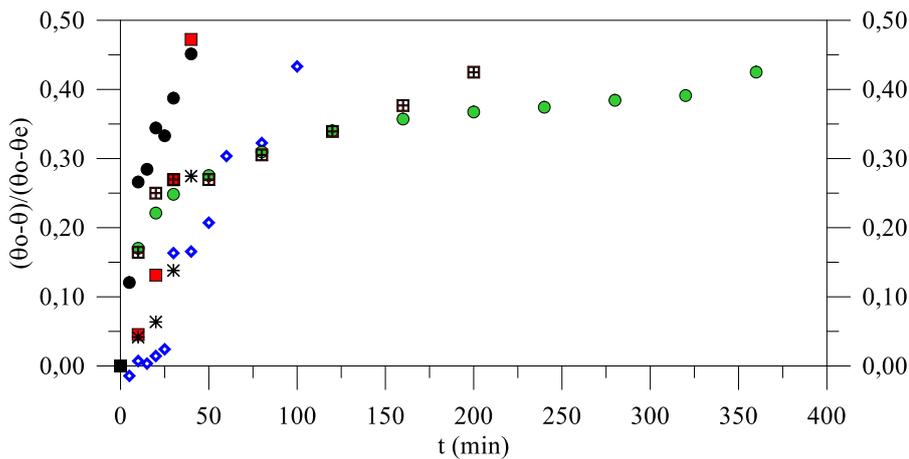
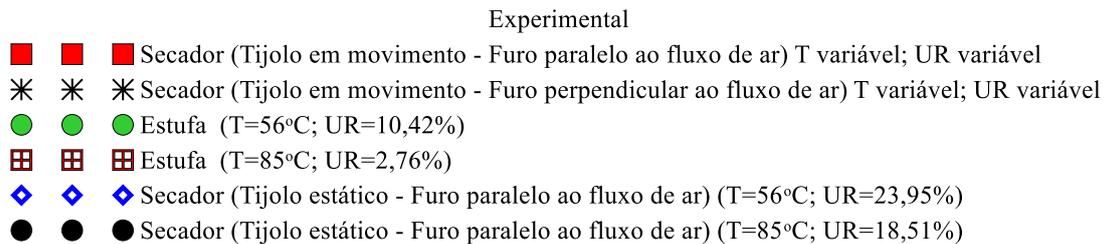
A Figura 6.51 mostra as variações de temperatura das amostras para as seguintes situações: situação 1 – secagem das amostras foram realizadas em estufa nas condições de temperaturas T=56°C e T=85°C, e umidades relativas de UR=10,42% e UR=2,76%; situação 2 – a secagem das amostras foram realizadas no secador com a amostra estática nas condições de temperaturas T=56°C e T=85°C, e umidades relativas de UR=23,95% e UR=18,51%; situação 3 – a secagem das amostras foram realizadas no secador com a amostra em movimento nas condições de temperaturas variando entre T=56°C e T=85°C e umidades relativas variável.

Verifica-se que para o tempo de 40 min, as maiores absorções de temperatura ocorreram, nos experimentos onde a amostra ficou estática dentro do secador a uma temperatura de 85 °C,

outra situação similar foi para o experimento onde a amostra ficou em movimento dentro do secador.

Para os experimentos realizados na estufa, a Figura 6.51 mostra que para o tempo de 40min, a absorção de temperatura foi menor, quando comparada com os experimentos realizados no secador.

Figura 6.51 – Comparativo das variações de temperaturas.



Fonte: Autor (2021).

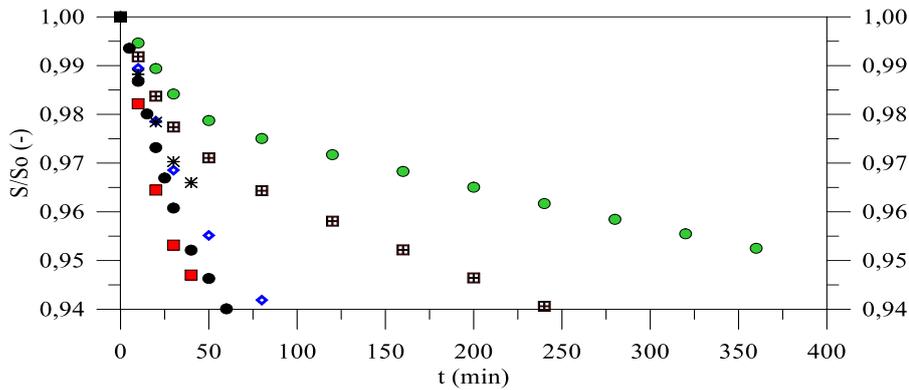
6.1.5.9 Comparativo das variações das áreas

As variações das áreas estão relacionadas com a perda de umidade da amostra. Quanto maior a perda de umidade, maior será a retração do tijolo, consequentemente maiores serão as variações das áreas.

A Figura 6.52 e as Tabelas A1, A5, B1, B5, C1, C2, dos Anexos A, B e C, mostram que para o tempo de 40min as maiores variações de áreas ocorreram nas amostras dos experimentos realizados no secador e as menores variações de áreas, ocorreram nas amostras dos experimentos realizados na estufa.

Figura 6.52 – Comparativo das variações de áreas.

- Experimental
- ■ ■ Secador (Tijolo em movimento - Furo paralelo ao fluxo de ar) T variável; UR variável
 - * * * Secador (Tijolo em movimento - Furo perpendicular ao fluxo de ar) T variável; UR variável
 - ● ● Estufa (T=56°C; UR=10,42%)
 - ▣ ▣ ▣ Estufa (T=85°C; UR=2,76%)
 - ◆ ◆ ◆ Secador (Tijolo estático - Furo paralelo ao fluxo de ar) (T=56°C; UR=23,95%)
 - ● ● Secador (Tijolo estático - Furo paralelo ao fluxo de ar) (T=85°C; UR=18,51%)



Fonte: Autor (2021)

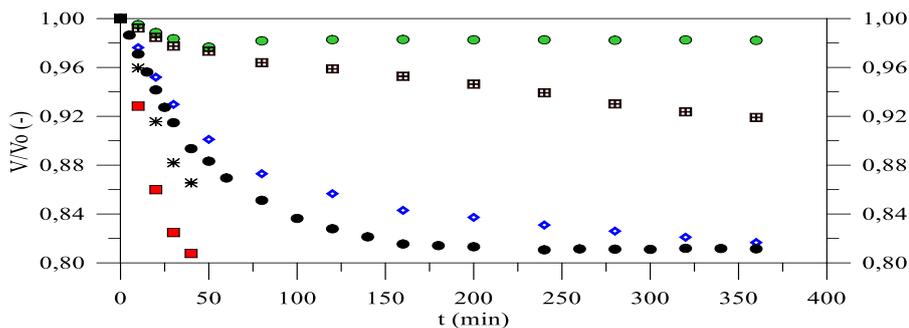
6.1.5.10 Comparativo das variações dos volumes

As variações dos volumes, tal como as variações das áreas, estão relacionadas com a perda de umidade da amostra; quanto maior a perda de umidade, maior será a retração do tijolo, consequentemente maiores serão as variações de volumes.

Verifica-se através da Figura 6.53 e das Tabelas A1, A5, B1, B5, C1, C2, dos Anexos A, B e C, que para o tempo de 40min as maiores variações de volume, também ocorreram nas amostras dos experimentos realizados no secador.

Figura 6.53 – Comparativo das variações de volumes.

- Experimental
- ■ ■ Secador (Tijolo em movimento - Furo paralelo ao fluxo de ar) T variável; UR variável
 - * * * Secador (Tijolo em movimento - Furo perpendicular ao fluxo de ar) T variável; UR variável
 - ● ● Estufa (T=56°C; UR=10,42%)
 - ▣ ▣ ▣ Estufa (T=85°C; UR=2,76%)
 - ◆ ◆ ◆ Secador (Tijolo estático - Furo paralelo ao fluxo de ar) (T=56°C; UR=23,95%)
 - ● ● Secador (Tijolo estático - Furo paralelo ao fluxo de ar) (T=85°C; UR=18,51%)



Fonte: Autor (2021).

6.1.6 Comparativo entre os experimentos realizado no secador e na estufa

Neste item foi feito um comparativo entre as secagens ocorridas nas amostras para os experimentos realizados no secador e o experimento realizado na estufa, da mesma maneira foi feito um comparativo entre os aquecimentos realizados nas amostras ensaiadas no secador e as amostras ensaiadas na estufa.

6.1.6.1 Comparativo da secagem, para os experimentos realizados no secador e na estufa

Dentro do geral, foi pego apenas uma situação específica, presente nos três experimentos, portanto, foi usada a situação para o tempo igual a 40 minutos e a temperatura igual a 85 °C.

Um outro motivo de se utilizar o experimento na faixa de tempo de 40 minutos, se deu pelo fato que o secador a ser implantado terá um tempo de ação de 40 minutos, ou seja, o tijolo a ser secado ficará 40 minutos em movimento dentro do mesmo.

Conforme a Tabela 6.1 é possível observar que para as três condições de experimentos e no diz respeito a secagem, o melhor desempenho ocorreu para o experimento realizado no secador com amostra parada, o segundo melhor desempenho ocorreu no experimento do secador com amostra em movimento.

Nas mesmas condições de tempo e temperatura, o pior desempenho ficou no experimento realizado na estufa, isto se deu devido à ausência de ventilação forçada na estufa, o que reforça o fato da importância da ventilação no processo de secagem do tijolo.

Tabela 6.1 - Comparativo da secagem das amostras

Experimentos	Tempo (Minuto)	Temperatura (°C)	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação da massa $\Delta m = m_i - m_f$ (g)	Velocidade do ar de secagem (m/s)
No secador com amostra parada	40	85	2372	2123	249	3,8
No secador com amostra em movimento	40	56 a 85	2460	2230	230	1,8 a 3,8
Na estufa	40	85	2366	2295	71	-

Fonte: Autor (2021)

6.1.6.2 Comparativo do aquecimento

Para as condições do tempo 45 minutos e temperatura 85°C, a Tabela 6.2 mostra que o maior aquecimento ocorreu no experimento com amostra estática dentro do secador, isto já era esperado pois a referida amostra ficou parada nas condições de 85°C e com a maior ventilação possível que foi de 3,8 m/s.

A menor taxa de aquecimento se deu para a amostra em movimento dentro do secador, isto ocorreu porque a amostra, devido ao seu movimento estava sujeita a temperaturas que variaram de 56°C a 85°C.

Quando se compara o aquecimento ocorrido no experimento realizado na estufa, o mesmo apresenta um valor inferior ao aquecimento realizado no secador, nas mesmas condições de temperatura e tempo, isto ocorreu por falta de ventilação na estufa, sendo assim é possível verificar a importância da ventilação tanto no aquecimento como na secagem do tijolo.

Tabela 6.2 - Comparativo do aquecimento das amostras.

Experimentos	Tempo (Min)	Temperatura do experimento (°C)	Temp. da amostra inicial (θ_i) (°C)	Temp. da amostra final (θ_f) (°C)	Varição da Temperatura da amostra $\Delta \theta = \theta_f - \theta_i$ (°C)	Velocidade do ar de secagem (m/s)
No secador com amostra parada	40	85	29,5	55	25,5	3,8
No secador com amostra em movimento	40	56 a 85	32,50	43,60	11,1	1,8 a 3,8
Na estufa	40	85	29,00	44,50	15,5	-

Fonte: Autor (2021)

6.2 Análise matemática dos dados experimentais

Para descrever matematicamente, os processos de secagem e aquecimento dos tijolos, foram utilizados modelos empíricos não fenomenológicos.

Foram utilizadas duas equações matemáticas, a equação (6.1) foi utilizada para descrever o processo de secagem do tijolo e a (6.2) foi utilizada para descrever o processo de aquecimento.

As análises de secagem e aquecimento através das equações matemáticas, foram feitas para os experimentos: amostra estática dentro do secador, amostra estática dentro da estufa, amostra em movimento dentro do secador.

6.2.1 Análise matemática dos dados experimentais, para secagem e aquecimento, da amostra do tijolo no secador, com vagoneta estática e furo paralelo ao fluxo de ar

6.2.1.1 Secagem

A Equação (6.1) foi utilizada para descrever o processo de secagem ocorrido no tijolo, com a vagoneta estática dentro do secador e com o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Os parâmetros A_1 , A_2 , K_1 , K_2 , da Equação (6.1) foram obtidos através dos dados experimentais coletados no experimento, com vagoneta estática e furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Para obtenção dos dados paramétricos A_1 , A_2 , K_1 , K_2 , foi utilizado o método numérico Simplex e Quasi-Newton empregando o Software Statística[®], com critério de convergência de 0,00099, em todas as condições de secagem.

A Tabela 6.3 mostra os valores paramétricos ajustados aos dados experimentais, os dados foram ajustados para os experimentos realizados no secador, usando as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, que foram as temperaturas usadas nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, do secador.

O coeficiente de correlação (R), mostrado na Tabela (6.3), cujo valor indica o quanto um modelo consegue explicar os resultados encontrados experimentalmente, e que para este caso específico aproximou de 1, por este motivo podemos afirmar que a equação (6.1), descreve satisfatoriamente os dados coletados experimentalmente no processo de secagem do tijolo através do secador.

As Figuras 6.54 a 6.58 mostram o comparativo das perdas de umidade medida no secador e a perda de umidade medida através da Equação (6.1), ambas com relação ao tempo. As duas curvas convergem, o que justifica acertada utilização da equação matemática.

$$(M - Me)/(Mo - Me) = A_1 \text{Exp}(k_1 t) + A_2 \text{Exp}(k_2 t) \quad (6.1)$$

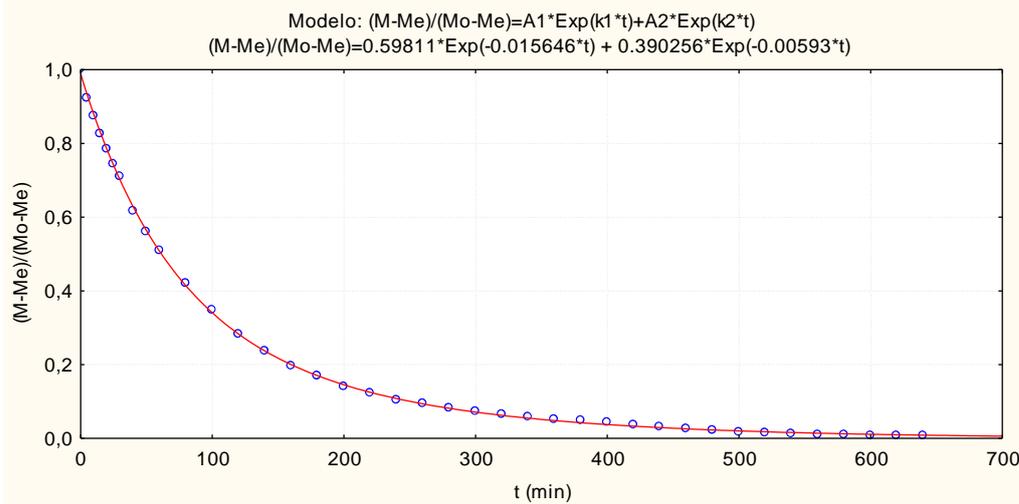
Tabela 6.3 – Parâmetros da equação (6.1) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da Variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂			
56	0.5981100	-0.0156463	0.3902563	-0.0059305	0.99988	99.977	0.00087528
63	0.8427041	-0.0191074	0.1586576	-0.0025169	0.99950	99.900	0.00314344
70	0.8973033	-0.0141017	0.1218930	-0.0037072	0.99971	99.941	0.00222487
77	0.8615235	-0.0230004	0.1466480	-0.0030617	0.99991	99.981	0.00054337
85	0.5763235	-0.0405670	0.4255256	-0.0086299	0.99985	99.970	0.00073786

Fonte: Autor (2021)

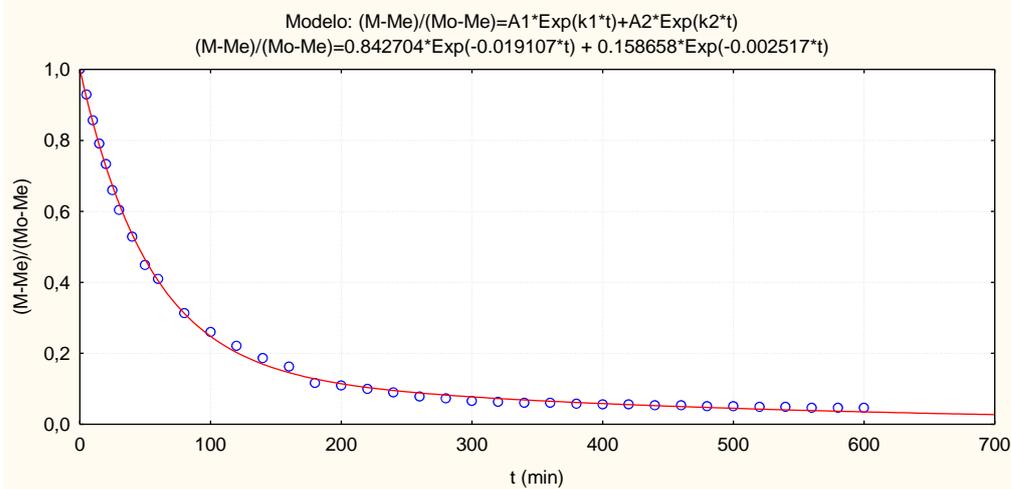
Experimento vagoneta estática dentro do secador, tijolo furo paralelo ao fluxo de ar

Figura 6.54 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=56°C.



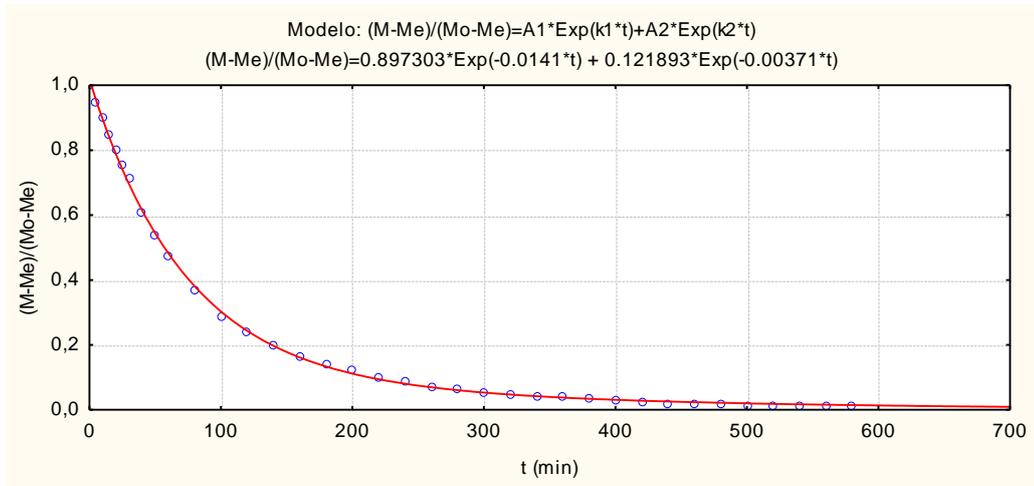
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.55 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=63°C.



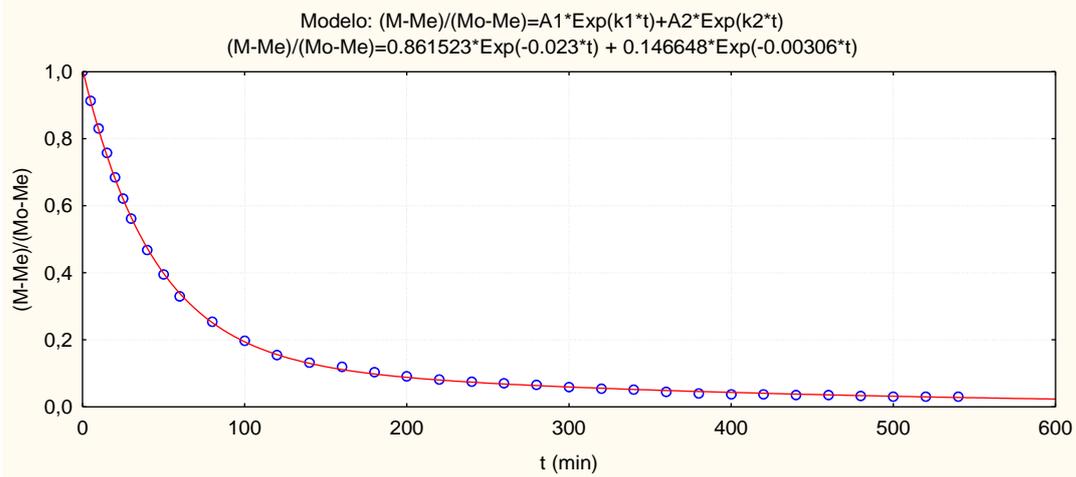
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.56 - Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=70°C.



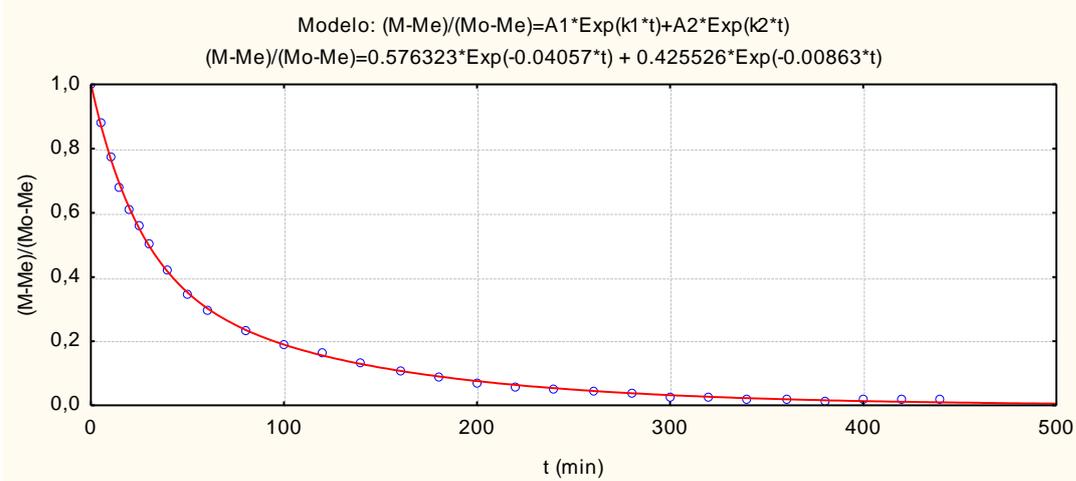
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.57 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=77°C.



Fonte: Autor (2021)

Figura 6.58 - Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=85°C.



Fonte: Autor (2021)

6.2.1.2 Aquecimento

A Equação (6.2) descreve o processo de aquecimento do tijolo ocorrido no experimento, com a vagoneta estática dentro do secador e com o furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar.

Os parâmetros B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , m , da Equação (6.2), foram obtidos através dos dados experimentais, coletados no experimento, com vagoneta estática.

Os dados paramétricos B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , m , foram obtidos usando o método numérico Rosenbrock e Quasi-Newton, empregando o *Software Statistica*[®], com critério de convergência de 0,00099, em todas as condições de secagem

A Tabela (6.4) mostra os valores paramétricos ajustados aos dados experimentais, os quais foram ajustados para os experimentos realizados no secador, usando as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, que foram as temperaturas usadas nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, do secador. O coeficiente de correlação (R), mostrado na Tabela (6.4), cujo valor indica o quanto um modelo consegue explicar os resultados encontrados experimentalmente, e que para este caso específico variou de 0,97 a 0,99 aproximando de 1.

$$(\theta_0 - \theta)/(\theta_0 - \theta_e) = B_1 + B_2 \times t + B_3 \times \text{Log}_2(t^m + B_4) \quad (6.2)$$

Tabela 6.4 – Parâmetros da equação (6.2) ajustados aos dados experimentais

T (°C)	Parâmetros					R	Proporção da Variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	M			
56	-2.3181372	-0.0015333	0.1656222	17091.293	2.7217397	0.99268	98.541	0.0769454
63	-1.5694422	-0.0012538	0.1297241	4868.0026	2.7188255	0.99544	99.089	0.0411287
70	-1.8139413	-0.0012271	0.1599316	2762.7580	2.3521511	0.99652	99.305	0.0307236
77	-0.6695256	-0.0011501	0.0328233	1815258.6	7.0862438	0.97467	94.998	0.1342673
85	-1.0365003	-0.0011289	0.2529914	17.560001	1.1360921	0.98917	97.846	0.0606037

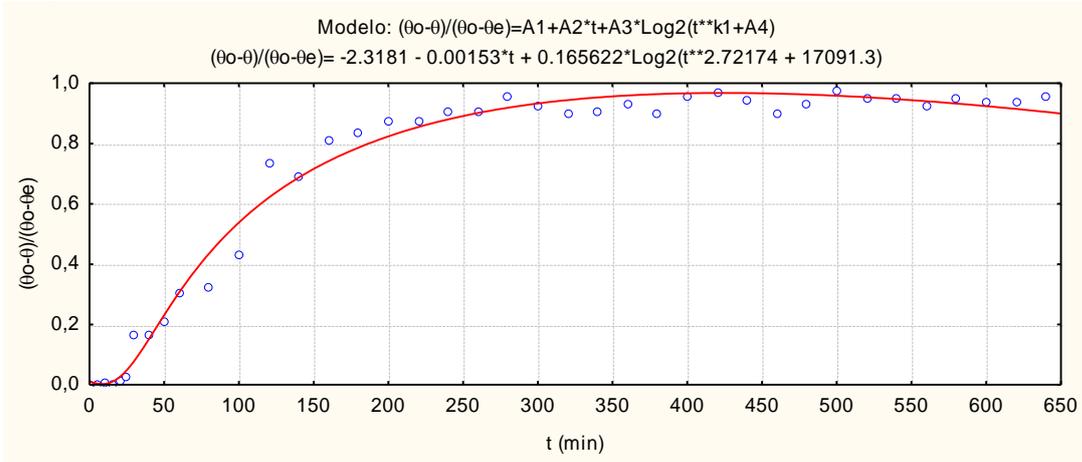
Fonte: Autor (2021)

Experimento vagoneta estática dentro do secador, tijolo furo paralelo ao fluxo de ar

As Figuras 6.59 a 6.63 mostram o comparativo das curvas que descrevem o aquecimento do tijolo, sendo que uma das curvas foi obtida através dos dados medido experimentalmente no secador e a outra foi obtida pela Equação (6.2), ambas com relação ao tempo. Observou-se que

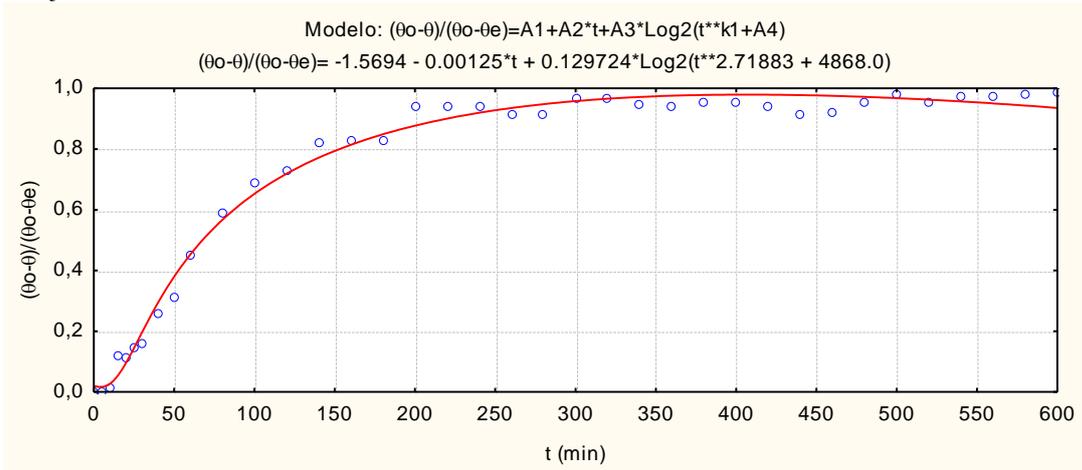
as duas curvas apresentam uma boa concordância, o que justifica a acertada utilização da Equação (6.2), para descrever o aquecimento ocorrido na secagem do tijolo.

Figura 6.59 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=56°C.



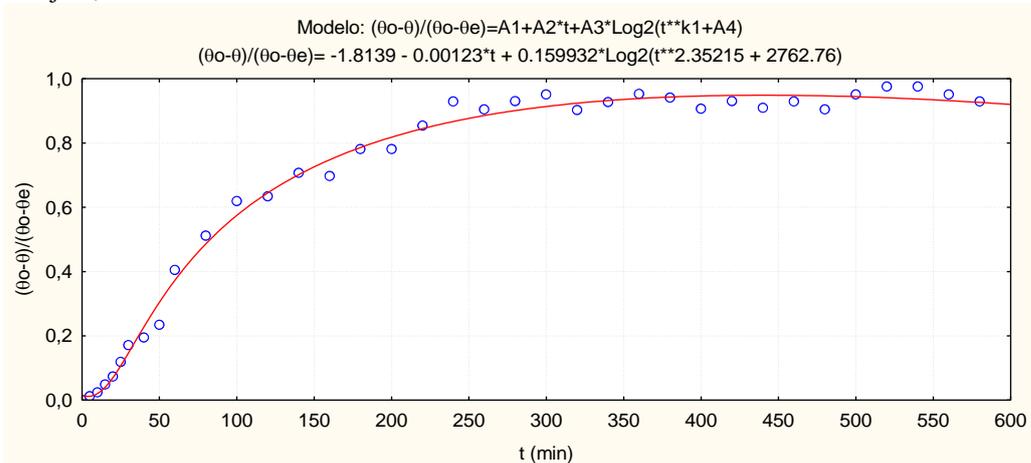
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.60 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=63°C.



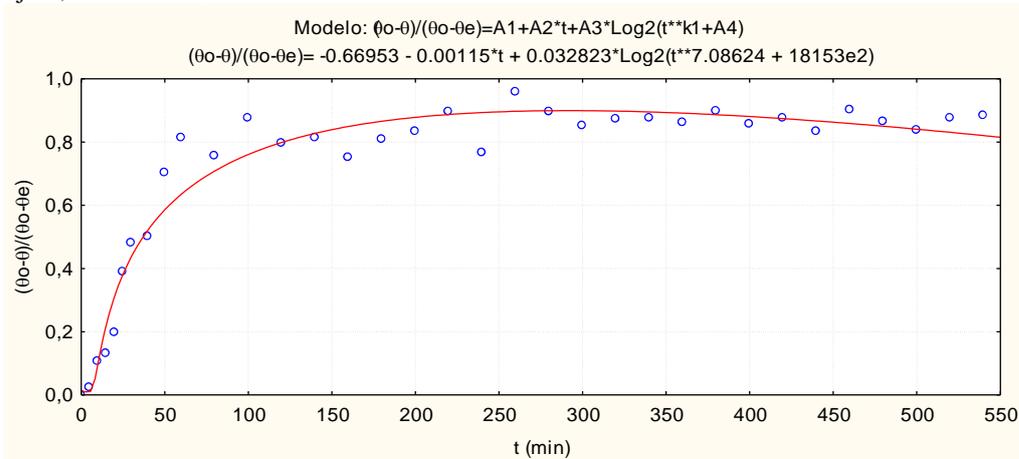
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.61 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=70°C.



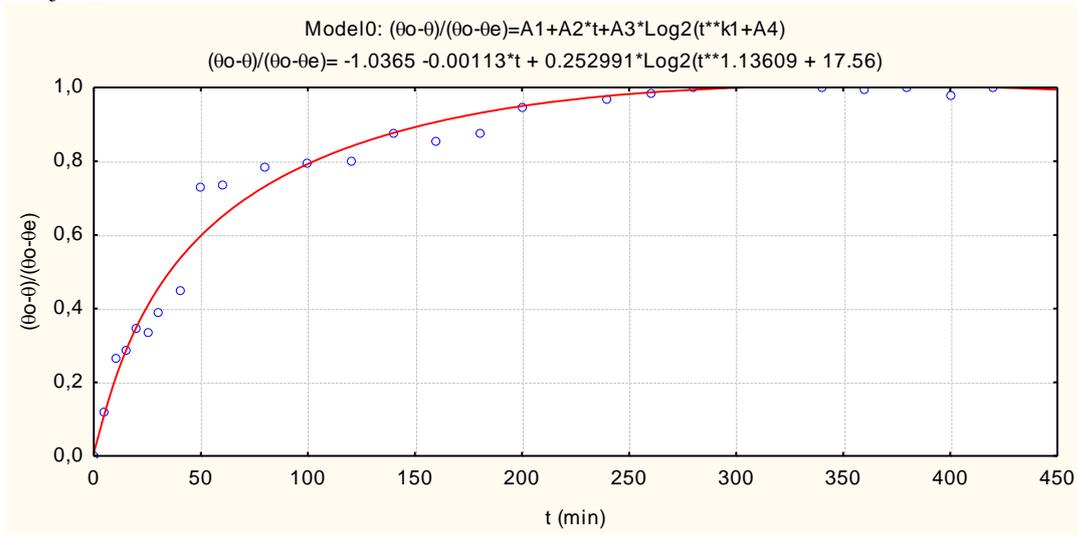
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.62– Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=77°C.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.63 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=85°C.



Fonte: Autor (2021).

6.2.2 Análise matemática dos dados experimentais, para a secagem e aquecimento, na estufa

6.2.2.1 Secagem

Para descrever, através de uma equação matemática, o processo de secagem da amostra do tijolo no experimento realizado na estufa, foi utilizada a Equação (6.3).

Os parâmetros A_1 , A_2 , K_1 , K_2 , da Equação (6.3), foram obtidos através dos dados experimentais, coletados no experimento realizado na estufa.

Os parâmetros A_1 , A_2 , K_1 , K_2 , da Equação (6.3) foram obtidos através do método numérico Simplex e Quasi-Newton, empregando o Software Statística®, com critério de convergência de 0,00099, em todas as condições de secagem.

A Tabela (6.5) mostra os valores paramétricos ajustados aos dados experimentais, os quais foram ajustados para os experimentos realizados na estufa, usando as temperaturas: 56°C 63°C, 70°C, 77°C, 85°C, que foram as temperaturas usadas nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, do secador.

Observa-se na Tabela (6.5) que o coeficiente de correlação (R), cujo valor indica o quanto um modelo consegue explicar os resultados encontrados experimentalmente, e que para este caso específico aproximou de 1, por este motivo podemos afirmar que a Equação (6.3), descreve satisfatoriamente os dados coletados experimentalmente no processo de secagem do tijolo através da estufa.

$$(M - Me)/(Mo - Me) = A_1 \text{Exp}(k_1 t) + A_2 \text{Exp}(k_2 t) \quad (6.3)$$

Tabela 6.5 – Parâmetros da equação (6.3) obtidos após ajuste aos dados experimentais do teor de umidade

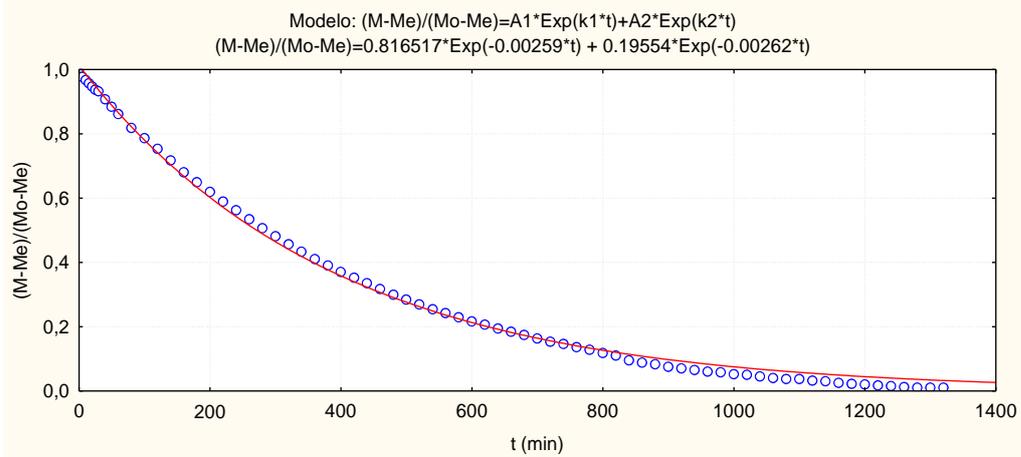
T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da Variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	K ₁	A ₂	K ₂			
56	0.8165170	-0.0025946	0.1955437	-0.0026150	0.99870	99.740	0.0194766
63	0.4651242	-0.0033313	0.5469361	-0.0033142	0.99972	99.944	0.0038647
70	1.1145926	-0.0033454	-0.1052395	-0.0012558	0.99927	99.855	0.0099682
77	1.0516336	-0.0043949	-0.0386881	-0.0016887	0.99960	99.920	0.0050403
85	-0.0000076	0.0088267	1.0242842	-0.0057327	0.99951	99.903	0.0054874

Fonte: Autor (2021)

Experimentos secagem na estufa

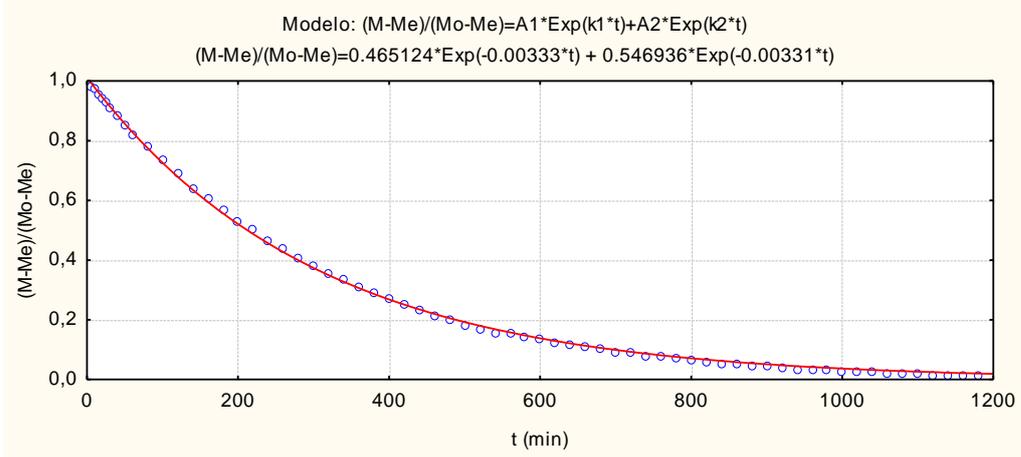
As Figuras 6.64 a 6.68, mostram as curvas de secagem que ocorreu no tijolo e ao mesmo tempo faz um comparativo entre as curvas obtidas experimentalmente com as curvas predita pela Equação matemática (6.3), observa-se que as curva que representa a secagem do tijolo através da estufa tem boa concordância com as curvas que representam a secagem através da Equação matemática (6.3), o que possibilita afirmar que a equação matemática descreveu satisfatoriamente o processo de secagem do tijolo.

Figura 6.64 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=56°C.



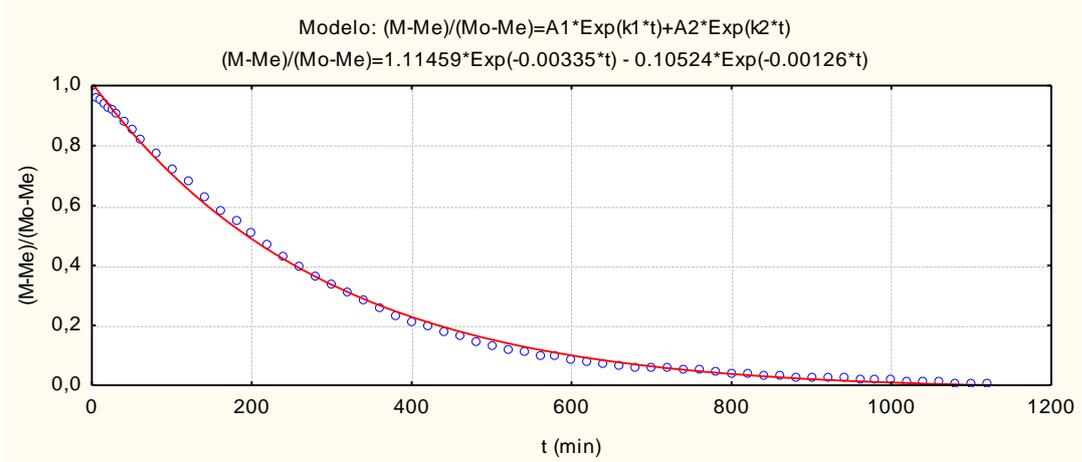
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.65 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=63°C.



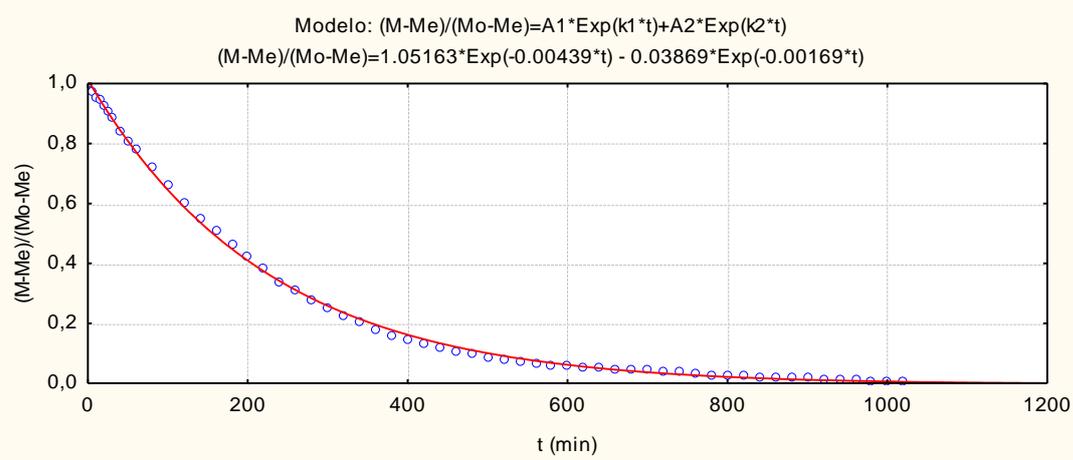
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.66 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=70°C.



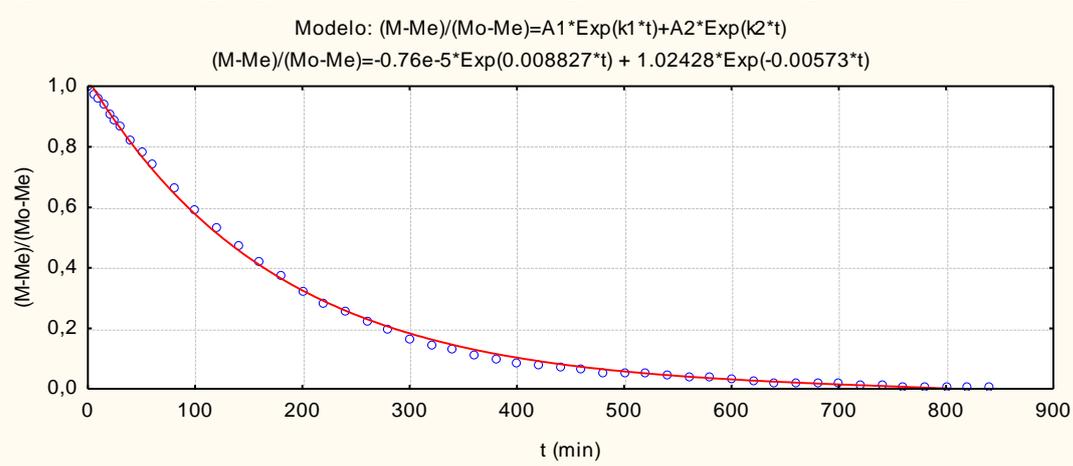
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.67 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=77°C.



Fonte: Autor (2021)

Figura 6.68 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T=85°C.



Fonte: Autor (2021)

6.2.2.2 Aquecimento

A Equação (6.4) foi utilizada para descrever o processo de aquecimento do tijolo ocorrido no experimento realizado na estufa.

Os parâmetros B_1 , B_2 , B_3 , B_4 , m , da Equação (6.4), foram obtidos através dos dados experimentais, coletados no experimento realizado na estufa, utilizando o método numérico Simplex e Quasi-Newton, empregando o Software Statística®.

A Tabela (6.6) mostra os valores paramétricos ajustados aos dados experimentais, os dados foram ajustados para os experimentos realizados na estufa, usando as temperaturas: 56°C, 63°C, 70°C, 77°C, 85°C que foram as temperaturas usadas nos pontos: 0m; 5m; 10m; 15m; 20m, do secador.

O coeficiente de correlação (R), mostrado na Tabela (6.6), cujo valor indica o quanto um modelo consegue explicar os resultados encontrados experimentalmente, e que para este caso

específico variou de 0,97 a 0,99 aproximando de 1, por este motivo podemos afirmar que a equação (6.4), descreve satisfatoriamente os dados coletados experimentalmente.

$$(\theta_0 - \theta)/(\theta_0 - \theta_e) = B_1 + B_2 \times t + B_3 \times \text{Log}_2(t^m + B_4) \quad (6.4)$$

Tabela 6.6 – Parâmetros da equação (6.4) ajustados aos dados experimentais

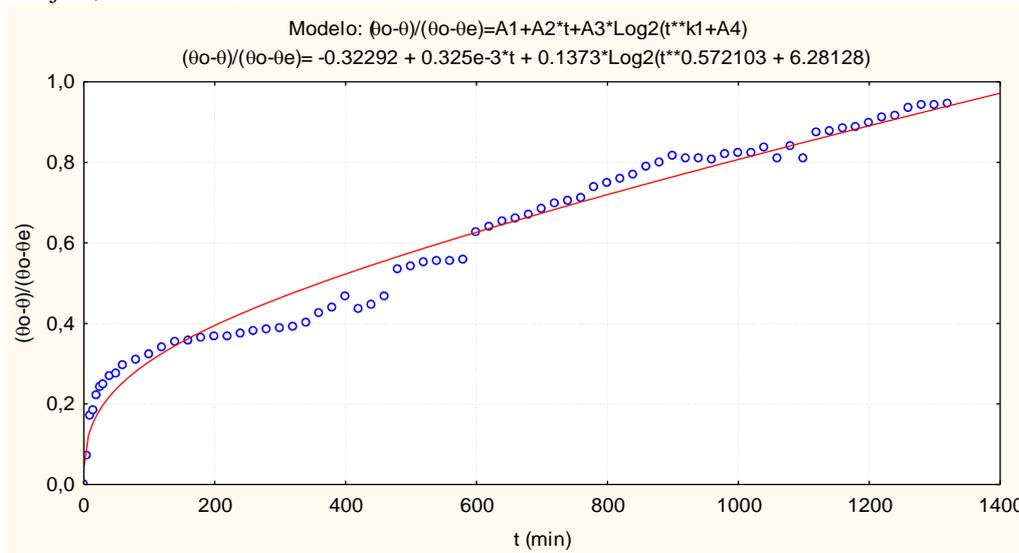
T (°C)	Parâmetros					R	Proporção da Variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	M			
56	-0.3229184	0.0003251	0.1372999	6.2812805	0.5721034	0.98599	97.218	0.1236925
63	0.0653398	0.0004828	0.0456470	0.3563014	0.7539632	0.98634	97.286	0.1089720
70	-0.0675084	0.0005051	0.0321391	3.9547178	1.5889018	0.98402	96.829	0.1514973
77	-0.0589110	0.0005453	0.0474921	2.6338012	1.1355971	0.98074	96.185	0.1727532
85	-0.1155182	0.0006344	0.0560969	5.4097915	1.1637432	0.97775	95.599	0.1848131

Fonte: Autor (2021)

Experimentos aquecimento na estufa

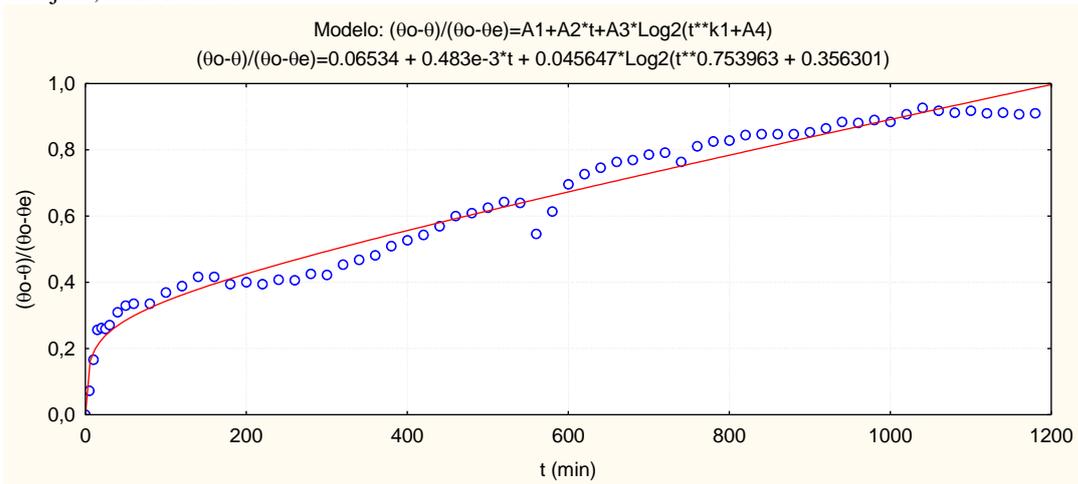
As curvas de aquecimento mostrado nas Figuras 6.69 a 6.73, mostram uma boa concordância entre as curvas dos resultados experimentais com as curvas preditas pela Equação (6.4), para algumas situações as curvas do aquecimento experimental, apresenta uma quebra de continuidade, isto ocorreu, em função do experimento ser demorado e passar de um dia para o outro havendo portanto a necessidade da interrupção do experimento e foi exatamente esta interrupção a causa quebra da continuidade da curva experimental.

Figura 6.69 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=56°C.



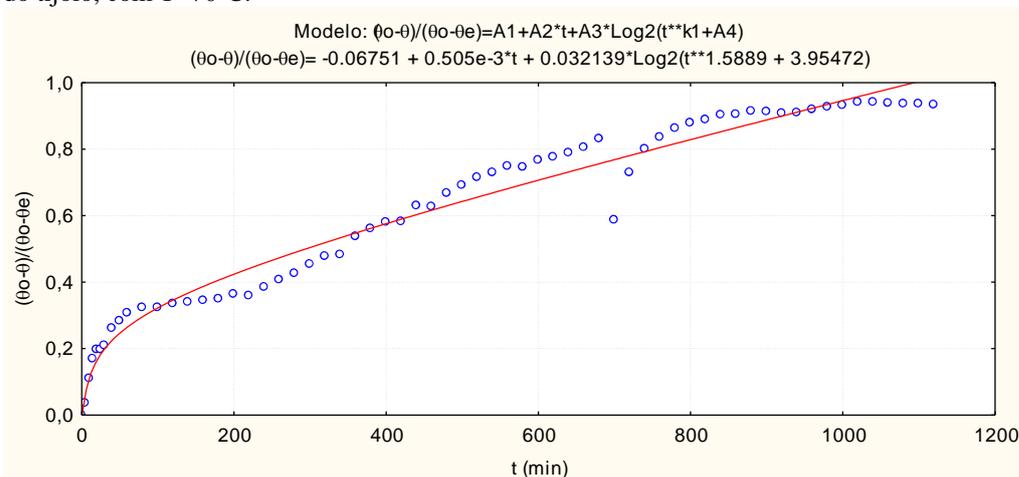
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.70 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=63°C.



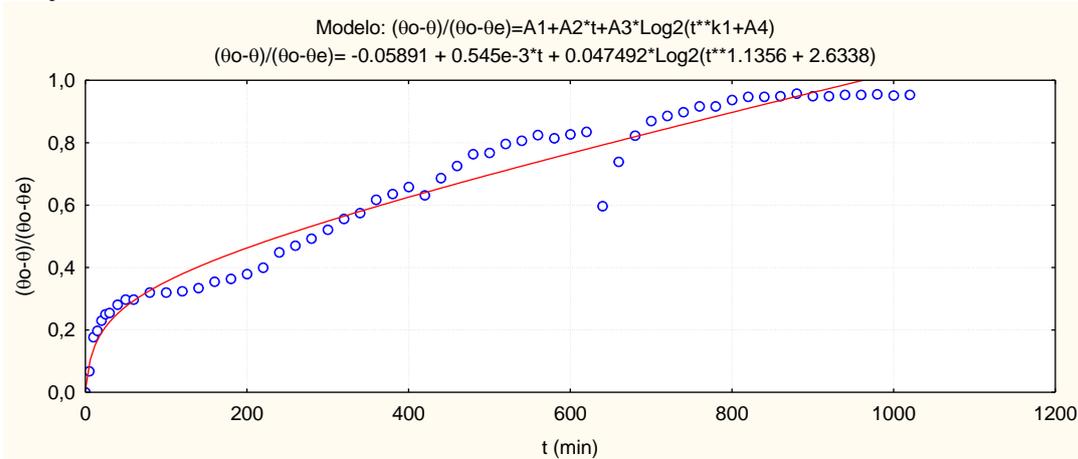
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.71 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T=70°C.



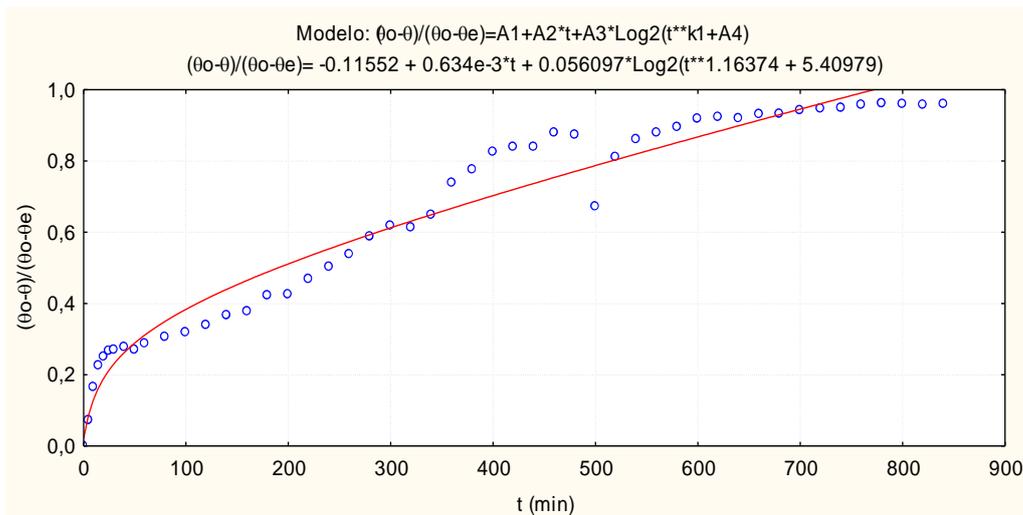
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.72 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com $T=77^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.73 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com $T=85^{\circ}\text{C}$.



Fonte: Autor (2021).

6.2.3 Tratamento matemático dos dados experimentais, para a secagem e aquecimento no secador, com vagoneta em movimento e furo do tijolo paralelo ao fluxo de ar

6.2.3.1 Secagem

As Figuras 6.74 e 6.75 mostram um comparativo entre os valores obtidos no experimento, usando o secador com a vagoneta em movimento, com os valores preditos pela equação matemática (6.3); esta análise foi feita para o tijolo com furo paralelo ao fluxo de ar e também para o tijolo com furo perpendicular ao fluxo de ar.

A Tabela (6.7) mostra os valores paramétricos ajustados aos dados experimentais, os mesmos foram ajustados para os experimentos realizados com a vagoneta em movimento e a temperatura variável. Foi utilizado o método numérico Hooke-Jeeves e Quasi-Newton, empregando o Software Statistica®.

Das Figuras 6.74 e 6.75 e Tabela (6.7) observa-se que a melhor correlação entre os dados experimentais e os valores preditos pela Equação (6.5) aconteceu para a amostra de tijolo com o furo perpendicular ao fluxo de ar.

Para as duas situações do experimento, onde em uma o furo do tijolo é paralelo ao fluxo de ar e na outra situação onde o furo do tijolo é perpendicular, para ambas o coeficiente de correlação (R), aproximou-se de 1, mostrando que a Equação (6.5), descreve satisfatoriamente os dados coletados experimentalmente.

$$(M - Me)/(Mo - Me) = A_1 \text{Exp}(k_1 t) + A_2 \text{Exp}(k_2 t) \quad (6.5)$$

Tabela 6.7 – Parâmetros da equação (6.5) obtidos após ajuste aos dados experimentais, para umidade.

T (°C)	Parâmetros				R	Proporção da variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	A ₁	k ₁	A ₂	k ₂			
VR*	0.5049209	- 0.0225773	0.5029210	- 0.0225774	0.99714	99.429	0.00193365
VR**	0.9621834	- 0.0137671	0.0378166	- 5.4644225	0.99818	99.637	0.00063013

Fonte: Autor (2021)

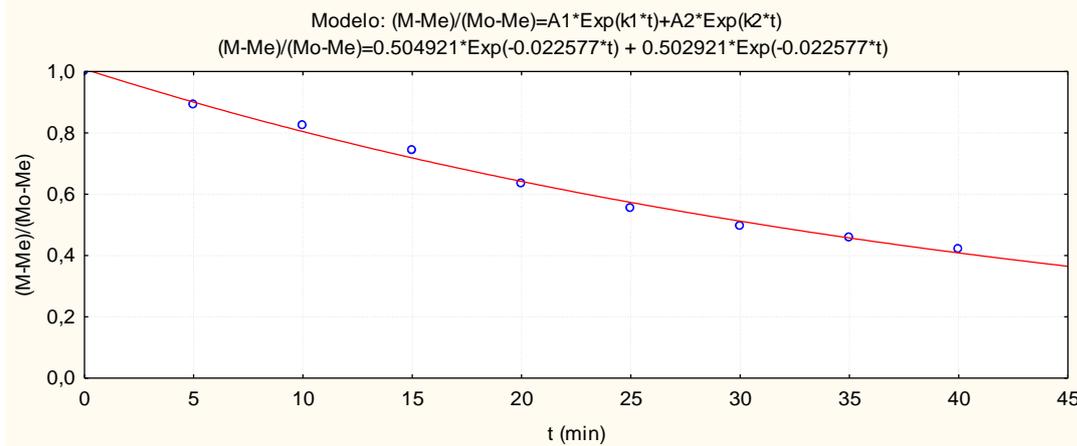
VR* - Furo paralelo ao fluxo de ar

VR** - Furo perpendicular ao fluxo de ar

Experimento secagem no secador, vagoneta em movimento, tijolo furo paralelo ao fluxo de ar, temperatura variável

As Figuras 6.74 e 6.75, mostram além da boa concordância das curvas experimentais com as preditas pela Equação (6.5), também é possível observar que a taxa de secagem do tijolo de furo paralelo ao fluxo de ar, é superior à taxa de secagem do tijolo com furo perpendicular ao fluxo de ar de secagem.

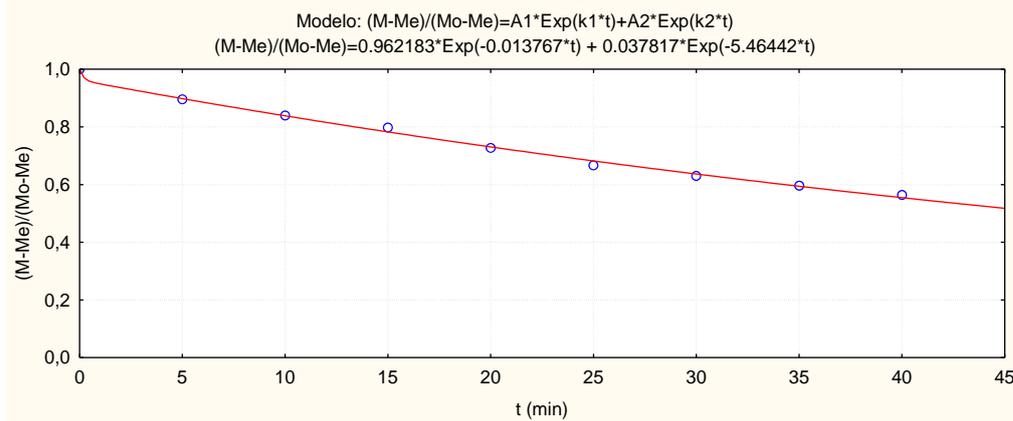
Figura 6.74 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T= variável.



Fonte: Autor (2021)

Experimento secagem no secador, vagoneta em movimento, tijolo furo perpendicular ao fluxo de ar, temperatura variável

Figura 6.75 – Comparação dos teores de umidade experimental (oooo) e o predito (—), para T= variável.



Fonte: Autor (2021)

6.2.3.2 Aquecimento

Foi utilizada a Equação (6.6) para fazer um comparativo entre o aquecimento do tijolo no secador, com o aquecimento predito pela equação.

A obtenção dos dados paramétricos B₁, B₂, B₃, B₄, m da Equação (6.6), foram obtidos através do método numérico Hooke-Jeeves e Quasi-Newton empregando o Software Statistica®.

$$(\theta_0 - \theta) / (\theta_0 - \theta_e) = B_1 + B_2 \times t + B_3 \times \text{Log}_2(t^m + B_4) \tag{6.6}$$

Tabela 6.8 – Parâmetros da equação (6.6) ajustados aos dados experimentais

T (°C)	Parâmetros					R	Proporção da variância (%)	Função de perda (obs-pred) ²
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	M			
VR*	0.8955120	0.0316536	-0.1842881	29.007442	1.7191994	0.99806	99.612	0.0008064
VR**	1582.0991	0.4998098	-175.07190	525.24916	1.0174505	0.99770	99.541	0.0002765

Fonte: Autor (2021)

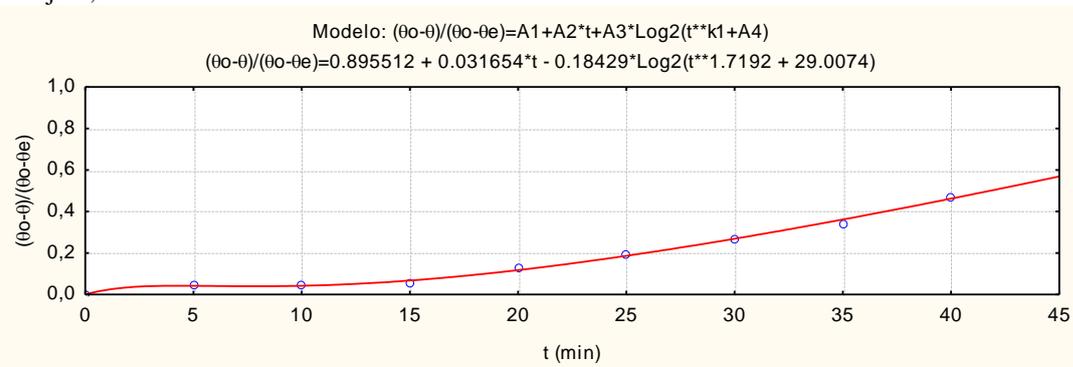
VR* - Furo paralelo ao fluxo de ar

VR** - Furo perpendicular ao fluxo de ar

Experimento secagem no secador, vagoneta em movimento, tijolo furo paralelo ao fluxo de ar, temperatura variável

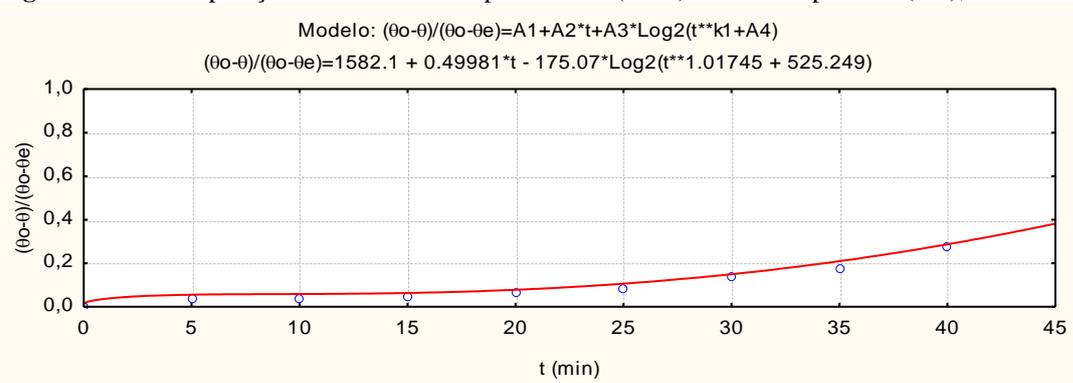
As Figuras 6.76 e 6.77, mostram uma maior taxa de aquecimento para a amostra do tijolo cujo furo ficou paralelo ao fluxo de ar de secagem, quando comparado com a amostra cujo furo ficou perpendicular ao fluxo de ar, também é possível verificar boa concordância entre as curvas de aquecimento.

Figura 6.76 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), para o aquecimento do tijolo, com T= variável.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.77 – Comparação entre os dados experimentais (oooo) e os dados preditos (—), com T= variável.



Fonte: Autor (2021).

6.3 Resultados numéricos

Neste item está sendo mostrado um comparativo das curvas dos resultados experimentais com as curvas obtidas através de modelamento numérico, os referidos resultados se referem a secagem e aquecimento do tijolo e foi tomado como base os seguintes experimentos: amostra estática dentro do secador, amostra estática dentro da estufa, amostra em movimento dentro do secador.

Para prever o processo de secagem e aquecimento do tijolo, foram desenvolvidos dois programas computacionais no ambiente do *software Mathematica*[®].

6.3.1 Resultados numéricos do experimento realizado na estufa

Com as soluções analíticas das equações de transferência de massa e calor, foram feitos ajustes dos resultados preditos encontrados com estas soluções e os resultados calculados a partir das Equações (6.7) e (6.8), para se estimar os parâmetros de processo, notadamente os coeficientes de transferência de calor e de massa convectivos, para as diferentes condições de secagem. Para isto foram desenvolvidos dois programas computacionais no ambiente do *software Mathematica*[®], sendo um para obter-se h_m e outro para h_c . As estimativas destes parâmetros foram obtidas baseando-se nos erros médios quadráticos, dados pelas seguintes equações:

$$ERM = \sum_{i=1}^{np} (\bar{M}_{pred} - \bar{M}_{exp})^2 \quad (6.7)$$

$$ERT = \sum_{i=1}^{np} \left[\frac{\bar{\theta}_{pred} - \bar{\theta}_{exp}}{\bar{\theta}_{exp}} \right]^2 \quad (6.8)$$

Onde np representa o número de pontos experimentais.

Será mostrado neste item comparativos entre os resultados preditos numericamente e os resultados obtidos experimentalmente, isto no que se refere a secagem e aquecimento do tijolo, tomando como referência o experimento realizado na estufa, com a amostra estática.

A Tabela 6.9 mostra os valores dos coeficientes de transporte estimados: h_m coeficiente de transferência de massa convectivo e h_c coeficiente de transferência de calor convectivo,

obtidos a partir do ajuste aos dados experimentais, isto se deu para o caso do experimento realizado na estufa.

Os valores do h_c coeficiente de transferência de calor convectivo menor que $10 \text{ (W/m}^2\cdot\text{°C)}$, é típico de convecção natural.

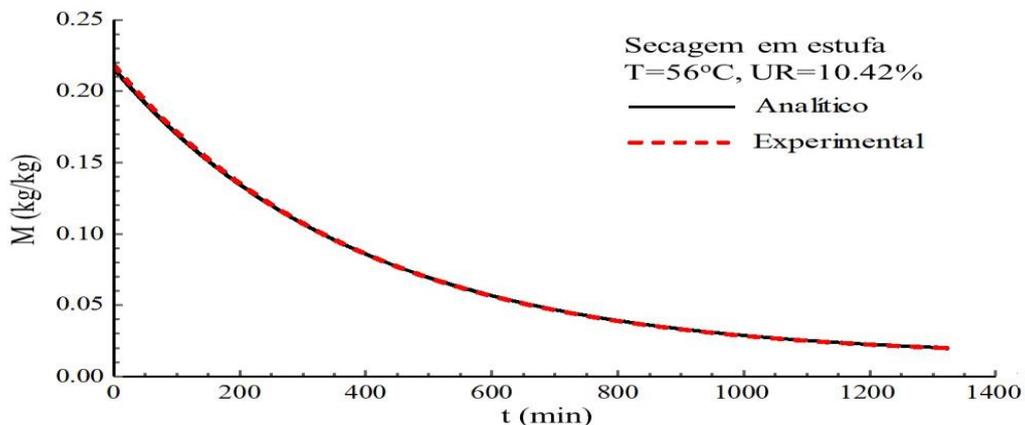
Tabela 6.9 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em estufa)

T (°C)	h_m (m/s)	ERM (kg/kg) ²	h_c (W/m ² ·°C)	ERT (°C/°C) ²	So/Vo (m ² /m ³)
56	1.80833×10^{-7}	0.0000597259	5.30900	0.726955	0.24314
63	2.22500×10^{-7}	0.0000450783	5.23550	1.037140	0.24629
70	2.55167×10^{-7}	0.0006026400	4.98700	1.047000	0.24149
77	3.11833×10^{-7}	0.0001380970	5.23050	1.171650	0.25642
85	3.82833×10^{-7}	0.0001698560	5.74533	0.912155	0.24474

Fonte: Autor (2021)

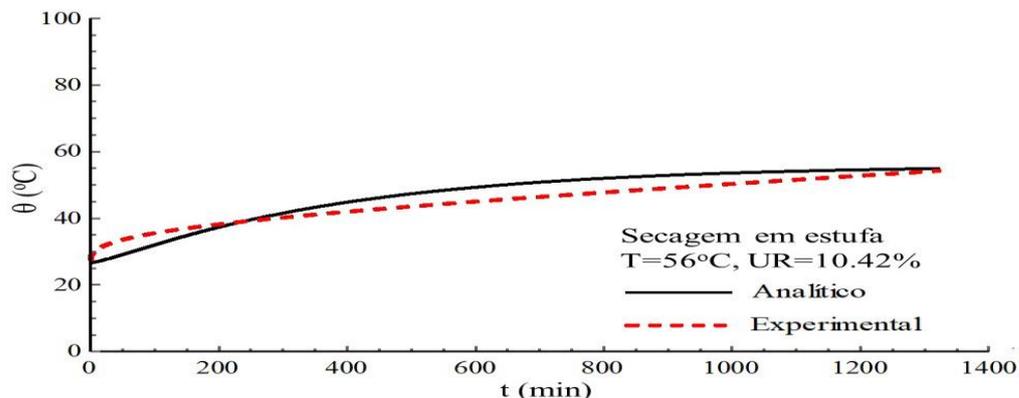
As Figuras 6.78 a 6.87, mostram as variações do teor de umidade e da temperatura, para as amostras ensaiadas na estufa. Para a obtenção das referidas Figuras foram usados os seguintes dados: temperatura da estufa, variando de 56°C a 85°C ; a umidade relativa, variando de 10,42% a 2,76%, o tempo, variando conforme tabelas B1 a B5 do Anexo B.

Figura 6.78 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 56°C .



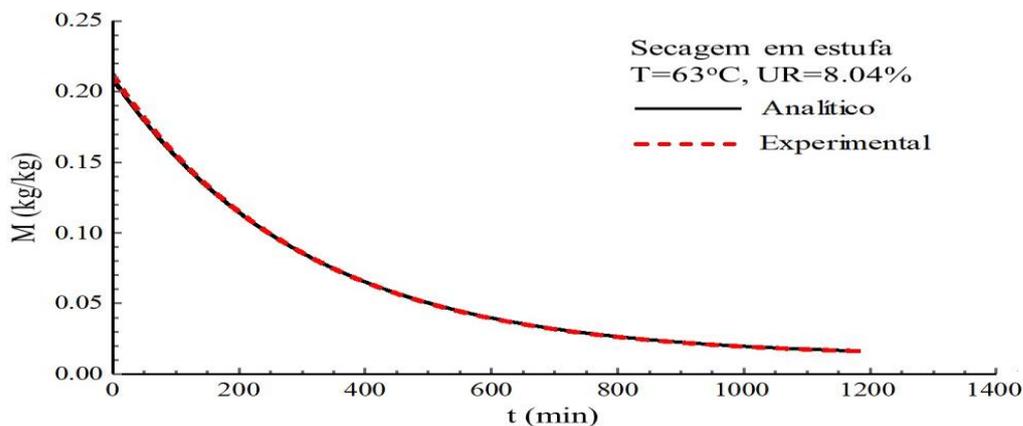
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.79 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 56 °C.



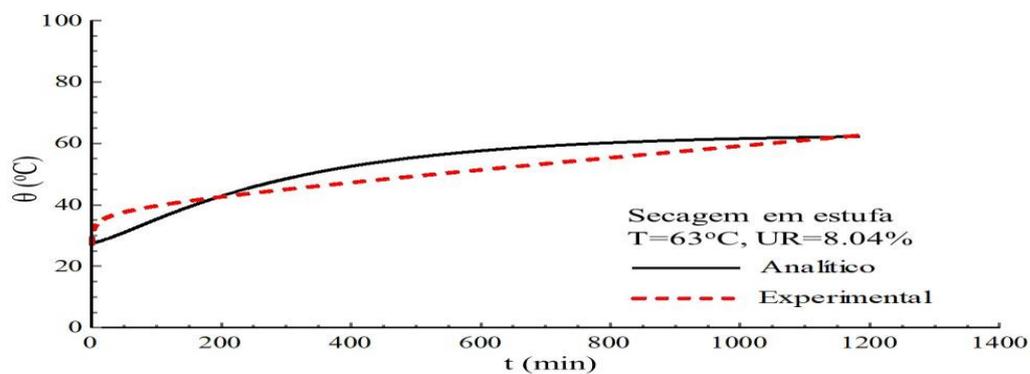
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.80 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 63 °C.



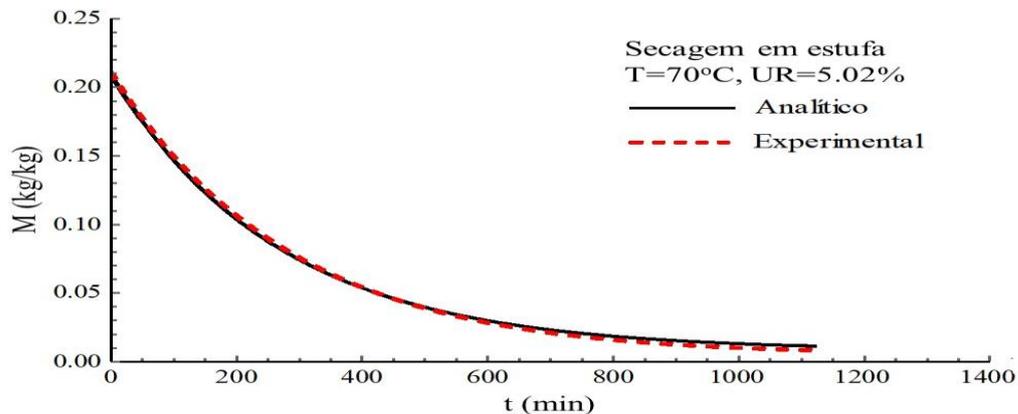
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.81 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 63 °C.



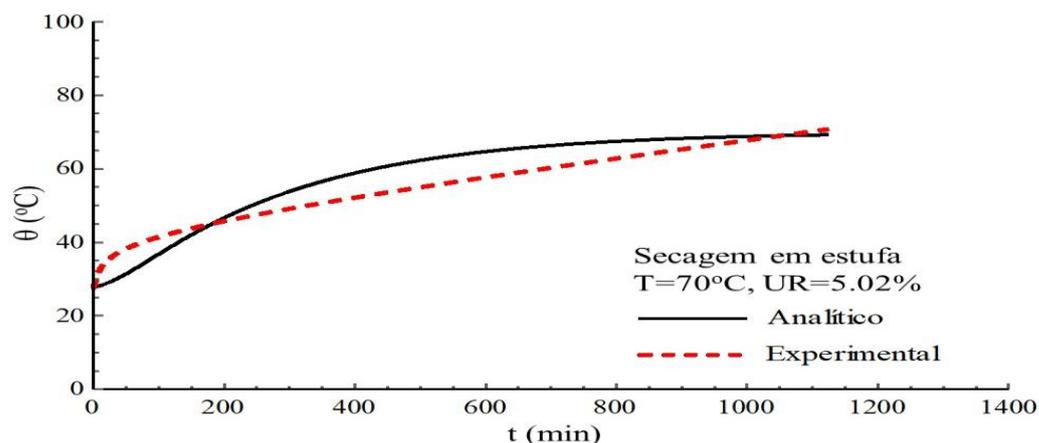
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.82 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 70 °C.



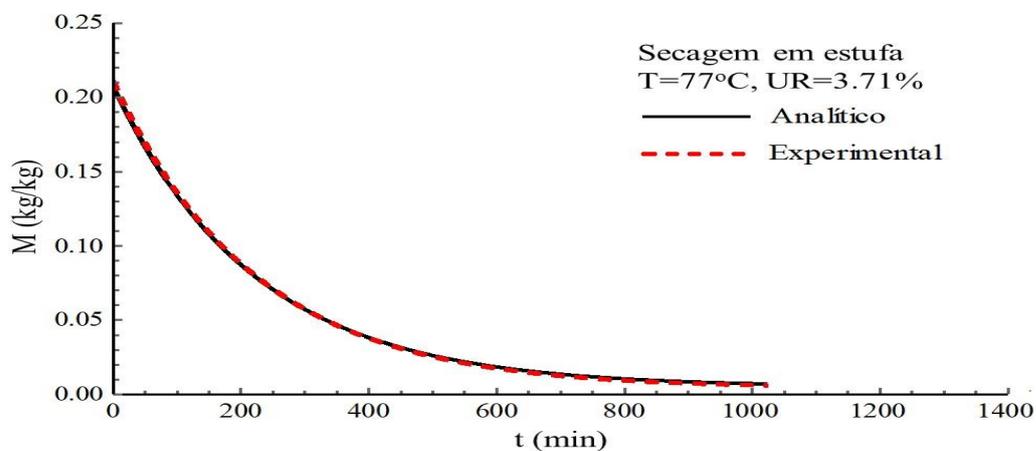
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.83 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 70 °C.



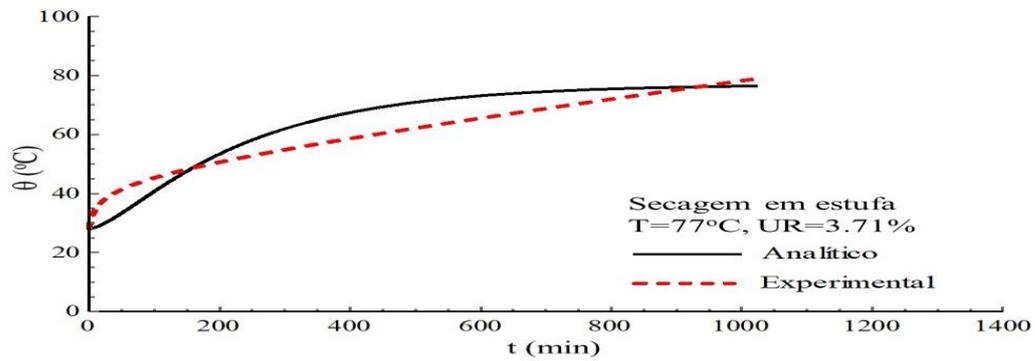
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.84 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 77 °C.



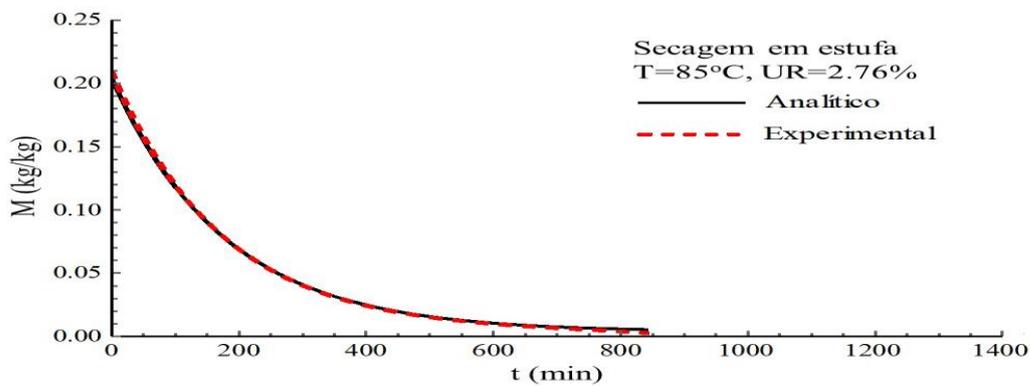
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.85 – Comparação entre as variações temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 77 °C.



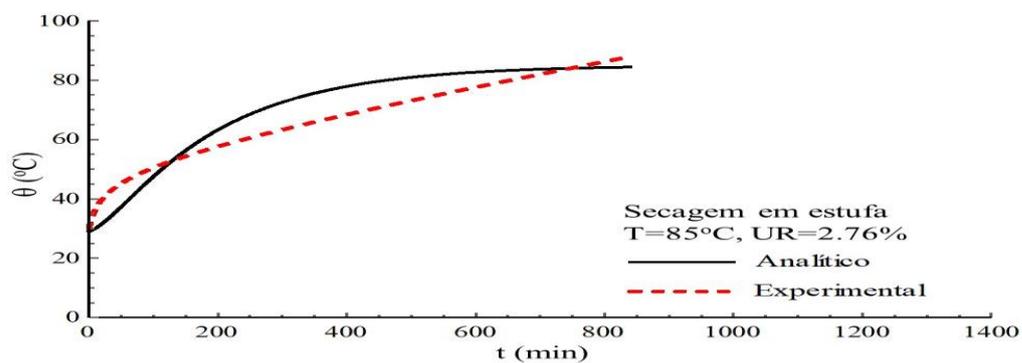
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.86 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 85 °C.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.87 – Comparação entre as variações temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem em estufa, com temperatura de 85 °C.



Fonte: Autor (2021).

6.3.2 Resultados numéricos, do experimento realizado no secador, com a vagoneta estática

Os valores do h_c coeficiente de transferência de calor convectivo maior que 10 ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$), mostrados na Tabela 6.10 é típico de convecção forçada, também é possível observar baixos valores para os erros relativos, isto mostra que o modelo proposto se ajustou bem.

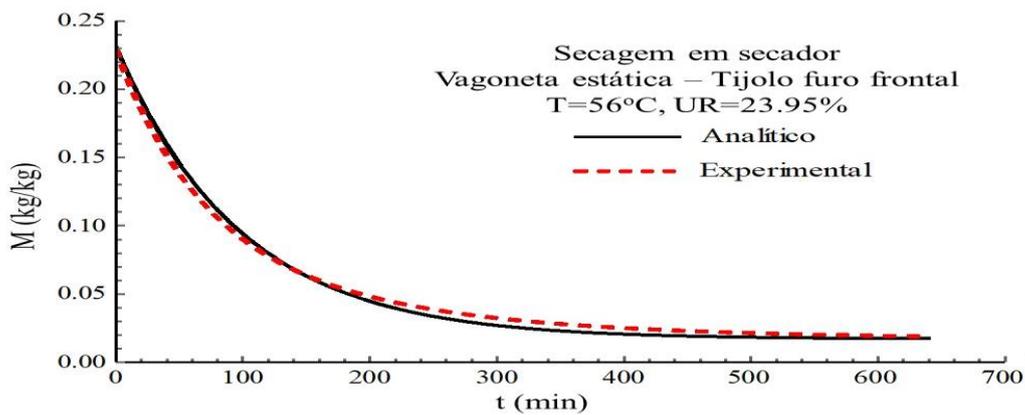
Tabela 6.10 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em secador – vagoneta estática – tijolo com furo frontal)

T ($^\circ\text{C}$)	h_m (m/s)	ERM (kg/kg) ²	h_c ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$)	ERT ($^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$) ²	So/Vo (m^2/m^3)
56	6.25333×10^{-7}	0.001161350	19.0932	0.0247302	0.24932
63	8.02500×10^{-7}	0.005651080	21.5592	0.0181623	0.24830
70	6.92833×10^{-7}	0.000676965	14.3367	0.0475603	0.25257
77	9.94500×10^{-7}	0.004347050	23.2162	0.2711060	0.25211
85	11.1733×10^{-7}	0.003388040	23.9273	0.0166986	0.24901

Fonte: Autor (2021)

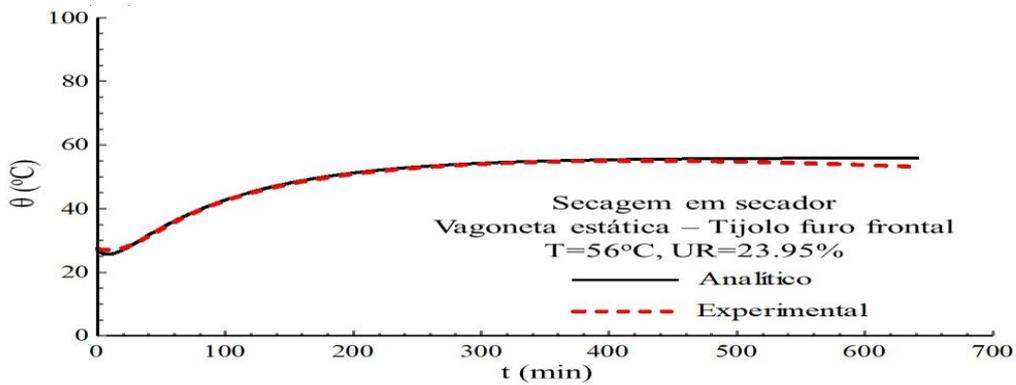
As Figuras 6.88 a 6.97, mostram as variações do teor de umidade e da temperatura, para as amostras ensaiadas no secador. Para a obtenção das referidas Figuras, foram usados os seguintes dados: temperatura do secador variando de 56°C a 85°C ; a umidade relativa variando de 23,95% a 18,52%.

Figura 6.88 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 56°C .



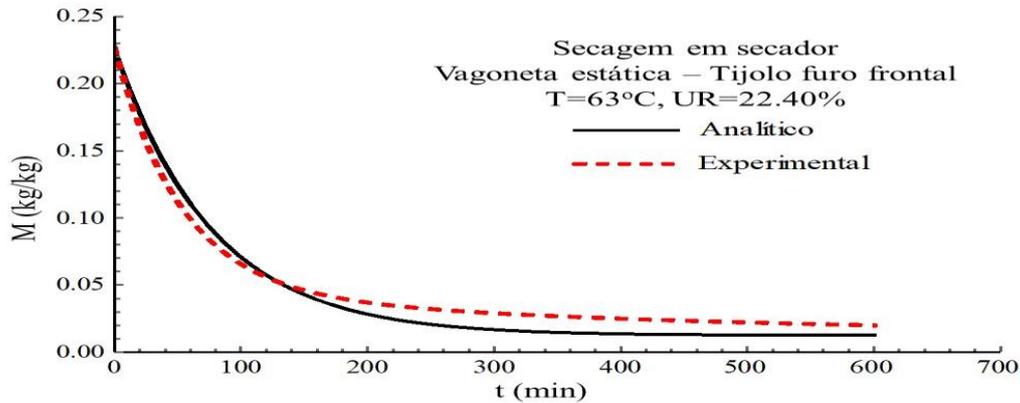
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.89 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 56 °C.



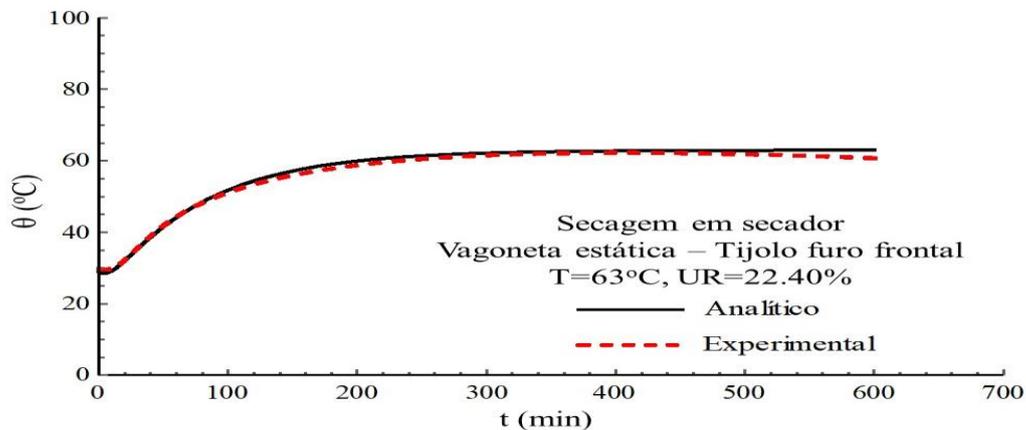
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.90 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 63 °C.



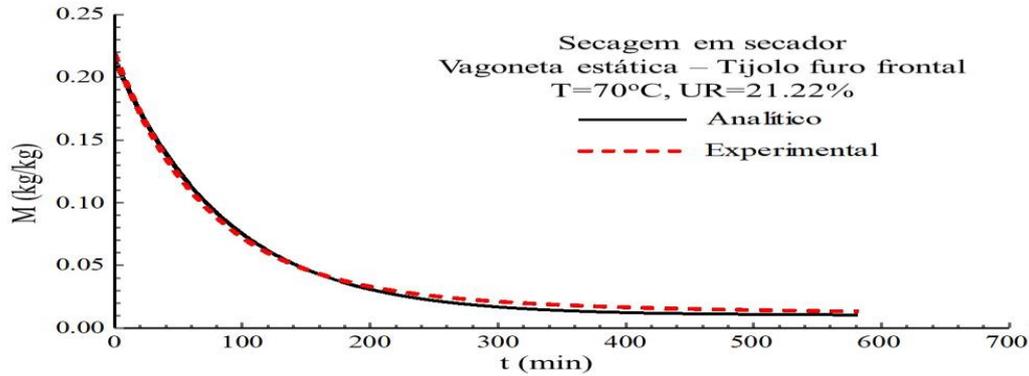
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.91 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 63 °C.



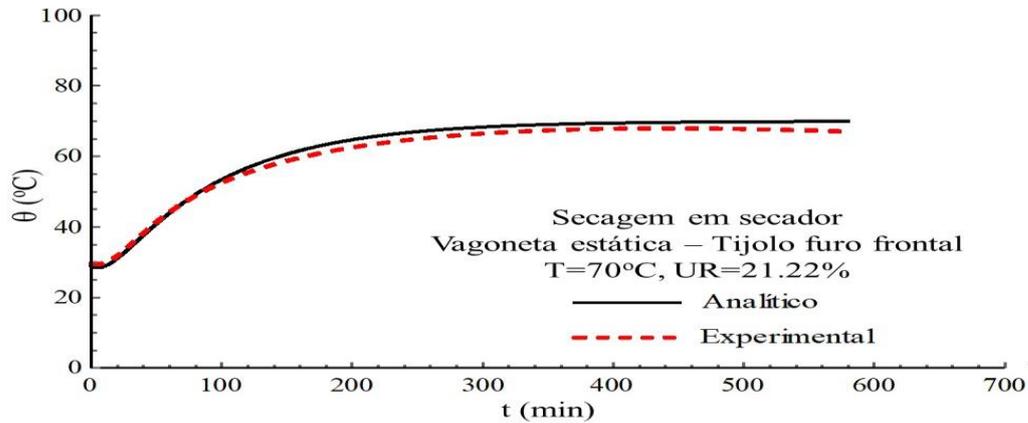
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.92 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 70 °C.



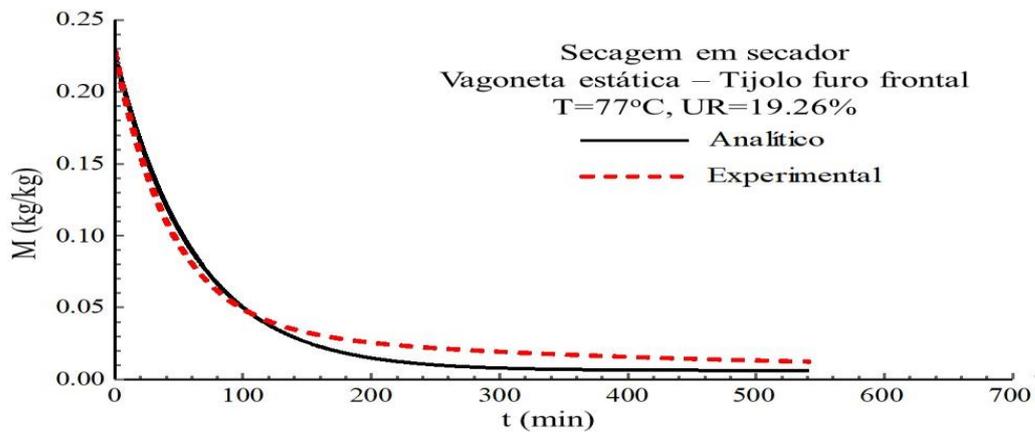
Fonte: Autor (2021)

Figura 6.93 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 70 °C



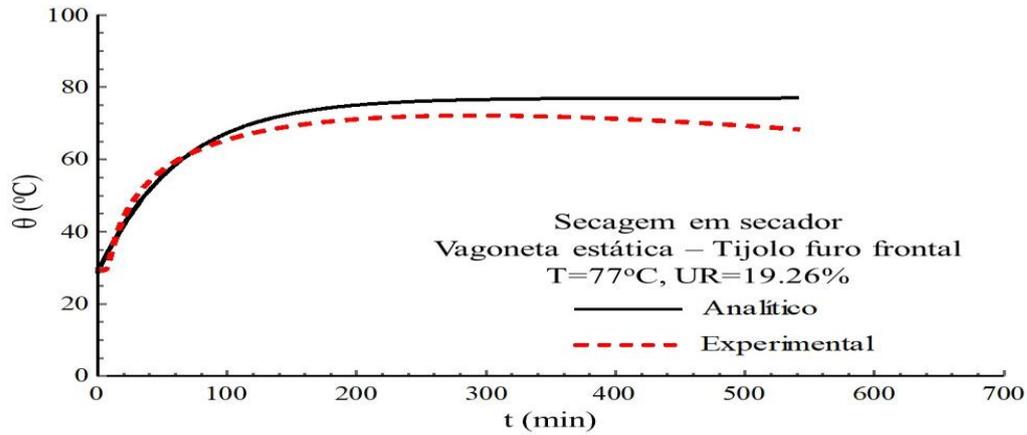
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.94 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 77 °C.



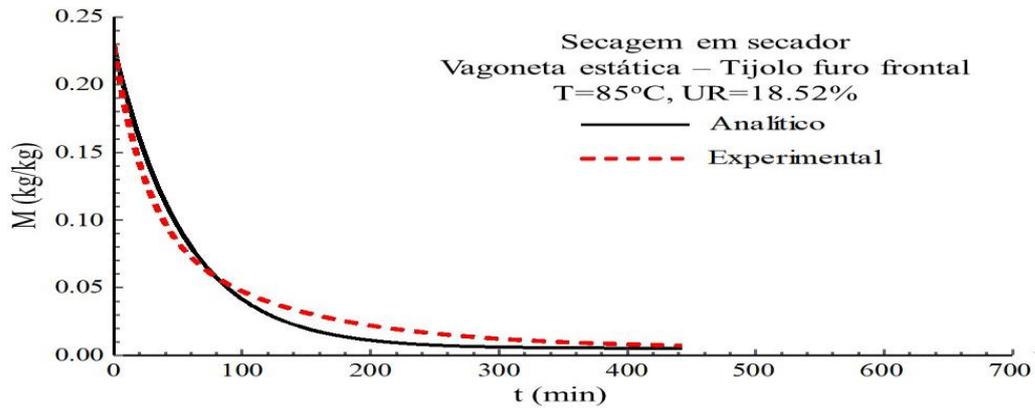
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.95 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 77 °C.



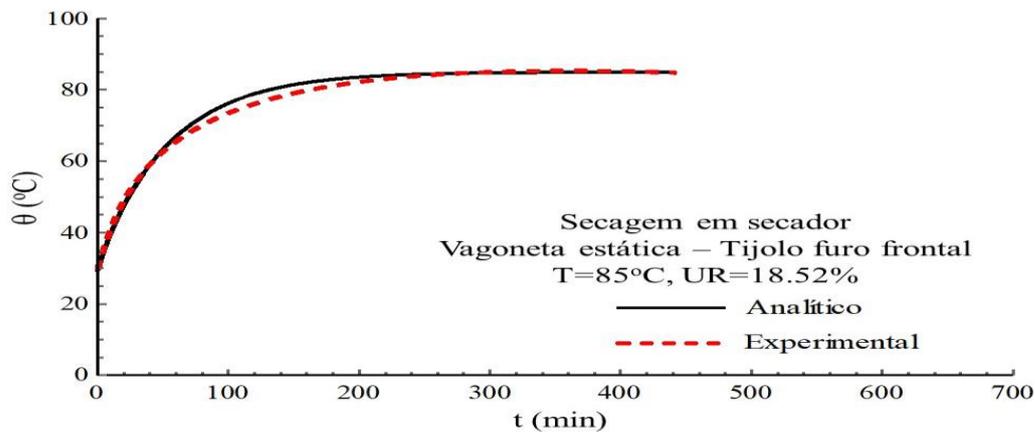
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.96 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 85 °C.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.97 – Comparação entre as variações de temperaturas obtidas experimentalmente e numericamente, para secagem no secador, com temperatura de 85 °C.



Fonte: Autor (2021).

6.3.3 Resultados numéricos, do experimento realizado no secador, com a vagoneta em movimento

Para a estimativa do coeficiente de transferência de massa convectivo h_m , na situação física onde a vagoneta está em movimento, utilizou-se como teor de umidade de equilíbrio do tijolo, na equação para o cálculo do teor de umidade, um valor igual à média aritmética de todos os teores de umidade de equilíbrio obtidos em cada temperatura do ar dentro do secador, desde que Me varia com as condições de secagem (Me médio=0,0108069 kg/kg).

Para a estimativa do coeficiente de transferência de calor convectivo h_c , na situação física onde a vagoneta está em movimento, utilizou-se como temperatura de equilíbrio, na equação para o cálculo da temperatura do tijolo, um valor igual à média aritmética de todas as temperaturas do ar dentro do secador (T_a média=68,56°C e Ura media=21,89%). Esse mesmo valor foi usado para estimar o valor do calor latente de vaporização da água h_{fg} no interior do secador, já que este parâmetro termodinâmico e o teor de umidade de equilíbrio foram considerados constantes durante o processo de secagem e tratamento matemático para obter a solução analítica das equações governantes.

Tabela 6.11 – Coeficientes de transporte estimados a partir do ajuste aos dados experimentais (secagem em secador – vagoneta movimento – tijolo com furo frontal e perpendicular)

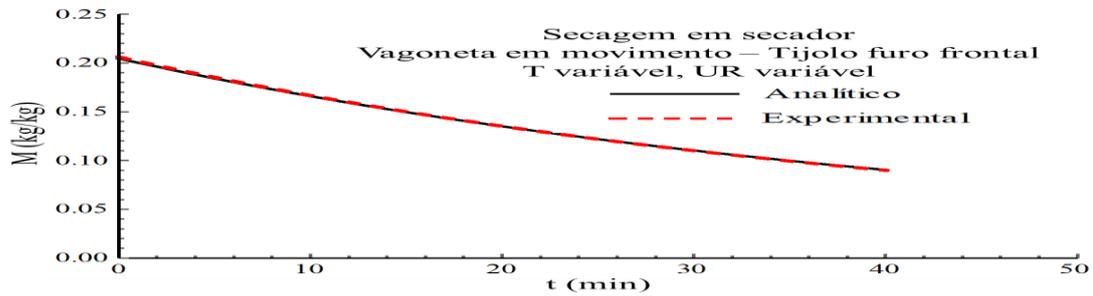
T (°C)	h_m (m/s)	ERM (kg/kg) ²	h_c (W/m ² .°C)	ERT (°C/°C) ²	So/Vo (m ² /m ³)
56-85-56*	13.9600×10^{-7}	0.000004467	30.8883	0.0149152	0.26561
56-85-56**	9.74000×10^{-7}	0.000068126	21.5207	0.0164970	0.26177

Fonte: Autor (2021)

* Variável com furo paralelo ao fluxo de ar ** Variável com furo perpendicular ao fluxo de ar

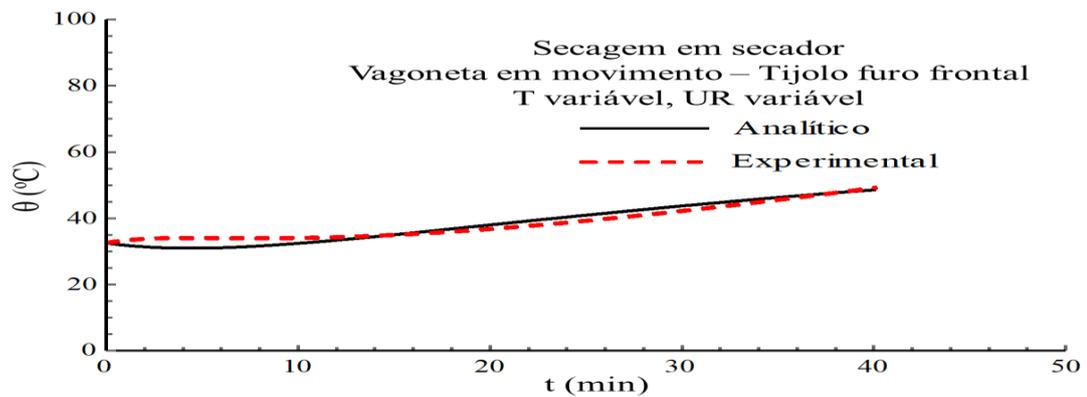
As Figuras 6.98 a 6.101, mostram as variações do teor de umidade ou da temperatura, para o ensaio utilizando o secador e a amostra em movimento, para a obtenção das referidas Figuras foram usados os seguintes dados: temperatura do secador variando de 56°C a 85°C; a umidade relativa variando de 23,95% a 18,52%.

Figura 6.98 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, furo do tijolo frontal.



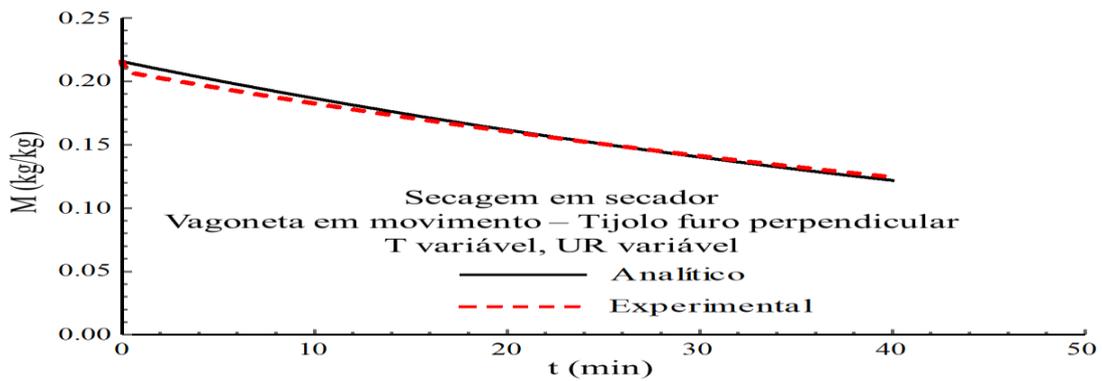
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.99 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, furo do tijolo frontal.



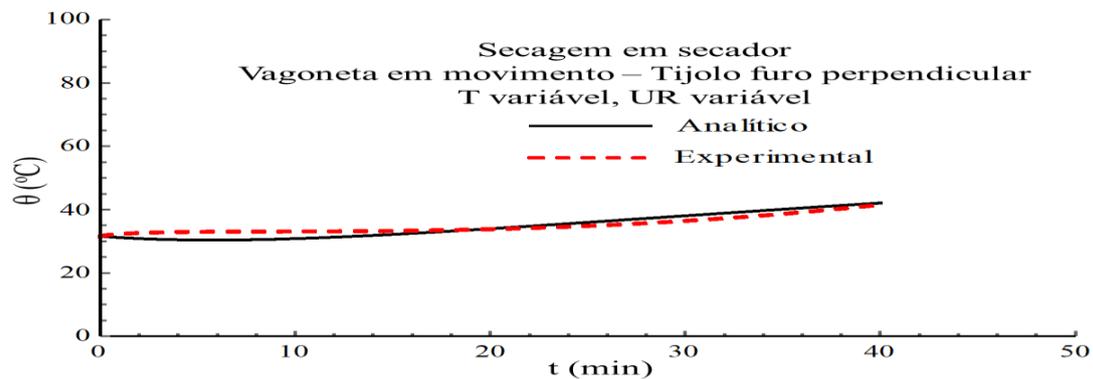
Fonte: Autor (2021).

Figura 6.100 – Comparação entre as variações dos teores de umidade obtidos experimentalmente e numericamente, furo do tijolo perpendicular.



Fonte: Autor (2021).

Figura 6.101 – Comparação entre as variações de temperatura obtidas experimentalmente e numericamente, furo do tijolo perpendicular.



Fonte: Autor (2021).

6.4 Custo do secador

O custo do secador é composto por os seguintes custos: Custo da estrutura de alvenaria, custo do sistema de ventilação e custo da estrutura mecânica.

Custo da estrutura de alvenaria

A estrutura de alvenaria do secador é a que representa o menor custo, pois é composta de materiais de baixo custo quando comparado com os materiais da parte mecânica e da parte de ventilação.

A Tabela 6.12, mostra uma estimativa do custo para a construção da estrutura de alvenaria, considerando o custo do material e o custo da mão de obra.

Tabela 6.12 - Custo da estrutura de alvenaria

	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
1.600 tijolos	0,5	800,00
10 telhas de amianto	75,00	750,00
28 m de colunas de concreto	16,14	452,00
Mao de obra (6 diárias de um pedreiro, 6 diárias de um ajudante)	180,00	1.080,00
Despesas adicionais		220,00
TOTAL		3.302,00

Fonte: Autor (2021)

Custo do sistema de ventilação

O custo do sistema de ventilação é composto pelos ventiladores e os materiais complementares, conforme Tabela 6.13, observa-se que os maiores custos são em função dos preços dos ventiladores, principalmente o ventilador de insuflamento que é o que representa o maior custo, um outro custo relativo a esta parte de ventilação é o custo da construção dos canais de transporte de ar quente, que interliga os fornos ao secador, porém, estes canais já existem e por este motivo não foi considerado na análise do custo.

Tabela 6.13 - Custo do sistema de ventilação

Equipamentos	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Ventilador de insuflamento	7.500,00	7.500,00
Ventilador extrator de umidade 5°Cm	950,00	950,00
Materiais complementares (fios, termômetros, disjuntores, parafusos...)	700,00	700,00
Mao de obra	350,00	350,00
Despesas adicionais		400,00
TOTAL		9.900,00

Fonte: Autor (2021)

Custo da estrutura mecânica

O custo da estrutura mecânica é o mais significativo dos custos da construção do secador, conforme Tabela 6.14, pois o mesmo representa 60,60% do custo total do secador, e dentro deste custo da estrutura mecânica, o custo das esteiras transportadoras é o que apresenta um maior valor.

Tabela 6.14 - Custo da estrutura mecânica

Equipamentos	Custo (R\$)
Motor com redutor	5.400,00
Esteira transportadora	7.400,00
Materiais complementares (eixos, mancais, polias, correntes...)	4.500,00
Mao de obra (usinagem torno, montagem...)	2.350,00
Despesas adicionais	700,00
TOTAL	20.350,00

Fonte: Autor (2021)

Custo total do secador

O custo total do secador, compreende a soma dos custos da estrutura de alvenaria; custo do sistema de ventilação; custo da estrutura mecânica, conforme Tabela 6.15, ressaltamos que um dos objetivos deste trabalho é desenvolver um secador com um menor custo possível.

Tabela 6.15 - Custo total do secador

Custo	Valor (R\$)
Custo da estrutura de alvenaria	3.302,00
Custo do sistema de ventilação	9.900,00
Custo da estrutura mecânica	20.350,00
Custo total	33.552,00

Fonte: Autor (2021)

6.4.1 Análise econômica do secador proposto

A análise econômica do secador foi feita levando em consideração a economia gerada pelo secador e o custo mensal do secador incluindo o custo do secador amortizado para um período de 24 meses.

Economia gerada pelo secador

Na análise da economia gerada pelo secador foram analisados os seguintes fatores: custo da mão de obra, aumento da produção e melhoria da qualidade do material. No entanto, apenas o custo da mão de obra e o custo do secador e da amortização, foram mensurados e contabilizados para efeito de cálculos.

Custo da mão de obra

Com a implantação do secador, 5 funcionários que tem a função exclusiva de empilhar e reempilhar os tijolos, esses 5 funcionários representam um custo mensal de R\$ 8.160,00, conforme Tabela 6.16, entretanto, a empresa realocará em outras funções, todavia o remanejamento desses 5 funcionários implicará na não contratação de 5 novos funcionários o que implicará em uma economia mensal de R\$ 8.160,00.

Tabela 6.16 - Custo da mão de obra

Quantidade de funcionários	Custo unitário do salário e encargos (R\$)	Custo total dos 5 funcionários (R\$)
05	1.632,00	8.160,00
TOTAL		8.160,00

Fonte: Autor (2021)

Aumento no processo produtivo

Com a instalação do secador, haverá uma otimização do processo de secagem do material cerâmico desta empresa, pois o tempo de secagem será reduzido, considerando que atualmente a empresa produz 600 mil peças mês, o que dá uma média de 20 mil peças por dia, as medições realizadas no protótipo do secador mostraram, que o secador irá reduzir em 4 dias o tempo de secagem ao longo do mês, estes 4 dias que foram reduzidos uma vez utilizados para a produção, implicará em um aumento de produção de 80 mil peças mês.

Melhoria na qualidade

No processo de produção atual, o tijolo ao sair da máquina ainda com aproximadamente 20% de água, é manuseado por funcionários e colocado sobre carrinhos transportadores e distribuídos no interior dos galpões. Entretanto, nesta fase inicial, devido ao percentual de 20% de água contida no tijolo, faz com que o mesmo se torne maleável e em função disto, o funcionário ao pega-lo deforma o tijolo, causando uma perda de qualidade. Todavia, com a implantação do secador, este contato inicial entre o trabalhador e o tijolo na fase inicial deixa de existir, pois o tijolo sai da máquina e entra direto no secador, e, após sair do secador, é que o tijolo tem o primeiro contato com o trabalhador. Entretanto, neste momento o tijolo já tem perdido 54% da sua umidade inicial conforme Tabela C1 do Anexo C o que faz com que ele se torne indeformável com o contato do trabalhador.

Medições mostraram que atualmente 0,19% dos tijolos produzidos são descartados por defeitos provenientes do manuseio do trabalhador com o tijolo, para uma produção 600 mil peças/mês, podemos afirmar que 1,14 mil peças mês são descartadas.

O aumento da qualidade do tijolo após a implantação do secador poderá implicar em um aumento do preço de venda do tijolo, porém, não é possível afirmar de fato que isto poderá ocorrer pois aumento do preço do tijolo, depende de várias outras variáveis como por exemplo: lei da oferta e da procura; situação econômica do país e outros fatores.

Custo mensal do secador

O custo mensal do secador compreende basicamente o custo do consumo da energia elétrica devido ao funcionamento dos motores elétricos, o custo das manutenções preventivas e as manutenções corretivas.

Custo mensal do consumo de energia

Serão utilizados no secador, 3 motores elétricos com as respectivas potências: 5 CV; 3 CV; 0,25 CV, totalizando 8,25 CV de potência instalada.

Considerando que cada CV de motor, consome 0,75 kwh de energia, para o caso específico desta cerâmica o secador irá trabalhar 8 horas por dia, sendo que a produção e secagem ocorrem durante 4 dias na semana e 16 dias no mês, o que totaliza 128 horas trabalhadas no mês, o custo mensal da energia elétrica pode ser calculado pela Equação 4.1.

$$C_{me} = 0,75 \times C_i \times N_h \times V_k \quad (4.1)$$

Onde:

C_{me} = Custo mensal da energia elétrica.

C_i = Carga instalada em Cv dos motores elétricos.

N_h = Números de horas trabalhadas no mês.

V_k = Valor do kwh, cobrado pela concessionária de energia.

Portanto, para o caso específico, temos o seguinte valor para o custo mensal da energia elétrica.

$$C_{me} = 0,75 \times C_i \times N_h \times V_k$$

$$C_{me} = 0,75 \times 8,25 \times 128 \times 0,85$$

$$\mathbf{C_{me} = 673,20 \text{ reais}}$$

Custo mensal da manutenção do secador

Estimar o custo mensal de manutenção do secador não é fácil, principalmente no que diz respeito a manutenção corretiva, pois não sabemos exatamente o momento em que um motor vai queimar ou um rolamento ou corrente vão quebrar. Entretanto, em função das características dos equipamentos que compõe o referido secador, é possível estimar um custo mensal para a realização da manutenção corretiva e preventiva, o custo mensal estimado é de 550,00 reais.

Custo total mensal do secador

O custo total mensal do secador, compreende o custo do consumo da energia elétrica, somado com o custo estimado de manutenção, conforme Tabela 6.17, no que se refere ao custo de manutenção, está incluso no mesmo, o custo da manutenção preventiva e corretiva.

Tabela 6.17 - Custo total mensal do secador

Custo mensal	Valor (R\$)
Custo mensal do consumo de energia.	673,20
Custo mensal estimado da manutenção do secador	550,00
Custo mensal do valor do secador amortizado para o período de 24 meses, (33.552/24)	1.398,00
Custo mensal total	2.621,20

Fonte: Autor (2021)

6.4.2 Comparativo entre o custo mensal do secador e a economia mensal gerada pelo secador

O comparativo numérico foi feito entre o custo mensal do secador e a economia mensal gerada pelo secador, os valores estão mostrados na Tabela 6.18.

Não foi considerado neste comparativo o possível ganho econômico em função da melhora da qualidade do tijolo devido ao uso do secador, também não foi considerado o ganho econômico em função do aumento da produção, pois estas duas variáveis dependem de outras variáveis e a análise de todas estas variáveis, não é possível para este momento.

Tabela 6.18 - Comparativo do custo mensal do secador e a economia mensal gerada pelo secador

	Valores (R\$)
Economia com mão de obra (+)	8.160,00
Custo mensal total (-)	2.621,20
Total a ser economizado	5.538,80

Fonte: Autor (2021)

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

7.1. Conclusões

Através dos dados obtidos nos experimentos realizados no processo de fabricação no próprio chão de fábrica, como também, com os experimentais realizados no secador em laboratório e também através de análise matemática e numérica dos dados, é possível concluir que:

a) Secagem natural

- No processo de secagem natural do tijolo no interior do galpão, o tempo de secagem foi de 9 dias; ao longo destes 9 dias o teor de umidade caiu de 506,86ml para 175,99ml uma perda média de 330,86ml, restando 176ml de umidade remanescente.
- Nos 2 primeiros dias a perda de umidade foi de 175,57ml, o que correspondeu a 53,06% do total da perda.
- As trincas nos tijolos ocorreram nos 2 primeiros dias, que foi o período de maior perda de umidade e conseqüentemente maior retração do tijolo.

b) secador

- O custo-benefício de operação do secador é vantajoso.
- Nos experimentos realizados no secador, o tijolo perdeu 230ml de água em 40min, o que corresponde à perda de 4 dias no processo de secagem natural.
- O secador conseguiu reduzir em 4 dias o tempo de secagem dos tijolos.
- No que se refere a secagem e aquecimento das amostras, o secador apresentou um melhor desempenho quando comparado com a estufa, isto quando se leva em consideração as mesmas temperaturas e o menor tempo.
- Na secagem realizada no secador as amostras se mantiveram integras sem perdas de qualidade, na secagem na estufa as amostras trincaram.

c) análise dos dados

- As equações matemáticas empíricas, ajustaram muito bem aos dados dos experimentos realizados no secador e na estufa, mostrando uma boa concordância de valores e gráficos para as variáveis: perda de umidade e absorção de calor.
- A boa concordância entre os valores preditos pelas equações matemáticas, com os valores experimentais, mostra o acerto do uso das referidas equações.
- Para todas as condições dos experimentos, verificou-se boa concordância entre as curvas referentes aos dados experimentais e as curvas numéricas.

7.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Descobrir a melhor temperatura e velocidade do ar de secagem, capazes de secar o material em um menor tempo possível, mantendo a integridade do material.
- Desenvolver uma modelagem energética e exergética para o secador proposto.
- Propor correlações para os números de Nusselt e Sherwood a partir dos parâmetros h_m e h_c .

REFERÊNCIAS

ABCERAM– Associação Brasileira de Cerâmica. **Informações técnicas - Processos de Fabricação**. 2017. [em : <http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>](http://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/). Acesso em: 22 maio. 2018b.

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

ALMEIDA, G.S. **Transferência de calor e massa em sólidos heterogêneos com geometria arbitrária: uma análise concentrada**. Dissertação (Mestrado). UFPB. 67 p., 2003.

ARAÚJO, M. V. *et al.* Convective Drying of Ceramic Bricks by CFD: Transport Phenomena and Process Parameters Analysis. **Energies**, v. 13, p. 2073., 2020. <https://doi.org/10.3390/en13082073>

ARAÚJO, M. V. *et al.* Industrial Ceramic Brick Drying in Oven by CFD. **Materials**, v.12, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270: Componentes Cerâmicos**. Rio de Janeiro, p. 8., 2005.

AVELINO, D. O.; LIMA, A. G. B. Estudo das tensões durante a secagem de tijolos cerâmicos vazados: modelagem e simulação. **Revista Pesquisa**, v.1, n.5, pp 633- 650, 2007.

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

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

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

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

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

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

CADÉ, M. A.; NASCIMENTO, J. J. S.; LIMA, A. G. B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos. **Revista Matéria**, v. 10, n. 3, p. 443-452, 2005.

CBC – Congresso Brasileiro de Cerâmica. **61cbc**. 2017. Disponível em:

<http://www.metallum.com.br/61cbc/>. Acesso em: 08 jun. 2019.

COSTA, J. A. N. **Avaliação da Secagem de Materiais de Construção**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Porto, Portugal, 84 p., 2013.

DADAM A. P. *et al.* **Instrumentação e medição de temperaturas em uma carga de tijolos no interior de um forno túnel** - LabCet – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis – SC – Brasil, 2005.

DAMIANI, J. C. *et al.* Coração negro em revestimentos cerâmicos: Principais causas e possíveis soluções. **Revista Cerâmica Industrial**, v.6, n.2, 2001.

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

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

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

FREITAS, F. C. G. **Balanco energético de um forno túnel de cerâmica estrutural convertido de lenha para gás natural**. Tese – Curso de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 92 f., 2007.

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

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

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

HAMMOUDA, I.; MIHOUBI, D. Modelling of drying induced stress of clay: elastic and viscoelastic behaviours. *Mech Time-Depend Mater. Mechanics of Time-Dependent Materials*, vol. 18, p. 97-111, 2013.

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

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais**. 7. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

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

HOROSTECKI, M. Modernização é alternativa para cerâmicas enfrentarem a crise. *Notícias do Dia*, Florianópolis, 22 abr. 2016. Disponível em: <<https://ndonline.com.br/florianopolis/noticias/modernizacao-e-alternativa-para-ceramicas-enfrentarem-a-crise>>. Acesso em: 18 fev. 2018.

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

ICEMEG – Equipamentos Metalúrgicos. **Secadores Para Telhas e Tijolos Semi-Contínuos e Estático**. 2020. Disponível em : www.icemeg.com.br. Acesso em 05 jan. 2020.

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

ISMAIL, K.A.R., **Técnicas de Medidas e Instrumentação**, 3^o ed, Campinas-SP, 2009

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

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

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

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

LIMA, A.G.B. **Fenômeno de difusão em sólidos esferoidais prolato. Estudo de caso: Secagem de bananas**. Tese (Doutorado), UNICAMP, São Paulo, 256 p., 1999.

LOPEZ, E. M.; CORTES, L.L. Moisture Transfer Analysis During Drying of Brick by Temperature and Relative Humidity Profiles. *In: European Scientific Journal*, 2013

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

NASCIMENTO, J. J. S. **Fenômenos de difusão transiente em sólidos paralelepípedos**. Estudo de Caso : Secagem de materiais cerâmicos. Tese de Doutorado. UFPB, 2003 p., 2002.

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

NETO, V. C. **Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 174 p., 2001.

NICOLAU, V. P. *et al.* Análise experimental de um secador contínuo utilizado na indústria de cerâmica vermelha. **Proceedings of the III National Congress of Mechanical Engineering**, Belém – PA, 10p, 2004.

NICOLAU, V. P. *et al.* Análise numérica e experimental de um forno intermitente para a queima de produtos cerâmicos. *In: Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, João Pessoa – PB, 10p, 2002.

OLIVEIRA, V. A. B.; LIMA, A. G. B. Drying of wheat based on the non-equilibrium thermodynamics: a numerical study. **Drying Technology**, v. 27, p. 306-313, 2009.

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

PAKOWSKI, Z. *et al.* 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. <https://doi.org/10.1080/07373939108916708>

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

RECCO, G. Estudo para utilização de energia térmica proveniente de forno cerâmico para secagem de cerâmica. **Cerâmica Industrial**. Moliza revestimentos cerâmicos Ltda. SC - Brasil. v. 13, n. 3, 2008.

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

SCHWOB, M. R. V. **Consumo de gás natural no setor cerâmico brasileiro e perspectivas de expansão**. Estudo encomendado pela Petrobrás ao INT, Rio de Janeiro, 2005.

SILVA, A. M. V. *et al.* Industrial Ceramic Blocks for Buildings: Clay Characterization and Drying Experimental Study. **Energies**, v. 13, 2020.

SILVA, L. D. *et al.* Descrição da secagem de placas cerâmicas por meio de um modelo de difusão. **Cerâmica**, v. 59, 2013.

SILVA, W. P. *et al.* Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions. **Springer-Verlag**, v. 34, 2011

VIEIRA, C. M. F.; FEITOSA, H. S.; MONTEIRO, S. N. **Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de bigot**. Laboratório de Materiais Avançados (LAMAV) Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) – RJ, 2003.

ZANDER, A. J. J. V.; WIT, M. H. A Procedure to Measure the Diffusion Coefficient of Water in Brick as a Function of the Water Concentration. **Drying Technology**: na international journal, v. 28, 2012

ANEXO A – Secagem das amostras no secador

Quadro A1 - Experimento 1: Tijolo no ponto 0m, no secador, furo paralelo ao fluxo de ar

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	M (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2382	27,0	97,87	155,08	207,00	8,24	8,59	7,19	6,91	37,33	40,86	56	24	1,8	29	54
5	2350	26,6	97,59	154,65	206,45	8,21	8,56	7,17	6,90	37,22	40,82	55	24	1,8	29	54
10	2330	27,2	97,28	154,16	205,82	8,19	8,54	7,14	6,90	37,11	40,78	55	24	1,8	29	54
15	2310	27,1	96,98	153,69	205,20	8,17	8,29	7,12	6,89	36,99	40,74	56	24	1,7	29	54
20	2293	27,4	96,68	153,22	204,57	8,14	8,26	7,10	6,89	36,88	40,71	55	23	1,8	29	54
25	2276	27,7	96,40	152,77	203,98	8,12	8,24	7,08	6,88	36,77	40,67	56	23	1,8	29	53
30	2262	31,9	96,12	152,34	203,41	8,10	8,21	7,06	6,88	36,67	40,64	57	24	1,9	30	53
40	2223	31,8	95,69	151,67	202,51	8,06	8,18	7,03	6,87	36,50	40,58	56	25	1,8	30	53
50	2200	32,8	95,38	151,15	201,88	8,04	8,15	7,01	6,87	36,38	40,54	55	24	1,8	30	53
60	2179	35,5	95,08	150,66	201,27	8,01	8,13	6,99	6,87	36,27	40,50	55	24	1,8	30	53
80	2142	37,0	94,63	149,97	200,36	7,98	8,09	6,96	6,86	36,09	40,44	58	24	1,8	30	53
100	2112	40,0	94,41	149,61	199,90	7,96	8,07	6,95	6,86	36,01	40,41	57	24	1,7	31	53

120	2085	47,5	94,21	149,29	199,46	7,94	8,06	6,93	6,85	35,93	40,39	55	24	1,7	31	53
140	2066	47,7	94,02	148,99	199,08	7,93	8,04	6,92	6,85	35,86	40,36	57	23	1,8	31	53
160	2049	50,6	93,85	148,69	198,71	7,91	8,02	6,91	6,85	35,79	40,34	56	23	1,8	32	53
180	2038	50,5	93,73	148,56	198,52	7,90	8,00	6,90	6,84	35,74	40,31	55	23	1,8	32	52
200	2026	51,4	93,61	148,44	198,34	7,89	7,99	6,90	6,84	35,70	40,29	55	24	1,8	33	52
220	2019	52,4	93,50	148,32	198,22	7,88	7,97	6,89	6,83	35,67	40,26	56	24	1,8	33	52
240	2011	53,2	93,39	148,21	198,12	7,87	7,96	6,88	6,83	35,65	40,25	56	24	1,8	34	52
260	2007	53,3	93,3	148,10	198,03	7,85	7,94	6,88	6,83	35,63	40,23	56	24	1,8	34	52
280	2002	53,8	93,21	147,99	197,94	7,83	7,93	6,87	6,83	35,61	40,20	55	24	1,8	35	52
300	1998	53,9	93,13	147,88	197,85	7,81	7,92	6,86	6,82	35,59	40,17	56	24	1,8	35	51
320	1995	54,0	93,04	147,76	197,75	7,80	7,90	6,86	6,82	35,57	40,15	57	23	1,8	36	51
340	1992	53,3	92,96	147,66	197,66	7,79	7,90	6,85	6,82	35,56	40,12	56	23	1,8	36	51
360	1889	54,0	92,89	147,56	197,58	7,78	7,89	6,85	6,81	35,55	40,09	56	24	1,8	36	51
380	1988	53,1	92,80	147,45	197,50	7,77	7,89	6,85	6,81	35,54	40,06	56	24	1,7	28	55
400	1986	53,8	92,72	147,35	197,42	7,75	7,89	6,84	6,80	35,52	40,04	55	24	1,8	28	55
420	1983	54,2	92,65	147,26	197,34	7,73	7,88	6,84	6,80	35,51	40,01	55	25	1,8	29	56
440	1981	54,4	92,58	147,17	197,27	7,71	7,88	6,83	6,79	35,50	39,98	56	25	1,8	29	55
460	1979	53,9	92,50	147,08	197,20	7,70	7,87	6,82	6,79	35,48	39,96	57	25	1,8	30	54
480	1977	54,0	92,43	146,98	197,13	7,70	7,87	6,81	6,78	35,47	39,94	56	25	1,8	30	54
500	1975	54,4	92,37	146,88	197,07	7,69	7,87	6,80	6,78	35,46	39,91	55	24	1,8	31	53
520	1974	54,5	92,30	146,78	197,01	7,68	7,86	6,79	6,78	35,44	39,88	56	24	1,8	32	53

540	1973	54,5	92,21	146,67	196,94	7,68	7,86	6,78	6,77	35,43	39,86	56	24	1,8	32	53
560	1972	53,8	92,12	146,57	196,88	7,67	7,86	6,77	6,77	35,43	39,85	56	24	1,8	33	53
580	1972	54,6	92,00	146,46	196,85	7,67	7,85	6,76	6,76	35,42	39,84	56	24	1,8	33	53
600	1971	54,2	91,82	146,35	196,80	7,65	7,85	6,75	6,76	35,41	39,82	56	24	1,8	34	53
620	1971	54,1	91,77	146,26	196,78	7,65	7,84	6,75	6,76	35,40	39,81	56	24	1,8	34	53
640	1971	54,7	91,75	146,18	196,75	7,64	7,84	6,75	6,76	35,39	39,80	56	24	1,8	34	53
*2080	*1968	*56	*91,72	*146,09	*196,00	*7,59	*7,82	*6,70	*6,74	*35,10	*39,30					
*3520	*1935	*105	*91,58	*145,91	*195,93	*7,54	*7,80	*6,60	*6,73	*34,78	*39,28					

Fonte: Autor (2021)

Obs: As medidas (*), foram obtidas utilizando a estufa.

Quadro A2 - Experimento 1: Tijolo no ponto 5m, no secador, furo paralelo ao fluxo de ar

T (min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	M (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2360	29,00	98,02	155,01	205,30	8,21	8,73	7,19	6,93	37,27	40,88	63	23	2,2	32	57
5	2331	29,10	97,73	154,56	204,71	8,18	8,70	7,18	6,91	37,16	40,84	63	23	2,2	32	57
10	2301	29,60	97,42	154,06	204,03	8,16	8,67	7,18	6,90	37,04	40,81	64	23	2,2	32	57
15	2274	33,00	97,11	153,57	203,40	8,13	8,65	7,17	6,89	36,92	40,76	63	23	2,2	32	57
20	2250	32,80	96,82	153,09	202,79	8,11	8,62	7,16	6,88	36,81	40,72	62	23	2,1	32	57
25	2220	34,00	96,54	152,63	202,17	8,08	8,60	7,16	6,87	36,70	40,68	63	22	2,1	33	57
30	2197	34,70	96,25	152,18	201,60	8,06	8,57	7,16	6,87	36,59	40,65	64	22	2,2	33	57
40	2166	37,90	95,81	151,48	200,68	8,02	8,54	7,14	6,85	36,42	40,59	63	23	2,2	33	56
50	2133	40,00	95,49	150,98	200,00	8,00	8,51	7,14	6,85	36,30	40,54	64	22	2,2	33	56
60	2117	44,70	95,21	150,50	199,37	7,97	8,48	7,13	6,84	36,18	40,51	64	23	2,2	34	56
80	2077	49,00	94,76	149,78	198,41	7,93	8,44	7,11	6,82	36,00	40,48	63	23	2,2	34	56
100	2055	52,40	94,54	149,43	197,95	7,92	8,42	7,11	6,82	35,92	40,42	63	23	2,2	34	56
120	2039	53,70	94,34	149,10	197,52	7,90	8,41	7,11	6,81	35,84	40,39	63	23	2,1	35	56
140	2025	57,00	94,16	148,80	197,13	7,89	8,39	7,09	6,81	35,77	40,37	63	22	2,1	35	55

160	2015	57,20	93,98	148,53	196,74	7,86	8,38	7,09	6,81	35,70	40,34	63	22	2,2	35	55
180	1996	58,00	93,83	148,31	196,62	7,83	8,31	7,08	6,80	35,64	40,32	64	22	2,2	35	55
200	1993	60,00	93,67	148,10	196,51	7,80	8,24	7,08	6,80	35,58	40,29	62	22	2,1	36	54
220	1989	61,00	93,52	147,88	196,43	7,78	8,17	7,08	6,79	35,52	40,25	63	22	2,2	36	54
240	1985	60,00	93,37	147,67	196,30	7,75	8,10	7,07	6,79	35,47	40,20	62	22	2,2	37	54
260	1980	60,00	93,22	147,46	196,22	7,73	8,03	7,07	6,78	35,41	40,17	63	23	2,2	37	54
280	1978	61,00	93,13	147,31	196,15	7,71	7,96	7,07	6,78	35,37	40,13	64	23	2,2	38	54
300	1975	62,00	93,02	147,17	196,00	7,70	7,92	7,07	6,77	35,33	40,10	63	23	2,2	38	54
320	1974	61,90	92,93	147,03	195,99	7,68	7,87	7,06	6,76	35,30	40,16	63	22	2,1	38	54
340	1973	62,10	92,81	146,88	195,94	7,66	7,82	7,06	6,76	35,26	40,13	64	22	2,2	38	54
360	1973	62,00	92,74	146,74	195,84	7,64	7,78	7,06	6,75	35,22	40,10	64	23	2,2	38	53
380	1972	61,40	92,61	146,60	195,79	7,62	7,73	7,05	6,75	35,18	40,06	63	22	2,2	38	53
400	1971	61,50	92,51	146,45	195,72	7,61	7,69	7,05	6,75	35,16	40,01	63	23	2,2	38	53
420	1971	62,00	92,39	146,31	195,66	7,59	7,64	7,05	6,75	35,14	39,97	64	22	2,2	38	53
440	1970	61,98	92,33	146,23	195,55	7,57	7,58	7,05	6,75	35,13	39,93	65	23	2,2	38	53
460	1970	62,10	92,29	146,16	195,50	7,55	7,55	7,04	6,75	35,11	39,88	65	22	2,2	38	53
480	1969	62,40	92,24	146,00	195,46	7,54	7,50	7,04	6,74	35,09	39,84	64	22	2,2	38	53
500	1969	62,30	92,20	145,95	195,40	7,53	7,47	7,04	6,74	35,07	39,79	63	22	2,1	38	53
520	1968	62,50	92,15	145,87	195,36	7,52	7,45	7,04	6,74	35,05	39,75	64	22	2,2	38	52
540	1968	62,10	92,09	145,72	195,30	7,51	7,44	7,04	6,74	35,03	39,60	63	22	2,2	38	52
560	1967	62,20	91,98	145,62	195,28	7,51	7,42	7,04	6,74	35,01	39,56	63	22	2,2	38	52

580	1967	62,40	91,92	145,58	195,26	7,50	7,42	7,04	6,74	34,99	39,50	63	22	2,2	38	52
600	1967	62,50	91,85	145,51	195,25	7,50	7,41	7,04	6,74	34,98	39,44	63	22	2,2	38	52
*2040	*1948	*63,00	*91,80	*145,36	*195,00	*7,48	*7,40	*7,02	*6,73	*34,95	*39,39					
*3480	*1924	*105,00	*91,75	*145,34	*194,95	*7,45	*7,38	*6,88	*6,72	*34,92	*39,36					

Fonte: Autor (2021)

Obs: As medidas (), foram obtidas utilizando a estufa.*

Quadro A3 - Experimento 3: Tijolo no ponto 10m, no secador, furo paralelo ao fluxo de ar

T (min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2354	29,0	97,78	154,93	205	8,45	8,61	7,22	7,10	37,19	41,20	70	22	2,5	33	58
5	2334	29,5	97,48	154,45	204,37	8,42	8,58	7,20	7,08	37,07	41,16	70	22	2,5	33	58
10	2315	30,0	97,15	153,93	203,67	8,39	8,55	7,19	7,07	36,95	41,15	71	22	2,5	33	58
15	2295	31,0	96,85	153,43	203,03	8,37	8,52	7,18	7,06	36,83	41,11	70	22	2,5	33	58
20	2276	32,0	96,53	152,93	202,38	8,34	8,50	7,17	7,05	36,71	41,07	70	22	2,5	33	58
25	2258	34,0	96,24	152,44	201,71	8,32	8,47	7,17	7,04	36,59	41,03	71	22	2,4	33	58
30	2240	36,0	95,95	151,96	201,10	8,29	8,45	7,16	7,03	36,47	41,00	70	22	2,5	33	58
40	2200	37,0	95,50	151,25	200,15	8,25	8,41	7,14	7,00	36,30	40,94	70	22	2,5	33	57
50	2171	38,6	95,18	150,74	199,48	8,22	8,38	7,14	6,99	36,18	40,90	70	21	2,5	33	57
60	2146	46,0	94,88	150,24	198,80	8,19	8,35	7,14	6,98	36,06	40,86	71	21	2,6	34	57
80	2104	51,0	94,42	149,51	197,84	8,15	8,31	7,12	6,95	35,95	40,80	72	21	2,5	34	57
100	2073	55,0	94,20	149,16	197,39	8,12	8,29	7,12	6,94	35,77	40,77	71	21	2,5	34	57
120	2053	55,0	93,99	148,82	196,92	8,10	8,27	7,11	6,93	35,69	40,74	70	21	2,5	34	56
140	2037	58,0	93,81	148,51	196,53	8,07	8,26	7,09	6,92	35,61	40,72	70	21	2,5	34	56

160	2025	59,0	93,63	148,22	196,16	8,03	8,24	7,07	6,90	35,53	40,69	72	21	2,4	35	56
180	2015	61,0	93,52	148,02	196,08	8,01	8,15	7,06	6,89	35,46	40,67	70	21	2,5	35	56
200	2008	61,0	93,41	147,82	196,00	8,00	8,06	7,04	6,88	35,41	40,61	70	21	2,5	35	56
220	1999	64,0	93,31	147,62	195,93	7,98	7,97	7,02	6,87	35,36	40,55	70	21	2,6	35	56
240	1993	68,0	93,20	147,42	195,82	7,95	7,88	7,00	6,87	35,31	40,50	71	21	2,5	36	56
260	1987	67,0	93,10	147,22	195,78	7,92	7,79	6,98	6,86	35,27	40,44	71	21	2,5	36	56
280	1984	69,0	93,02	147,09	195,72	7,89	7,70	6,96	6,86	35,23	40,39	72	21	2,5	36	56
300	1981	68,0	92,95	146,95	195,66	7,87	7,64	6,95	6,85	35,20	40,34	70	21	2,5	37	56
320	1978	66,0	92,87	146,82	195,61	7,84	7,58	6,92	6,85	35,16	40,29	70	21	2,5	37	56
340	1976	67,0	92,83	146,69	195,57	7,83	7,52	6,90	6,85	35,12	40,24	70	21	2,5	37	56
360	1975	69,0	92,75	146,56	195,50	7,82	7,46	6,90	6,85	35,08	40,19	71	21	2,5	37	56
380	1972	68,5	92,66	146,42	195,46	7,79	7,39	6,89	6,84	35,03	40,13	71	21	2,5	37	56
400	1970	68,0	92,63	146,29	195,42	7,77	7,33	6,89	6,84	35,00	40,06	72	21	2,5	38	56
420	1969	69,0	92,59	146,22	195,37	7,75	7,27	6,87	6,84	35,96	40,00	72	21	2,4	38	55
440	1967	69,0	92,54	146,09	195,34	7,73	7,23	6,87	6,84	35,93	39,94	73	21	2,5	38	55
460	1967	68,0	92,49	145,95	195,29	7,71	7,17	6,87	6,84	35,90	39,87	71	21	2,5	39	55
480	1966	67,0	92,44	145,84	195,25	7,69	7,11	6,86	6,83	35,87	39,81	71	21	2,5	39	55
500	1965	68,0	92,38	145,66	195,21	7,68	7,08	6,86	6,83	35,84	39,75	70	21	2,5	39	55
520	1965	69,0	92,30	145,60	195,18	7,66	7,07	6,86	6,83	35,81	39,70	70	21	2,4	39	55
540	1964	69,0	92,26	145,62	195,16	7,64	7,06	6,86	6,83	35,77	39,64	70	21	2,5	39	55
560	1964	68,0	92,23	145,58	195,13	7,61	7,05	6,86	6,83	35,74	39,58	70	21	2,5	39	55

580	1964	68,0	92,20	145,55	195,12	7,59	7,04	6,86	6,83	34,70	39,50	71	21	2,5	39	55
*2020	*1959	*70,0	*92,14	*145,47	*195,00	*7,54	*7,02	*6,85	*6,82	*34,67	*39,43					
*3460	*1939	*105,0	*92,12	*145,42	*194,93	*7,50	*7,00	*6,83	*6,80	*34,65	*39,39					

Fonte: Autor (2021)

Obs: As medidas (), foram obtidas utilizando a estufa.*

Quadro A4 - Experimento 4: Tijolo no ponto 15m, no secador, furo paralelo ao fluxo de ar

t (min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2372	28,9	97,69	154,98	204,70	8,27	8,76	7,12	6,94	37,38	40,92	77	20	3,1	32	55
5	2335	30,0	97,38	154,48	204,02	8,24	8,73	7,11	6,93	37,26	40,90	77	20	3,1	32	55
10	2300	34,0	97,05	153,95	203,34	8,21	8,70	7,10	6,91	37,13	40,88	77	20	3,1	32	55
15	2269	35,2	96,73	153,42	202,64	8,18	8,67	7,09	6,90	37,00	40,83	77	20	3,1	32	55
20	2238	38,6	96,37	152,88	201,96	8,16	8,64	7,08	6,89	36,87	40,79	78	20	3,1	33	55
25	2211	48,0	96,06	152,37	201,27	8,13	8,61	7,08	6,88	36,75	40,75	78	20	3,2	33	55
30	2186	52,0	95,77	151,88	200,62	8,10	8,59	7,07	6,87	36,63	40,71	77	20	3,1	33	55
40	2146	53,0	95,32	151,15	199,69	8,07	8,55	7,05	6,85	36,46	40,65	77	20	3,1	33	55
50	2115	62,0	95,01	150,65	199,01	8,04	8,52	7,05	6,84	36,34	40,62	76	20	3,0	34	54
60	2087	68,0	94,69	150,13	198,32	8,01	8,49	7,04	6,84	36,21	40,57	77	20	3,1	34	54
80	2055	66,0	94,23	149,39	197,37	7,97	8,45	7,02	6,82	36,09	40,14	78	19	3,0	34	54
100	2031	71,0	94,00	149,00	196,87	7,95	8,43	7,02	6,81	35,97	40,10	77	19	3,1	34	54
120	2013	68,0	93,77	148,65	196,37	7,93	8,41	7,01	6,80	35,79	40,05	78	19	3,1	35	54
140	2003	68,0	93,56	148,27	195,93	7,91	8,39	7,01	6,79	35,70	40,02	77	19	3,1	35	54

*1980	*1947	*77	*92,56	*145,94	*195,00	*7,54	*7,79	*6,95	*6,71	*35,12	*39,52					
*3420	*1935	*105	*92,49	*145,85	*194,80	*7,52	*7,77	*6,94	*6,70	*35,09	*39,49					

Fonte: Autor (2021)

Obs: As medidas (*), foram obtidas utilizando a estufa.

Quadro A5 - Experimento 1: Tijolo no ponto 20m, no secador, furo paralelo ao fluxo de ar

T (min)	Tijolo											Ar				
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	Interno ao secador			Externo ao secador	
												T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2372	29,50	98,00	155,01	205,2	8,19	8,49	7,18	6,94	37,33	40,87	85	19	3,8	33	54
5	2322	36,20	97,66	154,46	204,48	8,16	8,46	7,15	6,93	37,19	40,82	85	19	3,8	33	54
10	2274	44,00	97,29	153,87	203,70	8,13	8,42	7,12	6,92	37,05	40,78	84	19	3,9	33	54
15	2236	45,00	96,92	153,29	202,94	8,10	8,39	7,10	6,91	36,91	40,73	84	19	3,8	33	54
20	2204	48,60	96,55	152,69	202,16	8,06	8,36	7,07	6,90	36,77	40,67	85	19	3,8	33	54
25	2184	47,98	96,21	152,14	201,42	8,04	8,33	7,05	6,89	36,64	40,64	85	19	3,8	33	54
30	2159	51,00	95,87	151,61	200,73	8,01	8,30	7,026	6,89	36,51	40,58	85	19	3,9	33	53
40	2123	55,00	95,3	150,85	199,75	7,97	8,26	6,99	6,87	36,33	40,53	86	19	3,8	33	53

50	2091	70,00	95,07	150,32	199,05	7,94	8,23	6,95	6,87	36,20	40,49	85	19	3,8	34	53
60	2070	71,00	94,72	149,76	198,32	7,91	8,20	6,93	6,86	36,07	40,45	86	19	3,7	34	53
80	2042	73,00	94,23	148,97	197,29	7,86	8,16	6,89	6,84	35,88	40,38	85	19	3,8	34	53
100	2025	72,80	93,95	148,07	196,89	7,84	8,13	6,87	6,84	35,76	40,31	84	19	3,8	34	53
120	2014	73,00	93,67	147,61	196,59	7,81	8,11	6,85	6,83	35,66	40,24	84	19	3,8	34	53
140	2000	78,00	93,42	147,19	196,34	7,79	8,09	6,83	6,83	35,56	40,16	85	19	3,8	35	53
160	1990	77,00	93,20	146,84	196,18	7,77	8,07	6,80	6,82	35,48	40,10	85	19	3,8	35	52
180	1981	78,00	93,09	146,71	196,10	7,72	8,01	6,76	6,82	35,45	40,03	85	18	3,8	35	52
200	1974	81,00	92,98	146,58	196,02	7,68	7,96	6,72	6,82	35,41	39,96	84	18	3,8	35	52
220	1968	85,80	92,87	146,45	195,94	7,63	7,90	6,66	6,81	35,37	39,90	85	18	3,8	35	52
240	1966	84,20	92,76	146,32	195,86	7,59	7,85	6,62	6,81	35,34	39,83	86	18	3,8	35	52
260	1962	85,00	92,70	146,23	195,77	7,54	7,81	6,59	6,81	35,30	39,76	86	18	3,7	36	51
280	1959	85,00	92,63	146,15	195,73	7,51	7,74	6,56	6,80	35,28	39,70	85	18	3,8	36	51
300	1955	86,00	92,54	146,06	195,67	7,48	7,71	6,52	6,80	35,25	39,63	84	18	3,7	36	51
320	1953	84,00	92,46	145,97	195,62	7,45	7,68	6,49	6,80	35,21	39,55	83	18	3,8	37	51
340	1952	85,00	92,40	145,88	195,57	7,42	7,65	6,46	6,79	35,18	39,50	85	18	3,8	37	51
360	1952	84,80	92,35	145,81	195,53	7,41	7,64	6,43	6,79	35,16	39,46	85	18	3,8	37	51
380	1950	84,90	92,30	145,79	195,50	7,40	7,63	6,40	6,79	35,14	39,42	85	18	3,8	37	51
400	1951	84,70	92,29	145,77	195,48	7,39	7,62	6,38	6,79	35,12	39,38	86	18	3,8	37	51
420	1951	85,00	92,27	145,75	195,47	7,38	7,61	6,36	6,79	35,11	39,31	85	18	3,8	37	51
440	1951	85,00	92,27	145,72	195,45	7,37	7,60	6,35	6,79	35,10	39,25	84	18	3,8	38	51

*1880	*1943	*85,00	*92,19	*145,63	*195,30	*7,35	*7,58	*6,34	*6,78	*35,06	*39,00					
*3320	*1933	*105,00	*92,14	*145,62	*195,00	*7,34	*7,56	*6,33	*6,76	*35,05	*38,95					

Fonte: Autor (2021)

Obs: As medidas (), foram obtidas utilizando a estufa.*

ANEXO B – Secagem das amostras na estufa

Quadro B1 - Experimento 2: Tijolo 1 secagem na estufa.

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno a estufa			Externo a estufa	
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2382	26,6	98,12	155,00	205	8,42	9,00	7,27	7,02	37,31	40,4	56	10,42		29,5	58
5	2373	28,7	97,94	154,82	204,73	8,41	8,99	7,26	7,01	37,24	40,34	56	10,42		29,5	57
10	2369	31,6	97,85	154,65	204,49	8,40	8,98	7,25	7,00	37,16	40,29	56	10,42		29,0	57
15	2365	32,0	97,72	154,46	204,24	8,39	8,97	7,24	6,99	37,10	40,23	56	10,42		28,5	57
20	2361	33,1	97,58	154,27	203,98	8,38	8,96	7,23	6,98	37,03	40,19	56	10,42		28,5	56
25	2357	33,7	97,45	154,09	203,73	8,37	8,95	7,22	6,97	36,97	40,12	56	10,42		28,3	56
30	2355	33,9	97,32	153,92	203,48	8,36	8,94	7,21	6,96	36,90	40,07	56	10,42		28,0	54
40	2345	34,5	97,15	153,68	203,21	8,35	8,93	7,20	6,96	36,83	40,02	56	10,42		28,0	53
50	2336	34,7	97,02	153,52	202,97	8,34	8,92	7,19	6,95	36,76	39,96	56	10,42		28,0	52
60	2327	35,3	96,96	153,69	202,72	8,33	8,91	7,18	6,94	36,68	39,91	56	10,42		27,7	50
80	2310	35,7	96,91	153,61	202,46	8,32	8,90	7,17	6,93	36,63	39,85	56	10,42		27,5	48
100	2297	36,1	96,86	153,54	202,27	8,31	8,89	7,16	6,92	36,57	39,81	56	10,42		27,5	47
120	2284	36,6	96,82	153,48	202,09	8,30	8,88	7,15	6,922	36,52	39,77	56	10,42		27,3	47
140	2270	37,0	96,76	153,40	201,90	8,29	8,87	7,14	6,91	36,47	39,73	56	10,42		27,1	45
160	2255	37,1	96,71	153,33	201,71	8,28	8,86	7,13	6,90	36,42	39,68	56	10,42		27,0	45
180	2243	37,3	96,66	153,26	201,52	8,27	8,85	7,12	6,90	36,37	39,65	56	10,42		27,0	44
200	2231	37,4	96,61	153,19	201,33	8,26	8,84	7,11	6,89	36,32	39,61	56	10,42		27,0	44
220	2219	37,4	96,55	153,10	201,13	8,25	8,83	7,10	6,88	36,27	39,58	56	10,42		27,0	44
240	2208	37,6	96,51	153,04	200,95	8,24	8,82	7,09	6,88	36,22	39,53	56	10,42		27,0	44
260	2197	37,8	96,49	152,99	200,77	8,23	8,81	7,08	6,87	36,18	39,48	56	10,42		27,0	44
280	2186	37,9	96,41	152,90	200,57	8,23	8,80	7,08	6,86	36,13	39,45	56	10,42		27,0	43
300	2176	38,0	96,37	152,83	200,40	8,22	8,80	7,07	6,85	36,07	39,41	56	10,42		27,0	43
320	2166	38,1	96,32	152,76	200,25	8,21	8,79	7,06	6,84	36,03	39,38	56	10,42		27,0	43
340	2157	38,4	96,28	152,68	200,07	8,20	8,78	7,05	6,84	35,98	39,34	56	10,42		27,0	43

360	2148	39,1	96,22	152,62	199,92	8,19	8,77	7,04	6,83	35,94	39,31	56	10,42		26,8	43
380	2140	39,5	96,18	155,55	199,76	8,19	8,76	7,04	6,83	35,90	39,27	56	10,42		26,8	43
400	2132	40,3	96,13	152,48	199,63	8,18	8,76	7,03	6,82	35,85	39,24	56	10,42		26,6	43
420	2125	39,4	96,08	152,41	199,51	8,17	8,75	7,02	6,81	35,81	39,20	56	10,42		29,4	58
440	2118	39,7	96,03	152,34	199,38	8,16	8,74	7,01	6,81	35,76	39,17	56	10,42		28,2	54
460	2111	40,3	95,97	152,27	199,23	8,15	8,73	7,00	6,80	35,71	39,12	56	10,42		26,4	55
480	2104	42,3	95,53	152,20	199,13	8,15	8,72	7,00	6,80	35,68	39,10	56	10,42		26,7	52
500	2098	42,5	95,48	152,14	199,00	8,14	8,72	6,99	6,79	35,64	39,07	56	10,42		26,8	49
520	2092	42,8	95,44	152,06	198,87	8,13	8,71	6,98	6,78	35,60	39,03	56	10,42		26,7	47
540	2086	42,9	95,38	152,00	198,75	8,12	8,70	6,97	6,78	35,58	39,01	56	10,42		26,7	46
560	2081	42,9	95,34	151,93	198,62	8,12	8,70	6,97	6,77	35,54	38,99	56	10,42		26,9	45
580	2076	43,0	95,29	151,87	198,50	8,11	8,69	6,96	6,77	35,51	38,96	56	10,42		26,7	44
600	2071	45,0	95,24	151,80	198,37	8,10	8,68	6,95	6,76	35,47	38,92	56	10,42		27,0	44
620	2067	45,4	95,20	151,74	198,25	8,10	8,68	6,95	6,76	35,44	38,91	56	10,42		27,1	44
640	2062	45,8	95,15	151,67	198,12	8,09	8,67	6,94	6,75	35,40	38,89	56	10,42		26,9	43
660	2058	46,0	95,11	151,60	198,02	8,08	8,66	6,93	6,75	35,37	38,87	56	10,42		26,8	43
680	2054	46,3	95,05	151,54	197,97	8,08	8,65	6,93	6,74	35,36	38,86	56	10,42		26,7	43
700	2050	46,7	95,01	151,47	197,89	8,07	8,65	6,92	6,76	35,34	38,85	56	10,42		26,8	44
720	2046	47,1	94,96	151,40	197,89	8,07	8,64	6,91	6,76	35,33	38,84	56	10,42		26,7	43
740	2043	47,3	94,92	151,34	197,82	8,07	8,64	6,91	6,75	35,31	38,82	56	10,42		26,8	43
760	2039	47,5	94,86	151,29	197,75	8,06	8,63	6,90	6,75	35,29	38,81	56	10,42		26,8	43
780	2036	48,3	94,83	151,21	197,67	8,06	8,62	6,89	6,75	35,28	38,79	56	10,42		26,9	43
800	2032	48,6	94,77	151,14	197,58	8,05	8,61	6,89	6,74	35,25	38,78	56	10,42		27,0	43
820	2029	48,9	94,74	151,08	197,52	8,05	8,61	6,88	6,74	35,24	38,78	56	10,42		27,1	43
840	2023	49,2	94,68	151,01	197,45	8,04	8,60	6,88	6,73	35,23	38,75	56	10,42		27,1	44
860	2020	49,8	94,65	150,96	197,42	8,04	8,60	6,87	6,73	35,20	38,74	56	10,42		27,0	44
880	2018	50,1	94,63	150,89	197,40	8,03	8,59	6,86	6,73	35,17	38,72	56	10,42		27,0	44
900	2015	50,6	94,61	150,82	197,87	8,03	8,58	6,86	6,72	35,15	38,71	56	10,42		26,9	43
920	2013	50,4	94,59	150,78	197,84	8,02	8,58	6,85	6,72	35,14	38,69	56	10,42		26,8	43
940	2011	50,4	94,57	150,69	197,81	8,02	8,57	6,85	6,72	35,12	38,68	56	10,42		26,7	43
960	2009	50,3	94,56	150,62	197,78	8,01	8,57	6,84	6,72	35,10	38,66	56	10,42		26,9	43
980	2008	50,7	94,54	150,55	197,73	8,01	8,56	6,83	6,72	35,09	38,65	56	10,42		26,8	43
1000	2006	50,8	94,52	150,49	197,70	8,00	8,56	6,83	6,72	35,07	38,63	56	10,42		26,7	44
1020	2005	50,8	94,51	150,43	197,66	8,00	8,55	6,82	6,71	35,05	38,62	56	10,42		26,6	43

1040	2003	51,2	94,49	150,36	197,62	7,99	8,55	6,82	6,71	35,04	38,61	56	10,42		26,8	43
1060	2001	50,4	94,47	150,29	197,58	7,99	8,54	6,81	6,71	35,02	38,59	56	10,42		26,7	44
1080	2000	51,3	94,45	150,23	197,54	7,98	8,54	6,80	6,71	35,00	38,58	56	10,42		26,9	43
1100	2000	50,4	94,43	150,16	197,49	7,98	8,53	6,80	6,71	34,98	38,56	56	10,42		29,5	55
1120	1998	52,3	94,39	150,13	197,44	7,98	8,53	6,79	6,71	34,97	38,55	56	10,42		29,3	54
1140	1997	52,4	94,35	150,11	197,38	7,97	8,52	6,79	6,71	34,95	38,54	56	10,42		29,3	53
1160	1995	52,6	94,32	150,08	197,33	7,97	8,52	6,78	6,70	34,93	38,52	56	10,42		29,2	52
1180	1994	52,7	94,31	150,06	197,30	7,96	8,51	6,77	6,70	34,92	38,51	56	10,42		28,0	50
1200	1993	53,0	94,31	150,04	197,27	7,96	8,51	6,77	6,70	34,90	38,49	56	10,42		27,8	48
1220	1992	53,4	94,30	150,02	197,24	7,95	8,50	6,76	6,70	34,88	38,48	56	10,42		27,8	45
1240	1991	53,5	94,30	150,00	197,20	7,95	8,50	6,76	6,70	34,87	38,47	56	10,42		27,5	44
1260	1990	54,1	94,29	149,98	197,16	7,94	8,49	6,75	6,70	34,85	38,45	56	10,42		27,4	43
1280	1989	54,3	94,28	149,96	197,15	7,94	8,49	6,74	6,70	34,85	38,44	56	10,42		27,4	44
1300	1989	54,3	94,29	149,95	197,15	7,93	8,48	6,74	6,70	34,84	38,42	56	10,42		27,2	43
1320	1989	54,4	94,28	149,94	197,15	7,93	8,48	6,74	6,70	34,83	38,42	56	10,42		27,1	43
2760	1985	55,8	93,81	148,98	196,70	7,90	8,46	6,73	6,69	34,80	38,40	56	10,42		30,0	58
4200	1959	105	93,60	148,12	196,26	7,88	8,44	6,70	6,67	34,76	38,37	105			30,5	58

Fonte: Autor (2021)

Obs 1 – Temperatura equivalente a temperatura no ponto 0m do secador.

Quadro B2 - Experimento 2: Tijolo 2, secagem na estufa.

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno a estufa			Externo a estufa	
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2354	27,5	97,90	154,1	205,2	8,41	8,98	7,25	6,99	37,30	40,30	63	8,04		27,8	52
5	2348	30,1	97,74	153,90	204,93	8,39	8,96	7,23	6,98	37,22	40,23	63	8,04		27,5	52
10	2345	33,4	97,58	153,71	204,67	8,38	8,94	7,21	6,97	37,13	40,15	63	8,04		27,4	53
15	2338	36,6	97,43	153,52	204,41	8,36	8,92	7,20	6,96	37,06	40,09	63	8,04		27,1	53
20	2331	36,8	97,27	153,32	204,14	8,35	8,91	7,18	6,95	36,98	40,02	63	8,04		27,0	53
25	2327	36,7	97,11	153,12	203,88	8,33	8,89	7,17	6,94	36,90	39,95	63	8,04		26,8	53
30	2319	37,1	96,97	152,95	203,62	8,32	8,87	7,15	6,93	36,82	39,88	63	8,04		26,7	53
40	2310	38,5	96,77	152,70	203,33	8,30	8,86	7,13	6,92	36,74	39,81	63	8,04		26,6	53
50	2298	39,2	96,63	152,53	203,07	8,29	8,84	7,12	6,91	36,66	39,74	63	8,04		26,2	53
60	2286	39,4	96,49	152,34	202,82	8,27	8,82	7,10	6,90	36,58	39,67	63	8,04		26,2	53
80	2270	39,4	96,33	152,15	202,56	8,26	8,81	7,09	6,89	36,50	39,60	63	8,04		26,2	53
100	2253	40,6	96,21	152,00	202,36	8,24	8,79	7,07	6,88	36,44	39,55	63	8,04		26,1	53
120	2236	41,3	96,10	151,85	202,16	8,23	8,78	7,06	6,87	36,38	39,50	63	8,04		26,1	53
140	2217	42,3	95,98	151,70	201,96	8,22	8,77	7,05	6,87	36,32	39,45	63	8,04		26,2	53
160	2203	42,3	95,86	151,55	201,76	8,21	8,75	7,04	6,86	36,26	39,40	63	8,04		26,2	53
180	2188	41,5	95,76	151,41	201,58	8,20	8,74	7,03	6,85	36,21	39,36	63	8,04		26,0	53
200	2175	41,7	95,63	151,25	201,37	8,19	8,73	7,01	6,85	36,14	39,30	63	8,04		25,8	53
220	2163	41,5	95,51	151,10	201,17	8,18	8,71	7,00	6,84	36,08	39,25	63	8,04		25,7	54
240	2150	42,0	95,38	150,94	200,96	8,17	8,70	6,99	6,83	36,01	39,21	63	8,04		25,8	53
260	2139	41,9	95,27	150,80	200,77	8,16	8,69	6,98	6,82	35,96	39,15	63	8,04		25,8	52
280	2128	42,6	95,15	150,65	200,58	8,15	8,68	6,97	6,81	35,90	39,10	63	8,04		25,7	52
300	2118	42,5	95,06	150,53	200,41	8,14	8,67	6,96	6,80	35,86	39,02	63	8,04		25,8	52
320	2108	43,6	94,95	150,40	200,23	8,13	8,66	6,95	6,80	35,80	38,97	63	8,04		25,8	52
340	2099	44,1	94,85	150,27	200,06	8,12	8,65	6,94	6,79	35,75	38,93	63	8,04		25,8	52
360	2090	44,6	94,75	150,15	199,89	8,11	8,64	6,93	6,79	35,70	38,89	63	8,04		26,0	53
380	2082	45,6	94,65	150,02	199,72	8,11	8,64	6,93	6,78	36,65	38,85	63	8,04		25,4	54
400	2074	46,2	94,56	149,91	199,58	8,10	8,63	6,92	6,78	35,61	38,82	63	8,04		25,6	54

420	2067	46,8	94,44	149,77	199,46	8,09	8,62	6,91	6,77	35,55	38,77	63	8,04		25,7	54
440	2060	47,7	94,33	149,65	199,32	8,08	8,61	6,90	6,77	35,50	38,73	63	8,04		25,6	54
460	2053	48,8	94,23	149,52	199,19	8,08	8,60	6,89	6,76	35,45	38,69	63	8,04		25,5	55
480	2047	49,1	94,13	149,40	199,06	8,07	8,59	6,88	6,76	35,40	38,65	63	8,04		25,5	53
500	2041	49,7	94,04	149,29	198,92	8,07	8,59	6,87	6,76	35,34	38,60	63	8,04		25,3	53
520	2035	50,3	93,98	149,20	198,80	8,06	8,58	6,87	6,75	35,30	38,57	63	8,04		25,8	55
540	2031	50,2	93,90	149,10	198,66	8,06	8,58	6,86	6,75	35,26	38,54	63	8,04		29,2	54
560	2030	46,9	93,82	149,00	198,53	8,05	8,57	6,85	6,75	35,22	38,52	63	8,04		29,6	68
580	2026	49,3	93,74	148,90	198,40	8,05	8,56	6,85	6,74	35,18	38,50	63	8,04		29,6	66
600	2022	52,2	93,65	148,79	198,26	8,04	8,56	6,84	6,74	35,13	38,47	63	8,04		29,5	66
620	2019	53,3	93,59	148,70	198,14	8,04	8,55	6,84	6,74	35,10	38,46	63	8,04		29,4	66
640	2016	54,0	93,51	148,60	198,00	8,03	8,55	6,83	6,73	35,08	38,44	63	8,04		29,2	65
660	2013	54,6	93,43	148,50	197,93	8,03	8,54	6,83	6,73	35,06	38,42	63	8,04		29,0	58
680	2010	54,8	93,35	148,40	197,86	8,02	8,54	6,82	6,73	35,04	38,41	63	8,04		29,0	56
700	2007	55,4	93,30	148,36	197,78	8,02	8,53	6,82	6,72	35,01	38,38	63	8,04		28,8	54
720	2005	55,6	93,27	148,30	197,72	8,01	8,53	6,81	6,72	35,00	38,37	63	8,04		28,2	52
740	2002	54,6	93,23	148,25	197,64	8,01	8,52	6,81	6,72	34,98	38,36	63	8,04		27,9	50
760	2000	56,3	93,20	148,20	197,57	8,00	8,52	6,80	6,71	34,96	38,34	63	8,04		27,3	48
780	1998	56,8	93,16	148,15	197,50	8,00	8,51	6,80	6,71	34,94	38,32	63	8,04		27,0	46
800	1996	56,9	93,13	148,11	197,44	7,99	8,51	6,79	6,71	34,93	38,31	63	8,04		27,3	46
820	1994	57,5	93,08	148,05	197,36	7,99	8,50	6,79	6,70	34,90	38,28	63	8,04		26,9	47
840	1992	57,6	93,04	148,00	197,28	7,98	8,50	6,78	6,70	34,88	38,26	63	8,04		26,7	46
860	1991	57,6	93,00	147,95	197,21	7,98	8,49	6,78	6,70	34,86	38,24	63	8,04		26,6	45
880	1989	57,6	92,96	147,90	197,14	7,97	8,49	6,77	6,69	34,84	38,22	63	8,04		26,4	45
900	1988	57,8	92,91	147,84	197,06	7,97	8,48	6,77	6,69	34,81	38,21	63	8,04		26,4	47
920	1986	58,2	92,88	147,80	197,02	7,96	8,48	6,76	6,69	34,80	38,18	63	8,04		26,3	47
940	1984	58,9	92,84	147,75	196,98	7,96	8,47	6,76	6,68	34,78	38,16	63	8,04		26,2	47
960	1984	58,8	92,80	147,70	96,95	7,95	8,47	6,74	6,68	34,76	38,14	63	8,04		26,2	46
980	1983	59,1	92,76	147,65	196,92	7,94	8,46	6,74	6,68	34,74	38,12	63	8,04		26,2	47
1000	1982	58,9	92,75	147,61	196,90	7,94	8,46	6,73	6,67	34,73	38,11	63	8,04		26,0	47
1020	1981	59,7	92,72	147,57	196,87	7,93	8,45	6,73	6,67	34,70	38,08	63	8,04		26,0	47
1040	1981	60,4	92,71	147,56	196,87	7,93	8,45	6,72	6,67	34,68	38,06	63	8,04		26,0	46
1060	1980	60,1	92,71	147,52	196,86	7,92	8,44	6,72	6,67	34,67	38,03	63	8,04		26,0	47
1080	1979	59,9	92,71	147,50	196,86	7,92	8,44	6,72	6,67	34,66	38,02	63	8,04		26,0	47

1100	1978	60,1	92,70	147,49	196,86	7,91	8,43	6,72	6,67	34,65	38,01	63	8,04		26,0	48
1120	1977	59,8	92,70	147,48	196,85	7,91	8,43	6,72	6,67	34,64	38,00	63	8,04		26,0	48
1140	1976	59,9	92,69	147,46	196,85	7,90	8,42	6,72	6,67	34,63	38,99	63	8,04		26,0	48
1160	1976	59,7	92,69	147,46	196,85	7,90	8,42	6,72	6,67	34,62	38,99	63	8,04		26,1	48
1180	1976	59,8	92,69	147,45	196,85	7,89	8,41	6,72	6,67	34,62	37,98	63	8,04		26,1	47
2620	1971	63,0	92,45	146,67	196,65	7,86	8,38	6,70	6,65	34,59	37,96	63	8,04		29,4	49
4060	1947	105	92,33	146,41	196,20	7,84	8,36	6,68	6,64	34,56	37,93	105			30,0	45

Fonte: Autor (2021)

Obs 2 – Temperatura equivalente a temperatura no ponto 5m do secador.

Quadro B3 - Experimento 2: Tijolo 3, secagem na estufa.

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno a estufa			Externo a estufa	
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2362	27,9	98,06	153,96	204,90	8,38	8,46	7,15	7,03	37,00	40,20	70	5,02		29,0	49
5	2347	29,4	97,90	153,71	204,64	8,36	8,44	7,13	7,02	36,92	40,12	70	5,02		29,0	49
10	2344	32,5	97,74	153,46	204,28	8,34	8,42	7,12	7,01	36,84	40,04	70	5,02		28,7	49
15	2340	35	97,58	153,22	203,93	8,32	8,40	7,11	7,00	36,77	39,96	70	5,02		28,6	49
20	2334	36,2	97,43	152,96	203,56	8,30	8,38	7,10	6,99	36,68	39,89	70	5,02		28,4	49
25	2330	36,2	97,28	152,72	203,20	8,28	8,37	7,09	6,98	36,61	39,82	70	5,02		28,5	48
30	2325	36,7	97,14	152,50	202,84	8,27	8,35	7,08	6,97	36,53	39,74	70	5,02		28,3	48
40	2316	38,9	96,93	152,19	202,48	8,24	8,33	7,06	6,96	36,49	39,68	70	5,02		28,3	48
50	2305	39,8	96,80	151,96	202,11	8,22	8,31	7,05	6,95	36,36	39,58	70	5,02		27,7	47
60	2293	40,8	96,65	151,72	201,76	8,20	8,30	7,04	6,94	36,30	39,52	70	5,02		27,5	47
80	2274	41,5	96,53	151,48	201,49	8,19	8,29	7,03	6,93	36,21	39,45	70	5,02		27,3	47
100	2253	41,5	96,42	151,29	201,22	8,17	8,27	7,02	6,92	36,16	39,40	70	5,02		26,8	47
120	2237	42,0	96,30	151,10	200,95	8,16	8,26	7,01	6,91	36,10	39,34	70	5,02		27,6	48
140	2216	42,2	96,18	150,92	200,68	8,14	8,25	7,00	6,91	36,04	39,28	70	5,02		27,2	46
160	2200	42,4	96,07	150,73	200,14	8,13	8,23	6,99	6,90	35,98	39,23	70	5,02		26,8	44
180	2185	42,6	95,96	150,56	199,88	8,11	8,22	6,98	6,89	35,94	39,18	70	5,02		26,9	44
200	2169	43,2	95,83	150,36	199,60	8,10	8,21	6,98	6,89	35,87	39,11	70	5,02		26,6	44
220	2154	43,0	95,72	150,17	199,33	8,08	8,20	6,97	6,88	35,81	39,06	70	5,02		26,7	44
240	2140	44,1	95,61	149,98	199,07	8,07	8,19	6,96	6,87	35,74	39,01	70	5,02		26,5	44
260	2127	45,0	95,50	149,80	198,83	8,06	8,18	6,95	6,87	35,69	38,95	70	5,02		26,4	44
280	2114	45,8	95,40	149,62	198,33	8,05	8,17	6,95	6,86	35,64	38,90	70	5,02		26,3	44
300	2102	47,0	95,31	149,46	198,09	8,03	8,16	6,94	6,85	35,54	38,86	70	5,02		26,2	44
320	2092	48,0	95,19	149,29	197,90	8,02	8,15	6,93	6,85	35,54	38,80	70	5,02		26,0	44
340	2081	48,2	95,09	149,13	197,72	8,01	8,14	6,93	6,84	35,49	38,75	70	5,02		26,0	44
360	2071	50,5	95,02	148,97	197,54	8,00	8,13	6,92	6,84	35,44	38,72	70	5,02		25,8	43
380	2062	51,5	94,94	148,85	197,36	7,99	8,12	6,92	6,83	35,39	38,68	70	5,02		25,8	43
400	2054	52,3	94,87	148,73	197,19	7,98	8,11	6,91	6,83	35,36	38,65	70	5,02		25,8	43

420	2047	52,4	94,78	148,60	197,00	7,97	8,10	6,90	6,82	35,32	38,60	70	5,02		25,7	43
440	2041	54,4	94,70	148,48	196,82	7,96	8,09	6,90	6,81	35,28	38,56	70	5,02		25,7	43
460	2034	54,3	94,66	148,35	196,64	7,95	8,08	6,89	6,81	35,24	38,53	70	5,02		25,7	43
480	2028	56,0	94,61	148,20	196,46	7,94	8,08	6,89	6,80	35,20	38,49	70	5,02		25,5	43
500	2023	57,0	94,57	148,13	196,28	7,93	8,07	6,88	6,80	35,16	38,45	70	5,02		25,6	43
520	2018	58,0	94,52	148,06	196,10	7,92	8,06	6,87	6,79	35,12	38,41	70	5,02		25,6	43
540	2014	58,6	94,47	147,98	195,92	7,91	8,05	6,87	6,79	35,08	38,37	70	5,02		25,5	43
560	2010	59,4	94,43	147,98	195,74	7,90	8,04	6,86	6,78	35,04	38,34	70	5,02		25,0	43
580	2008	59,3	94,38	147,91	195,63	7,89	8,03	6,86	6,78	35,00	38,30	70	5,02		25,4	43
600	2004	60,2	94,33	147,90	195,52	7,88	8,02	6,85	6,78	34,95	38,25	70	5,02		25,1	43
620	2001	60,6	94,29	147,83	195,41	7,87	8,01	6,85	6,77	34,93	38,24	70	5,02		25,2	43
640	1999	61,1	94,24	147,76	195,30	7,87	8,00	6,84	6,77	34,89	38,22	70	5,02		25,1	43
660	1996	61,8	94,20	147,69	195,20	7,86	8,00	6,84	6,77	34,85	38,19	70	5,02		25,1	43
680	1994	62,9	94,15	147,61	195,09	7,86	7,99	6,83	6,77	34,82	38,17	70	5,02		25,2	43
700	1994	52,6	94,12	147,55	194,99	7,85	7,98	6,83	6,76	34,81	38,16	70	5,02		27,9	51
720	1993	58,6	94,06	147,46	194,87	7,85	7,98	6,82	6,76	34,80	38,13	70	5,02		27,4	48
740	1992	61,6	94,01	147,39	194,76	7,84	7,97	6,82	6,76	34,79	38,11	70	5,02		27,1	47
760	1990	63,1	93,97	147,32	194,66	7,84	7,97	6,82	6,75	34,78	38,08	70	5,02		26,8	45
780	1988	64,2	93,92	147,24	194,55	7,83	7,96	6,81	6,75	34,77	38,06	70	5,02		26,6	45
800	1987	64,9	93,89	147,08	194,45	7,83	7,96	6,81	6,75	34,76	38,05	70	5,02		26,5	45
820	1985	65,3	93,83	147,02	194,40	7,82	7,95	6,80	6,75	34,75	38,02	70	5,02		26,4	45
840	1984	65,9	93,78	146,95	194,37	7,82	7,95	6,80	6,74	34,74	38,00	70	5,02		26,3	44
860	1983	66,0	93,74	146,87	194,34	7,81	7,94	6,79	6,74	34,73	37,97	70	5,02		26,2	44
880	1982	66,4	93,69	146,80	194,30	7,81	7,93	6,79	6,74	34,72	37,95	70	5,02		26,2	44
900	1981	66,3	93,64	146,71	194,25	7,80	7,93	6,78	6,74	34,70	37,94	70	5,02		26,0	44
920	1981	66,1	93,60	146,65	194,22	7,80	7,92	6,78	6,73	34,70	37,92	70	5,02		26,0	44
940	1980	66,2	93,55	146,58	194,17	7,79	7,91	6,77	6,73	34,69	37,91	70	5,02		25,8	44
960	1979	66,6	93,51	146,50	194,14	7,79	7,91	6,77	6,73	34,68	37,90	70	5,02		25,7	44
980	1978	66,9	93,46	146,48	194,10	7,78	7,89	6,76	6,72	34,67	37,89	70	5,02		25,6	44
1000	1977	67,1	93,43	146,47	194,08	7,78	7,88	6,76	6,72	34,67	37,89	70	5,02		25,6	44
1020	1976	67,5	93,37	146,40	194,02	7,77	7,88	6,75	6,72	34,65	37,87	70	5,02		25,7	44
1040	1976	67,5	93,34	146,38	194,00	7,77	7,87	6,75	6,71	34,64	37,86	70	5,02		25,6	44
1060	1975	67,4	93,32	146,37	194,00	7,76	7,87	6,74	6,71	34,63	37,85	70	5,02		25,5	44
1080	1974	67,3	93,30	146,36	194,00	7,76	7,85	6,73	6,70	34,62	37,85	70	5,02		25,4	44

1100	1974	67,3	93,30	146,36	194,00	7,75	7,83	6,73	6,69	34,61	37,85	70	5,02		25,4	44
1120	1974	67,2	93,30	146,35	194,00	7,75	7,82	6,73	6,67	34,60	37,85	70	5,02		25,4	43
2560	1970	70,0	92,25	146,13	193,96	7,73	7,81	6,70	6,66	34,57	37,82	70	5,02		29,5	55
4000	1954	105	92,14	146,00	193,94	7,71	7,79	6,68	6,65	34,55	37,80	105			30,2	65

Fonte: Autor (2021)

Obs 1 – Temperatura equivalente a temperatura no ponto 10m do secador.

Quadro B4 - Experimento 2: Tijolo 4, secagem na estufa.

t(min)	Tijolo											Ar				
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	Interno a estufa			Externo a estufa	
												T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2375	27,9	97,07	153,79	206	8,23	7,96	7,1	7,04	36,95	41,05	77	3,71		28,7	51
5	2364	31,2	96,96	153,54	205,63	8,21	7,93	7,09	7,02	36,86	40,93	77	3,71		28,3	50
10	2358	36,6	96,85	153,29	205,27	8,19	7,91	7,08	7,01	36,78	40,81	77	3,71		28,3	50
15	2353	37,6	96,75	153,05	204,92	8,17	7,89	7,07	7,00	36,68	40,68	77	3,71		28,4	49
20	2346	39,2	96,63	152,79	204,54	8,15	7,87	7,06	6,99	36,61	40,57	77	3,71		28,2	48
25	2338	40,2	96,52	152,54	204,18	8,13	7,85	7,05	6,98	36,53	40,46	77	3,71		28,0	47
30	2330	40,4	96,43	152,27	203,82	8,12	7,83	7,04	6,97	36,44	40,34	77	3,71		28,0	47
40	2313	41,7	96,26	152,00	203,45	8,09	7,80	7,03	6,95	36,36	40,22	77	3,71		27,9	47
50	2300	42,5	96,18	151,78	203,08	8,07	7,78	7,02	6,94	36,26	40,11	77	3,71		27,7	46
60	2287	42,5	96,08	151,54	202,73	8,05	7,76	7,00	6,93	36,19	39,39	77	3,71		27,5	46
80	2264	43,6	95,97	151,29	202,46	8,04	7,75	6,98	6,92	36,11	39,87	77	3,71		27,2	44
100	2240	43,6	95,88	151,11	202,18	8,02	7,73	6,97	6,91	36,04	39,78	77	3,71		27,0	44
120	2216	43,8	95,79	150,93	201,91	8,01	7,72	6,95	6,90	35,98	39,69	77	3,71		27,0	43
140	2197	44,3	95,71	150,75	201,64	8,00	7,70	6,94	6,89	35,92	39,60	77	3,71		26,8	43
160	2179	45,3	95,63	150,57	201,37	7,98	7,68	6,92	6,89	35,85	39,51	77	3,71		26,5	43
180	2161	45,8	95,56	150,38	201,11	7,97	7,67	6,90	6,88	35,78	39,44	77	3,71		26,4	43

200	82145	46,5	95,47	150,21	200,82	7,95	7,65	6,89	6,87	35,73	39,34	77	3,71		26,2	43
220	2129	47,5	95,38	150,03	200,55	7,94	7,64	6,88	6,86	35,66	39,25	77	3,71		26,2	43
240	2113	49,9	95,31	149,98	200,27	7,93	7,63	6,86	6,86	35,61	39,15	77	3,71		26,1	43
260	2101	51,0	95,22	149,78	200,10	7,92	7,61	6,85	6,85	35,54	39,07	77	3,71		26,1	43
280	2089	52,1	95,14	149,66	199,92	7,90	7,60	6,83	6,84	35,48	38,99	77	3,71		26,0	43
300	2078	53,5	95,04	149,54	199,75	7,89	7,59	6,83	6,84	35,43	38,92	77	3,71		25,9	43
320	2067	55,2	94,97	149,40	199,56	7,89	7,58	6,83	6,83	35,37	38,83	77	3,71		25,7	43
340	2058	56,1	94,92	149,28	199,38	7,88	7,56	6,83	6,82	35,31	38,76	77	3,71		25,6	43
360	2048	58,2	94,86	149,16	199,19	7,87	7,55	6,83	6,82	35,26	38,68	77	3,71		25,6	43
380	2041	59,1	94,81	149,03	199,01	7,86	7,54	6,83	6,81	35,21	38,61	77	3,71		25,6	43
400	2035	60,2	94,76	148,92	198,84	7,85	7,53	6,83	6,81	35,17	38,48	77	3,71		25,4	43
420	2030	58,9	94,72	148,79	198,65	7,84	7,52	6,83	6,80	35,12	38,43	77	3,71		25,4	43
440	2025	61,6	94,69	148,66	198,47	7,83	7,51	6,83	6,79	35,08	38,37	77	3,71		25,4	43
460	2020	63,5	94,66	148,54	198,29	7,82	7,50	6,83	6,79	35,04	38,33	77	3,71		25,3	43
480	2016	65,4	94,64	148,42	198,11	7,81	7,49	6,83	6,78	35,00	38,30	77	3,71		25,3	43
500	2012	65,6	94,61	148,30	198,00	7,80	7,48	6,83	6,78	34,97	38,26	77	3,71		25,3	43
520	2009	67,0	94,58	148,17	197,89	7,80	7,47	6,83	6,77	34,95	38,23	77	3,71		25,3	43
540	2007	67,5	94,55	148,05	197,78	7,79	7,45	6,83	6,77	34,92	38,19	77	3,71		25,3	43
560	2004	68,4	94,52	147,93	197,67	7,78	7,44	6,83	6,76	34,90	38,16	77	3,71		25,3	43
580	2002	67,9	94,50	147,80	197,56	7,78	7,43	6,83	6,76	34,87	38,13	77	3,71		25,2	43
600	2000	68,5	94,46	147,67	197,44	7,77	7,43	6,83	6,75	34,84	38,11	77	3,71		25,2	43
620	1998	68,9	94,44	147,56	197,34	7,77	7,42	6,83	6,75	34,82	38,07	77	3,71		25,1	53
640	1998	57,2	94,42	147,43	197,23	7,77	7,42	6,83	6,74	34,80	38,04	77	3,71		27,8	51
660	1997	64,2	94,39	147,36	197,12	7,76	7,41	6,83	6,74	34,77	38,01	77	3,71		27,5	48
680	1996	68,3	94,36	147,30	197,02	7,76	7,40	6,83	6,73	34,75	37,98	77	3,71		27,1	47
700	1995	70,6	94,35	147,25	196,92	7,75	7,40	6,82	6,73	34,73	37,96	77	3,71		26,8	46
720	1993	71,4	94,31	147,18	196,80	7,75	7,39	6,82	6,72	34,70	37,92	77	3,71		26,5	46
740	1992	72,0	94,28	147,12	196,69	7,75	7,39	6,82	6,72	34,67	37,87	77	3,71		26,5	45
760	1990	72,9	94,25	147,11	196,58	7,74	7,38	6,82	6,71	34,65	37,86	77	3,71		26,4	45
780	1989	72,9	94,23	147,10	196,47	7,74	7,38	6,82	6,71	34,64	37,85	77	3,71		26,3	45
800	1988	73,9	94,20	147,09	196,36	7,73	7,37	6,82	6,70	34,63	37,84	77	3,71		26,1	45
820	1987	74,4	94,17	147,08	196,33	7,73	7,37	6,82	6,70	34,62	37,84	77	3,71		26,1	44
840	1986	74,4	94,15	147,07	196,30	7,73	7,36	6,82	6,69	34,61	37,83	77	3,71		26,0	44
860	1985	74,5	94,12	147,06	196,27	7,72	7,36	6,82	6,69	34,61	37,83	77	3,71		26,0	44

880	1985	74,9	94,09	147,06	196,24	7,72	7,35	6,82	6,68	34,60	37,82	77	3,71		26,0	45
900	1984	74,5	94,06	147,04	196,21	7,71	7,34	6,82	6,68	34,60	37,82	77	3,71		26,0	45
920	1983	74,5	94,05	147,04	196,16	7,71	7,34	6,82	6,67	34,60	37,82	77	3,71		26,0	45
940	1982	74,7	94,03	147,03	196,12	7,71	7,34	6,82	6,67	34,59	37,81	77	3,71		26,0	45
960	1982	74,7	94,02	147,03	196,09	7,70	7,33	6,82	6,67	34,59	37,81	77	3,71		26,0	44
980	1981	74,8	94,02	147,02	196,03	7,70	7,33	6,82	6,66	34,59	37,81	77	3,71		26,0	44
1000	1981	74,6	94,01	147,01	196,00	7,70	7,32	6,82	6,66	34,59	37,80	77	3,71		25,9	44
1020	1981	74,7	94,00	147,00	196,00	7,69	7,32	6,81	6,66	34,59	37,80	77	3,71		25,7	44
2460	1977	77	93,56	146,15	195,00	7,67	7,31	6,78	6,64	34,56	37,78	77	3,71		29,2	60
3900	1967	105	93,32	146,13	194,70	7,65	7,30	6,75	6,63	34,54	37,77	105			30	59

Fonte: Autor (2021)

Obs 1 – Temperatura equivalente a temperatura no ponto 15m do secador.

Quadro B5 - Experimento 2: Tijolo 5, secagem na estufa.

t(min)	Tijolo											Ar				
	m (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	Interno a estufa			Externo a estufa	
												T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
0	2366	29,00	97,53	153,27	204	7,98	7,76	7,03	7,0	36,50	40,54	85,0	2,76		29,0	57
5	2355	33,00	97,37	152,98	203,58	7,96	7,74	7,02	6,98	36,42	40,44	85,0	2,76		28,8	51
10	2350	38,20	97,21	152,70	203,16	7,94	7,73	7,01	6,97	36,34	40,34	85,0	2,76		28,7	49
15	2342	41,60	97,06	152,42	202,76	7,93	7,71	7,00	6,95	36,27	40,25	85,0	2,76		28,6	48
20	2331	43,00	96,89	152,13	202,33	7,91	7,70	6,99	6,94	36,18	40,14	85,0	2,76		28,5	48
25	2323	43,90	96,74	151,85	201,92	7,90	7,69	6,98	6,93	36,10	40,04	85,0	2,76		28,4	48
30	2314	44,10	96,60	151,56	201,82	7,89	7,68	6,91	6,92	36,04	39,97	85,0	2,76		28,2	47
40	2295	44,50	96,38	151,18	201,72	7,86	7,66	6,96	6,90	35,93	39,82	85,0	2,76		28,0	47
50	2281	44,10	96,25	150,98	201,51	7,85	7,64	6,95	6,89	35,87	39,73	85,0	2,76		27,2	47
60	2265	45,1	96,12	150,72	201,17	7,84	7,63	6,94	6,88	35,82	39,66	85,0	2,76		27,5	46
80	2234	46,1	95,97	150,46	200,76	7,82	7,62	6,93	6,87	35,76	39,59	85,0	2,76		27,0	45
100	2206	46,8	95,87	150,28	200,35	7,81	7,61	6,93	6,86	35,70	39,51	85,0	2,76		26,7	45
120	2181	48,0	95,75	150,07	200,04	7,80	7,60	6,92	6,85	35,64	39,44	85,0	2,76		26,6	45
140	2159	49,5	95,63	149,86	199,73	7,79	7,59	6,91	6,84	35,58	39,36	85,0	2,76		26,4	44
160	2137	50,1	95,51	149,64	199,42	7,78	7,58	6,90	6,83	35,53	39,29	85,0	2,76		26,3	44
180	2119	52,6	95,41	149,44	199,11	7,76	7,57	6,90	6,82	35,49	39,22	85,0	2,76		26,8	44
200	2100	52,8	95,28	149,22	198,79	7,75	7,56	6,89	6,81	35,43	39,15	85,0	2,76		26,6	44
220	2085	55,2	95,16	149,01	198,48	7,74	7,56	6,88	6,80	35,38	39,08	85,0	2,76		26,1	44
240	2072	57,1	95,03	148,78	198,16	7,73	7,55	6,88	6,79	35,33	39,01	85,0	2,76		26,1	44
260	2060	59,1	94,94	148,61	197,86	7,72	7,54	6,87	6,79	35,30	38,95	85,0	2,76		26,0	43
280	2049	61,9	94,84	148,24	197,59	7,71	7,53	6,86	6,78	35,26	38,90	85,0	2,76		25,8	43
300	2038	63,6	94,75	148,07	197,33	7,71	7,52	6,86	6,77	35,23	38,86	85,0	2,76		25,7	43
320	2030	63,3	94,63	147,87	197,11	7,70	7,52	6,85	6,77	35,18	38,80	85,0	2,76		25,5	43
340	2023	65,3	94,53	147,69	196,90	7,69	7,51	6,85	6,78	35,14	38,75	85,0	2,76		25,5	44
360	2017	70,3	94,45	147,55	196,69	7,68	7,50	6,84	6,78	35,10	38,70	85,0	2,76		25,4	44
380	2012	72,4	94,37	147,40	196,48	7,68	7,50	6,84	6,77	35,06	38,65	85,0	2,76		26,3	46

400	2007	75,2	94,28	147,27	196,29	7,67	7,49	6,84	6,77	35,03	38,61	85,0	2,76		26,1	45
420	2003	76,0	94,22	147,17	196,07	7,67	7,48	6,84	6,76	34,98	38,55	85,0	2,76		26,0	45
440	2000	76,0	94,17	147,09	195,86	7,66	7,48	6,83	6,75	34,94	38,50	85,0	2,76		25,4	44
460	1997	78,2	94,12	147,00	195,65	7,65	7,47	6,83	6,75	34,92	38,45	85,0	2,76		25,7	42
480	1994	77,9	94,07	146,91	195,44	7,64	7,46	6,83	6,74	34,90	38,40	85,0	2,76		25,5	42
500	1994	66,6	94,03	146,83	195,24	7,63	7,45	6,82	6,73	34,88	38,35	85,0	2,76		28,1	49
520	1992	74,4	93,98	146,75	195,03	7,63	7,45	6,82	6,72	34,86	38,30	85,0	2,76		27,6	47
540	1991	77,2	93,93	146,66	194,82	7,62	7,44	6,82	6,72	34,84	38,26	85,0	2,76		27,4	47
560	1989	78,2	93,89	146,58	194,75	7,61	7,44	6,81	6,71	34,82	38,23	85,0	2,76		27,1	46
580	1987	79,1	93,84	146,56	194,68	7,61	7,43	6,81	6,70	34,80	38,19	85,0	2,76		26,8	44
600	1985	80,4	93,81	146,53	194,60	7,60	7,43	6,81	6,70	34,77	38,15	85,0	2,76		26,7	44
620	1983	80,7	93,81	146,52	194,54	7,60	7,42	6,81	6,69	34,76	38,12	85,0	2,76		26,5	44
640	1981	80,5	93,80	146,50	194,47	7,60	7,42	6,80	6,69	34,74	38,09	85,0	2,76		26,2	44
660	1981	81,1	93,79	146,49	194,40	7,59	7,42	6,80	6,69	34,72	38,05	85,0	2,76		26,1	43
680	1980	81,2	93,78	146,48	194,33	7,59	7,41	6,80	6,68	34,70	38,02	85,0	2,76		26,0	43
700	1979	81,7	93,78	146,48	194,27	7,59	7,41	6,80	6,68	34,69	37,99	85,0	2,76		26,0	43
720	1978	82,0	93,76	146,47	194,20	7,58	7,41	6,79	6,67	34,66	37,95	85,0	2,76		25,9	44
740	1977	82,1	93,76	146,47	194,14	7,58	7,41	6,79	6,67	34,64	37,91	85,0	2,76		25,9	43
760	1976	82,6	93,75	146,46	194,08	7,58	7,40	6,79	6,67	34,62	37,88	85,0	2,76		25,8	43
780	1976	82,8	93,74	146,46	194,02	7,57	7,40	6,79	6,66	34,60	37,84	85,0	2,76		25,7	43
800	1975	82,7	93,73	146,46	194,00	7,57	7,40	6,79	6,66	34,59	37,82	85,0	2,76		25,6	43
820	1975	82,6	93,71	146,45	194,00	7,57	7,40	6,79	6,66	34,57	37,79	85,0	2,76		25,8	43
840	1975	82,7	93,70	146,45	194,00	7,57	7,40	6,79	6,65	34,57	37,78	85,0	2,76		25,7	43
2.280	1972	85,0	93,40	145,95	193,74	7,56	7,38	6,78	6,64	34,54	37,76	85,0	2,76		29,6	60
3.720	1965	105	93,16	145,92	193,63	7,55	7,35	6,77	6,63	34,51	37,75	105			31	59

Fonte: Autor (2021)

Obs 1 – Temperatura equivalente a temperatura no ponto 20m do secador.

ANEXO C – Secagem das amostras no secador, vagoneta em movimento

Quadro C1 - Experimento 3: Vagoneta em movimento, tijolo com furo paralelo a direção do fluxo do ar.

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	M (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
t=0 x=0	2460	32,50	97,60	155,30	205,20	8,34	8,72	7,19	6,86	37,01	40,91	56	24	1,8	35	55
t=5 x=5	2417	33,80	96,95	153,94	204,25	8,28	8,65	7,15	6,83	36,92	40,82	63	23	2,2	35	55
t=10 x=10	2390	34,20	96,18	152,83	203,66	8,24	8,61	7,13	6,82	36,87	40,77	70	22	2,5	35	54
t=15 x=15	2358	34,90	95,49	151,71	202,96	8,19	8,56	7,10	6,80	36,80	40,70	77	20	3,1	35	54
t=20 x=20	2315	39,40	94,61	150,66	202,01	8,13	8,50	7,07	6,78	36,72	40,62	85	19	3,8	35	54
t=25 x=15 (volta)	2283	41,00	94,16	149,67	201,31	8,09	8,45	7,04	6,76	36,66	40,56	77	20	3,1	35	54

t=30 x=10 (volta)	2260	42,60	93,83	149,39	200,81	8,06	8,42	7,03	6,75	36,61	40,51	70	22	2,5	35	54
t=35 x=5 (volta)	2245	43,00	93,74	149,01	200,48	8,04	8,40	7,02	6,74	36,58	40,48	63	23	2,2	35	54
t=40 x=0 (volta)	2230	43,60	93,47	148,72	200,10	8,02	8,38	7,01	6,73	36,55	40,45	56	24	1,8	35	54
1.480 (estufa)	2063	65	93,05	148,06	195,38	7,90	7,97	6,74	6,56	34,91	39,52	65			29	71
2.920 (estufa)	2038	105	93,00	148,00	195,29	7,87	7,94	6,72	6,54	34,87	39,47	105			28	72

Fonte: Autor (2021)

Quadro C2 - Experimento 3: Vagoneta em movimento, tijolo com furo *perpendicular* a direção do fluxo do ar.

t(min)	Tijolo											Ar				
												Interno ao secador			Externo ao secador	
	M (g)	T _p (°C)	2L ₁ (mm)	2L ₂ (mm)	2L ₃ (mm)	b ₁ (mm)	b ₂ (mm)	b ₃ (mm)	b ₄ (mm)	l _x (mm)	l _y (mm)	T _a (°C)	UR _a (%)	v _a (m/s)	T _{amb} (°C)	UR _{amb} (%)
t=0 x=0	2452	31,60	97,40	154,96	205,60	8,36	8,71	7,18	6,84	37,45	40,94	56	24	1,8	35	55
t=5 x=5	2409	32,70	96,91	154,38	205,02	8,29	8,63	7,14	6,81	37,34	40,83	63	23	2,2	35	55
t=10 x=10	2386	33,20	96,48	153,44	204,71	8,25	8,59	7,12	6,80	37,29	40,78	70	22	2,5	35	54
t=15 x=15	2369	33,60	96,07	153,11	204,48	8,22	8,56	7,10	6,79	37,25	40,74	77	20	3,1	35	54
t=20 x=20	2340	35,00	95,38	152,12	204,09	8,18	8,51	7,08	6,77	37,18	40,67	85	19	3,8	35	54
t=25 x=15 (volta)	2315	35,50	94,72	151,46	203,75	8,14	8,47	7,05	6,76	37,12	40,61	77	20	3,1	35	54
t=30	2300	36,90	94,52	151,04	203,55	8,11	8,44	7,04	6,75	37,08	40,57	70	22	2,5	35	54

x=10 (volta)																
t=35 x=5 (volta)	2286	37,20	94,37	150,80	203,36	8,09	8,42	7,03	6,74	37,05	40,54	63	23	2,2	35	54
t=40 x=0 (volta)	2273	38,30	94,00	150,66	203,18	8,07	8,40	7,02	6,73	37,02	40,52	56	24	1,8	35	54
1.480 (estufa)	2041	65	93,25	148,37	195,27	7,87	7,97	6,75	6,55	34,89	39,50	65			29	71
2.920 (estufa)	2017	105	93,20	148,30	195,20	7,85	7,95	6,74	6,53	34,84	39,45	105			28	72

Fonte: Autor (2021)

ANEXO A₀ – Secagem ao ar livre, debaixo do galpão

Quadro A₀ 1 - Primeiro, segundo e terceiro empilhamentos

Data	Tijolo 1 Massa (g)	Tijolo 2 Massa (g)	Tijolo 3 Massa (g)	Tijolo 4 Massa (g)	Tijolo 5 Massa (g)	Tijolo 6 Massa (g)	Tijolo 7 Massa (g)	Média	PERDA
27/7/19	2740	2759	2740	2748	2739	2728	2772	2746,57	
28/7/19	2684	2736	2714	2712	2678	2638	2555	2673,85	72,72
31/7/19	2626	2699	2657	2597	2497	2453	2468	2571	102,85
01/8/19	2607	2677	2626	2547	2464	2431	2454	2543,71	27,29
02/8/19	2595	2644	2566	2492	2443	2423	2453	2516,57	27,14
3/8/19	2502	2522	2482	2465	2440	2419	2451	2468,71	47,86
4/8/19	2467	2474	2445	2442	2426	2411	2443	2444	24,71
5/8/19	2449	2457	2426	2439	2418	2405	2440	2433,42	10,58
6/8/19	2416	2430	2412	2419	2410	2401	2442	2418,57	14,85
7/8/19	2411	2427	2410	2417	2408	2399	2438	2415,71	2,86

Fonte: Autor (2021)